

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Caracterização de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético**

**Juliana Rodrigues Siviero dos Santos**

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

**Piracicaba  
2020**

**Juliana Rodrigues Siviero dos Santos**  
**Engenheira Florestal**

**Caracterização de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético**  
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em  
Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba**  
**2020**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Santos, Juliana Rodrigues Siviero dos

Caracterização de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético / Juliana Rodrigues Siviero dos Santos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

87 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Biomassa 2. Reaproveitamento de resíduos 3. Geração de energia I.  
Título

## AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais e todos os seus funcionários e professores pela formação acadêmica e por possibilitar a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

José Otávio Brito pela longa e valiosa orientação, amizade, compreensão e confiança durante todos esses anos de convivência.

Udemilson Luís Ceribelli, Aparecido, Maiara e Emanuelle pelo apoio nas análises laboratoriais.

As empresas envolvidas no presente estudo pelo fornecimento do material utilizado nas análises.

À Eldorado Brasil pelo apoio nas análises.

Ao meu marido e parceiro de vida Tiago pelo companheirismo, apoio, amor e paciência. Ao meu filho Henrique pela dose diária de amor.

Aos meus pais, Luiz e Claudete pelo apoio incondicional, amor e incentivo.

Aos amigos do laboratório e da pós-graduação, em especial Camila Sarto e Regina Gomes pela amizade, e risadas que muito ajudaram nessa etapa.

Aos amigos do LQCE Marina, Carol, Ananias, Wesley, Arthur, Glauco, Luciana e a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

*“Recria tua vida, sempre, sempre.  
Remove pedras e planta roseiras e faz doces. Recomeça.”*

*Cora Coralina*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	7
ABSTRACT .....	8
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	9
BIOMASSA E GERAÇÃO DE ENERGIA .....	9
BIOMASSA FLORESTAL.....	12
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	12
POLÍTICA NACIONAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS.....	13
REFERÊNCIAS .....	16
<b>CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DAS BIOMASSAS COMERCIALIZADAS POR EMPRESAS REPROCESSADORAS.....</b>	<b>19</b>
RESUMO.....	19
ABSTRACT.....	19
INTRODUÇÃO .....	20
MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
Materiais .....	22
Métodos.....	23
Avaliação visual da composição da biomassa.....	23
Granulometria.....	23
Teor de Umidade.....	24
Densidade à granel e densidade aparente.....	24
Poder calorífico superior.....	25
Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.....	25
Análise Estatística.....	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
Avaliação visual da composição da biomassa .....	25
Análise da qualidade dos materiais.....	27
Granulometria.....	27
Teor de umidade.....	30
Densidade à granel e densidade aparente.....	31
Poder calorífico superior.....	33
Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.....	34
CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS .....	36
<b>CAPÍTULO 3 – VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DOS RESÍDUOS MADEIREIROS AO LONGO DO ANO.....</b>	<b>39</b>
RESUMO.....	39
ABSTRACT.....	39
INTRODUÇÃO .....	39
MATERIAIS E MÉTODOS .....	41
Materiais .....	41
Métodos.....	42

Avaliação visual da composição da biomassa.....	42
Teor de Umidade .....	42
Granulometria.....	43
Densidade à granel.....	43
Poder calorífico superior.....	44
Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo .....	44
Análise Estatística .....	44
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS.....	58

#### **CAPÍTULO 4 – PRESENÇA DE CONTAMINANTES NAS CINZAS DE RESÍDUOS MADEIREIROS REPROCESSADOS PARA USO ENERGÉTICO..... 63**

RESUMO.....	63
ABSTRACT .....	63
INTRODUÇÃO .....	64
MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
MATERIAIS .....	67
MÉTODOS .....	68
Avaliação visual da composição da biomassa.....	68
Contaminantes minerais das cinzas.....	68
Determinação de Insolúveis em HCL.....	69
Determinação dos teores de cálcio e ferro .....	70
Determinação dos teores de sódio e potássio .....	70
Determinação dos teores de cloretos e sulfatos.....	71
Análise Estatística .....	72
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	82

#### **CONSIDERAÇÕES GERAIS ..... 86**

## RESUMO

### Caracterização de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético

É cada vez maior a necessidade do aumento da participação de fontes de energias renováveis na matriz energética mundial. O uso de fontes alternativas de energia é destacado entre as diretrizes das políticas energéticas brasileiras, sendo o reaproveitamento de resíduos um tema cada vez mais importante devido ao aumento da população mundial e também ao potencial energético de parte destes materiais. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi caracterizar resíduos madeireiros reprocessados utilizados como biomassa para geração de energia. Essa caracterização considerou os principais parâmetros tecnológicos para esta utilização e a presença de contaminantes que possam prejudicar o emprego destes materiais como biomassa energética. Os resultados das análises são apresentados nos capítulos dois, três e quatro deste trabalho. O capítulo dois avaliou o potencial energético de biomassas comercializadas em três empresas reprocessadoras do estado de São Paulo. Foram amostrados sete materiais disponíveis para comercialização: três amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados, duas amostras de cavacos de eucalipto e duas amostras de cavacos de paletes. Os resultados mostram que, apesar das amostras terem apresentado granulometria semelhante entre si, os três cavacos de resíduos madeireiros reprocessados apresentaram os maiores tamanhos médios. Observou-se que as biomassas energéticas são extremamente heterogêneas entre si. Dessa forma, o controle da qualidade e da variabilidade das características de materiais utilizados como biomassa para a geração de energia é um desafio tanto para aqueles que comercializam quanto para aqueles que adquirem este tipo de material. O capítulo três estudou a variação em diferentes períodos de alguns dos principais parâmetros de qualidade da biomassa disponível para compra utilizada para geração de energia. Para isso, foram amostrados, em três períodos diferentes, quatro materiais disponíveis para comercialização em duas empresas reprocessadoras do estado de São Paulo, sendo dois materiais de resíduos madeireiros reprocessados, uma amostra de cavacos de paletes e uma amostra de cavacos de eucalipto. Os resultados mostram que os cavacos de paletes foram os menos sujeitos à variação dos teores de umidade, enquanto a maior variação foi observada para os cavacos de eucalipto. Já o teor de cinzas foi muito variável entre as coletas, indicando a presença de agentes contaminantes externos na composição dos materiais avaliados. Dessa forma, conclui-se que há a necessidade de aprimoramento no controle de algumas das principais propriedades tecnológicas das biomassas. O capítulo quatro avaliou a presença de contaminantes em diferentes resíduos madeireiros comercializados para uso energético. Foram amostrados sete materiais disponíveis para este uso: seis amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados e uma amostra de cavacos de eucalipto. Para avaliação da concentração de contaminantes potencialmente prejudiciais à equipamentos destinados à queima destes materiais, alguns dos principais parâmetros correlacionados ao desgaste destes foram avaliados. Os resultados mostraram que os cavacos reprocessados são, na maioria dos casos, mais agressivos aos equipamentos em comparação ao cavaco de eucalipto. Além disso, são nítidas as menores taxas de contaminação dos cavacos reprocessados e comercializados pela empresa A em comparação aos materiais da empresa B. Foi possível concluir que há grande variação na concentração de contaminantes entre os resíduos avaliados. Desse modo, recomenda-se criteriosa seleção e controle de qualidade dos materiais utilizados, sobretudo cavacos de madeira reprocessada.

Palavras-chave: Biomassa, Reaproveitamento de resíduos, Geração de energia



## ABSTRACT

### Characterization of recycled wood residues for energy use

The increase of renewable energy sources in the world energetic matrix is being more important in the last decades. The use of alternative energy sources is highlighted among Brazilian energy policy guidelines, and the reuse of residues is an important subject that should be discussed, due to world population increase and also due to the energy potential of some of these materials. In this way, the objective of this work was to characterize recycled wood residues used as biomass for energy generation. This characterization covered the main technological parameters considering this use and the presence of contaminants that could impair the utilization of these materials as energy biomass. The results of these analysis are presented in the chapters two, three and four of this work. Chapter two evaluated energy potential of biomasses commercialized in three recycling companies at São Paulo State. Seven materials that were available for sale were sampled: three samples of recycled wood material, two samples of eucalyptus chips and two samples of pallet. Results show that, although all the samples have presented similar size distribution, the 3 recycled wood chips presented the larger medium sizes. It was observed that the energetic biomasses are very heterogeneous. In this way, the quality and variability controls of materials used as biomass for energy generation is a challenge for those who commercializes and for those who buy this kind of material. Chapter three evaluated the variation over time of some of the main quality parameters of biomass used for power generation. For this, four materials available for sale in two reprocessing companies in the state of São Paulo were sampled in three different periods, two recycled wood materials, a sample of pallet chips and a sample of eucalyptus chips. The results show that the pallet chips were the least subject to moisture content variation, while the highest variation for this parameter was observed for eucalyptus chips. As for the ash content was very variable among the collections, the influence of contaminants external to the composition of the evaluated materials was highlighted. In this way, it is possible to conclude that there is a need for improvement in the control of some of the main technological properties of biomass. Chapter four evaluated the presence of contaminants in different wood residues commercialized for energy use in the state of São Paulo. Seven materials available for this use were sampled: six samples of recycled chips and one sample of eucalyptus chips. To evaluate the concentration of contaminants potentially harmful to the equipment intended for the burning of these materials, some of the main parameters correlated to their wear were evaluated. The results show that the recycled chips are, in most cases, more aggressive to the equipment compared to eucalyptus chips. In addition, recycled chips sold by Company A presented lower contamination rates compared to Company B materials. It was possible to conclude that there is a high variation in contaminants concentration on the evaluated recycled biomasses. Therefore, a careful selection and quality control is recommended for the used materials, especially recycled wood chips.

Keywords: Biomass, Residues reuse, Energy generation

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### Resumo

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais temas relacionados à geração de energia a partir de biomassa e ao reaproveitamento de materiais para este fim. O Brasil se destaca por apresentar grande proporção de energia proveniente de fontes renováveis em sua matriz energética, sendo a biomassa uma fonte de energia com grande potencial de crescimento nos próximos anos, com destaque para aquela obtida diretamente das florestas (biomassa florestal) e as existentes nos resíduos sólidos urbanos. A biomassa florestal pode ser utilizada como fonte de energia limpa e renovável, como é o caso dos resíduos florestais, originados desde o corte da árvore até o processamento da madeira. Já a geração de resíduos sólidos urbanos vem aumentando com o crescimento da população mundial, o que faz com que cada vez mais seja necessária uma destinação apropriada para estes materiais. Parte destes materiais é constituída por componentes madeireiros, que podem ser reciclados ou reaproveitados para a geração de energia. Por esse motivo, empresas recicladoras, também chamadas de reprocessadoras, vêm ganhando importância, trabalhando com paletes, madeira de construção civil e demolição, mobiliário, resíduos de poda urbana, etc, antes considerados descartáveis. Transformados em cavacos, esses materiais apresentam grande heterogeneidade entre si e, desta forma, o conhecimento mais profundo de suas características é fundamental para se conduzir seu aproveitamento de forma mais eficiente na sua destinação para finalidades energéticas.

Palavras-chave: Energia renovável, Geração de energia, Biomassa, Reaproveitamento de resíduos

### Abstract

The objective of this chapter is presents the main topics related to energy generation from biomass and to the reutilization of materials for this purpose. Brazil stands out presenting a large proportion of energy generated from renewable sources in its energy matrix, while biomass is an energy source with great growth potential in the next years, mainly forest biomass and solid urban residues. Forest biomass can be used as clean and renewable energy source, mainly the utilization of forest residues, from trees' harvesting to wood processing. From forest biomass is possible to generate thermic energy, electric energy or both, from direct combustion, gasification, briquette production or pyrolysis. The solid urban residues generation is growing with world population growth, and as result, an appropriate destination for these materials is even more necessary. A portion of these materials is wood residues, which can be recycled to energy generation. For this reason, recycling companies are being more important, supplying materials as pallets, civil construction and demolition wood, furniture, urban pruning and wood mixed with other residues, which were disposable in the past, as chips to energy generation. These materials present high heterogeneity and, in this way, the deeper knowledge of its characteristics is very important to the better use of these residues.

Keywords: Renewable energy, Energy generation, Biomass, Residues recycling

### Biomassa e geração de energia

O Brasil se destaca no cenário mundial por apresentar, em sua matriz energética, alta proporção de energia proveniente de fontes renováveis. Cerca de 45,3% de toda energia elétrica gerada no país é deste tipo de fonte, proporção bem acima da observada no restante do mundo, que apresenta em média 13,7% de sua energia gerada a partir de fontes renováveis. Os destaques dessas fontes renováveis que compõem a matriz energética brasileira são: 17,4% biomassa de cana-

de-açúcar, 12,6% hidráulica, 8,4% lenha e carvão vegetal e 6,9% lixívia e outras renováveis (BEN, 2019).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), biomassa é uma das fontes renováveis para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e, conseqüentemente, redução da dependência dos combustíveis fósseis.

A ANEEL define biomassa como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a origem, pode ser classificada em: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos). Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia (ANEEL, 2008).

A biomassa é uma fonte de energia limpa e segura, por utilizar fontes como madeira e seus resíduos, bagaço de cana, licor negro (nas indústrias de papel e celulose), capim elefante, biogás e as chamadas florestas energéticas, para geração de energia térmica e termelétrica (PINCELLI, 2011).

De acordo com Couto et al. (2000), a biomassa florestal possui características que permitem a sua utilização como fonte alternativa de energia, seja pela queima direta da madeira, como carvão vegetal, aproveitamento de resíduos da exploração e aproveitamento de óleos essenciais, alcatrão e licor pirolenhoso. Nos dias atuais, a utilização da biomassa está normalmente relacionada com os produtos secundários dela obtidos, como, por exemplo, o carvão vegetal e a lenha. Recentemente, tem-se consolidado, também, o uso de cavacos (VALVERDE et al., 2012).

A importância da madeira como fonte de energia limpa fica evidente quando analisados os valores citados por Floresta Colonial (2000), de que um estéreo de madeira seca, aproximadamente 450 kg, é equivalente a 210 litros de óleo combustível que, por sua vez, equivalem a 282 kg de carvão mineral quanto ao poder calorífico produzido, mas esses valores não são fixos, pois dependem também de fatores como composição química, granulometria, massa específica básica e teor de umidade da madeira, além das características das instalações da queima (GATTO et al., 2003).

Algumas características da biomassa são de grande importância pois determinarão sua viabilidade para uso como combustível. Dentre as propriedades energéticas importantes estão a composição química imediata e o 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 do teor de umidade, granulometria, densidade à granel, entre outros (SANTOS, 2012).

A biomassa reprocessada é aquela resultante da picagem de resíduos madeireiros de diversas origens e consequente transformação em cavacos. Esse material é chamado de cavaco reprocessado, podendo ser composto por um único material, como no caso de cavacos de paletes, ou por diversos componentes madeireiros, como é o caso do cavaco de resíduos madeireiros, composto por inúmeros materiais, como resíduos de construção civil, resíduos de podas de árvores, móveis descartados, entre outros.

O cavaco reprocessado é caracterizado pela variabilidade de componentes, uma vez que esse material é uma mistura de vários tipos de resíduos madeireiros, possuindo grandes flutuações de qualidade e desempenho visando à geração de energia, principalmente através da queima em caldeiras.

Existem alguns problemas comuns causados por uso de biomassa com características inadequada em caldeiras, como bloqueios na linha de alimentação, conduzindo a falhas do sistema. As dimensões e forma das partículas, seu teor de umidade e densidade à granel, bem como a compressibilidade e a compactação da biomassa, são algumas das características mais relevantes. Além dessas propriedades, existem outros fatores que interferem no processo, como a presença de materiais externos como pedras e metais. Tais materiais devem ser eliminados, uma vez que causam desgastes, podendo causar danos aos equipamentos. Atualmente existem técnicas para essa remoção, como a utilização de ímãs para a retirada de materiais ferrosos (DAI, et al., 2012).

Ainda de acordo com Dai et al. (2012), os bloqueios na alimentação da caldeira estão fortemente ligados à forma irregular da biomassa, bem como à sua distribuição. Cada tipo de caldeira apresenta diferentes requisitos no tamanho do combustível. Assim, partículas com dimensões homogêneas conduzem a um melhor desempenho.

Dentre os fatores que afetam o bom desempenho de sistemas de conversão termoquímica, o conteúdo das cinzas dos materiais madeireiros é importante pois pode afetar todo o sistema de conversão de biomassa, a queima, a fornalha, a caldeira e mesmo a operação da instalação (SANTOS, 2009).

Portanto, o estudo das propriedades físicas e químicas da biomassa é fundamental, uma vez que influenciam de forma decisiva o desempenho das caldeiras e demais equipamentos envolvidos.

### **Biomassa florestal**

A biomassa pode ter diversas origens: vegetais lenhosos e não-lenhosos, resíduos orgânicos (agrícolas, florestais, urbanos e industriais) e biofluidos, como óleos vegetais. Estas diversas fontes podem ser abrangidas no aproveitamento energético da biomassa (CORTEZ et al., 2008).

De acordo com a Portaria Normativa 302/84 do IBDF (atualmente IBAMA) resíduos florestais são definidos como sobras de material, que não o objetivo prioritário da atividade, resultante da alteração sofrida pela matéria-prima florestal quando submetida à ação exterior através de processos mecânicos, físicos e/ou químicos (DO CANTO, 2009).

Já Nolasco (2000), define resíduo florestal como todo e qualquer material resultante da colheita ou do processamento da madeira e/ou outros recursos florestais, que permanece sem utilização definitiva ao longo do processo, por limitações tecnológicas e de mercados, sendo descartado durante a produção.

A biomassa florestal é considerada um importante insumo energético, sendo uma promissora fonte energética alternativa aos combustíveis fósseis em função de suas qualidades ambientais, caráter renovável, sequestradora de gás carbônico atmosférico e armazenadora de carbono durante o seu período de crescimento (FOELKEL, 2016).

Na indústria, 63,2% dos resíduos florestais são destinados à geração de energia por meio da queima em caldeiras, que geram vapor utilizado para a geração de energia elétrica para o processo produtivo, reduzindo a utilização de combustíveis fósseis. Outros 29,4% dos resíduos são reutilizados como matéria-prima por outras empresas do setor (IBÁ, 2019).

O aproveitamento energético dos resíduos de madeira pode gerar energia térmica, elétrica ou ambas (co-geração), através de sua combustão direta ou incineração, da gaseificação, briquetagem ou peletização e pirólise (MMA, 2009).

### **Resíduos sólidos urbanos**

De acordo com dados estatísticos da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), no ano de 2015 o contingente populacional mundial alcançou o montante de 7,3 bilhões de pessoas. A previsão para 2050 é que a população alcance 9,3 bilhões de habitantes e destes, 68% deverão habitar em áreas urbanas (FAO, 2015).

De acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no Brasil ocorre um crescimento semelhante. Em 1970 o contingente populacional era de 96 milhões de habitantes, sendo que 55% viviam em áreas rurais e, em 2015 a população era de 203 milhões, 85% em áreas

urbanas. De acordo com estudos do IBGE, a estimativa é a de que a população brasileira atinja em 2030 cerca de 223 milhões de pessoas (IBGE, 2016).

Algumas consequências do aumento populacional são a elevação do consumo de energia e o aumento da geração de resíduos. Em relação aos rejeitos sólidos urbanos (RSU), com o crescimento da população mundial, houve também uma forte tendência de aumento da geração deste tipo de resíduo. A geração mundial está estimada em cerca de 1,3 bilhão t/ano, e prevê-se que esse número alcance cerca de 2,2 bilhões t/ano até 2025 (Andrade, 2016).

No Brasil, por exemplo, a taxa de crescimento no consumo de energia entre os anos de 2005 e 2014 foi de 3,5% (STCP, 2015). As projeções indicam que a demanda por este insumo deve dobrar até 2030 e que as reservas de combustíveis não renováveis, como gás natural e petróleo, se esgotarão nos próximos 100 anos (IBÁ, 2017).

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a geração de RSU no Brasil em 2014 foi de 78.583.405 toneladas. Deste montante, 58,4 % tiveram destinação adequada e seguiram para aterros, e os 41,6% restantes, ou seja, mais de 80 mil toneladas diárias, foram encaminhadas para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2014).

Os resíduos sólidos, culturalmente concebidos como rejeitos e até passivos ambientais, têm gerado preocupações cada vez mais urgentes quanto à sua geração e destinação. No caso do Brasil, um avanço considerável é a homologação da Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (REIS et al., 2017).

### **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**

A Lei nº 12.305/101 de 02 de agosto de 2010, que é regulamentada pelo decreto nº 7.404/10, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), relativa à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, uniformizando o comportamento e a atuação das partes interessadas no aproveitamento econômico dos resíduos ou na destinação ambientalmente correta dos rejeitos gerados no ciclo produtivo. Dispõe sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos.

De acordo com a PNRS, resíduos sólidos podem ser definidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder.

Ainda de acordo com a Lei, a responsabilidade pelo lixo passa a ser compartilhada entre os cidadãos, empresas, prefeituras e os governos estaduais e federal. A Lei também explicita a

preocupação com todo o gerenciamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (LOPES et al., 2017).

Independentemente da solução técnica adotada por essas empresas, ela deve obedecer a ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos estabelecida:

“Lei 12.305/2010 Art. 9º: Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”.

Uma das questões mais importantes no gerenciamento de resíduos é o aproveitamento de materiais. Uma dessas práticas consiste na reutilização dos resíduos da madeira, processo de grande importância para questões ambientais, uma vez que integra a chamada “estratégia dos 3Rs” (reduzir, reutilizar, reciclar). A questão do reuso e redução na geração de resíduos constitui-se em uma das atividades-chaves para enfrentar o desafio representado pelo destino final dos resíduos sólidos.

Dessa forma, alguns resíduos sólidos, como os resíduos madeireiros, são materiais que possuem valor econômico e podem ser reciclados ou reaproveitados para a geração de energia.

Além do potencial de aproveitamento de todo resíduo madeireiro proveniente do Sistema Agroindustrial da Madeira, Andrade (2016) em seu estudo salienta uma outra oportunidade de geração de energia a partir do aproveitamento de resíduo. O autor destaca que as oportunidades relativas ao aproveitamento energético de RSU no Brasil ainda não foram percebidas, provavelmente em função do modelo historicamente adotado de aproveitamento de seus rios para obtenção de energia por meio de hidrelétricas. Esse modelo embora seja responsável pela maior parte da energia elétrica gerada no país, resulta em riscos no desabastecimento à medida que está fortemente dependente de questões climáticas.

Dessa maneira, pode-se dizer que os materiais à base de madeira que compõem o RSU, como paletes, madeira de construção civil e demolição, mobiliário, resíduos de poda urbana e as madeiras comumente misturadas aos resíduos sólidos urbanos, apresentam-se como importante matéria-prima quando o objetivo é o aproveitamento energético, principalmente ao seu caráter renovável e seu teor de umidade relativamente baixo.

É nesse contexto que as empresas recicladoras de produtos à base de madeira ganham importância. Essas empresas geralmente alugam contêiner para o descarte de material madeireiro e recebem, reprocessam e disponibilizam esse material para venda (Figura 1.1). Essa situação é uma boa alternativa para os segmentos que precisam descartar seus resíduos madeireiros, visto que a

disposição desses materiais em aterro não é uma opção adequada e, além disso, esse resíduo retorna ao sistema como fonte geradora de energia.

Esse material reciclado é normalmente disponibilizado para venda na forma de cavacos, com diferentes dimensões e características. O cavaco de madeira reciclada é um material madeireiro reprocessado por picadores industriais ou agrícolas que pode incluir resíduos da industrialização da madeira como: madeira maciça, compensado, aglomerado, MDF (Medium Density Fiberboard), OSB (Oriented Strand Board), chapa, entre outros, provenientes de indústrias ou mesmo de origem urbana.



Figura 1.1 – Material madeireiro recebido por uma empresa recicladora

Fonte: Arquivo pessoal autora

A valorização energética dessa biomassa possui grandes vantagens, tais como: contribuição para mudança na matriz energética e redução na emissão dos gases causadores do efeito estufa em comparação à queima de combustíveis fósseis, menor dependência dos combustíveis fósseis, geração de renda, entre outros.

Um dos desafios para um aproveitamento mais eficiente desse material é conhecer mais profundamente suas características voltadas ao uso energético e a variabilidade das mesmas. Com melhor conhecimento, seria possível a utilização mais adequada desse material ou mesmo traçar um plano de ação para melhor aproveitamento desses resíduos madeireiros.

Diante do potencial energético dos resíduos madeireiros florestais e dos resíduos sólidos urbanos, sua alta variabilidade de componentes e a escassez de dados relativos a caracterização dessa biomassa, este trabalho teve o objetivo de caracterizar e avaliar o potencial energético dessa biomassa em uma abordagem junto a empresas reprocessadoras de biomassa madeireira.

Os objetivos específicos foram:



- Caracterizar os resíduos madeireiros reprocessados de acordo com as principais análises que determinem a sua aptidão para o uso energético: teor de umidade, densidade à granel e aparente, granulometria, poder calorífico e análise imediata (carbono fixo, cinzas e voláteis);
- Avaliar a variação das características dos cavacos reprocessados em diferentes períodos do ano;
- Analisar a presença de contaminantes nas biomassas com potencial para causar danos aos equipamentos envolvidos ou mesmo diminuir a eficiência da conversão de calor;
- Recomendar ações que possam contribuir para com a melhoria da oferta de resíduos madeiros reprocessados para uso energético.

Para isso, este trabalho foi dividido em mais três capítulos, descritos abaixo:

Capítulo 2: Caracterização energética das biomassas comercializadas por empresas reprocessadoras. O objetivo neste capítulo foi caracterizar as biomassas reprocessadas quanto ao seu potencial energético.

Capítulo 3: Variação das características energéticas de resíduos madeireiros ao longo do ano. O objetivo neste foi avaliar a variação dos principais parâmetros de qualidade da biomassa para uso energético em diferentes períodos.

Capítulo 4: Presença de contaminantes nas cinzas de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético. Nesse capítulo o intuito foi avaliar a presença de alguns dos principais contaminantes da biomassa que podem impactar o seu uso energético.

## Referências

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.abrelpe.org.br/panorama\\_envio.cfm?ano=2014](http://www.abrelpe.org.br/panorama_envio.cfm?ano=2014)>. Acesso em 15 out. de 2019.

ANDRADE, C. R. Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016. 88 p.

ANEEL, 2008, Atlas de energia elétrica do Brasil. 3 ed. Brasília, ANEEL.

BEN - BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - Relatório Final. Balanço Energético Nacional 2019: ano base 2018. Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Disponível em:<[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadoabertos?publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico\\_494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadoabertos?publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico_494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf)>. Acesso em 16 out. de 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 3 ago. 2010.

- BOA, A.C.; GONÇALVES, F.G.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ARANTES, M. D. C. Resíduos madeireiros de eucalipto colados com resina ureia formaldeído à temperatura ambiente. *Scientia Forestalis*, v.42, n.102, p.279-288, jun 2014.
- CORTEZ, L.A.B; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. (org). “Biomassa para energia”. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2008.
- COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.
- DAI, J.; H, CUI.; J. R. GRACE. Biomass feeding for thermochemical reactors. pp. 716-736. Elsevier Science. 2012.
- DO CANTO, J. L. Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia. Viçosa, MG: [s.n.], 2009.
- FAO. Global population dynamics. Disponível em: <[http://faostat3.fao.org/browse/O/\\*/E](http://faostat3.fao.org/browse/O/*/E)>. Acesso em 05/03/2017.
- FLORESTA COLONIAL. Convênio UFSM/BOKU. Produção de madeira para fins energéticos. Santa Maria, 2000.
- FOELKEL, C. Utilização da Biomassa do Eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. *Eucalyptus Online Book and Newsletter*, capítulo 43, 2016. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em 05/03/2017.
- GATTO, D. A., SANTINI, E. J., HASELEIN, C. R. e DURLO, M. A. Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do rio grande do sul. *Ciência Florestal*, v. 13, n. 2, p. 7-16. 2003.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2017. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em 05/08/2018.
- IBÁ, Indústria Brasileira de Árvores. Relatório 2019. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em 19/03/2020.
- IBGE. Projeção da população. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em: 12/04/2017.
- JANK, M. S. et al. Introdução ao Agribusiness. In: *Economia e Administração Agroindustrial*. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. p. 141-167.
- LOPES, G. DE A. Uso energético de resíduos madeireiros em um pólo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo. 2012. 101 p. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, 2012.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Proposta de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para fins energéticos. 40 p. 2009. Disponível em < [http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033501.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033501.pdf). Acesso em 01/07/2018.
- NOLASCO, A.M. Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta – *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas. 2000. 171 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- PINCELLI, A. L. P. S. M. Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética. 2011. 127 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- REIS D., REIS F. e LOPES F.H.P. Política nacional de resíduos sólidos (Lei nº 12.305/2010) e educação ambiental. v. 14, n. 1, pp.99-111 jan./jun. 2017.
- SANTOS, J. R. S. Dos. 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 Piracicaba. 2012.
- SANTOS, P. Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa, adaptação a caldeira pré-existente. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Mestrado em Engenharia Mecânica, Portugal. 2009.
- STCP. Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil. Curitiba/PR, 2015. Disponível em:< <https://www.inpbrasil.org/wp-content/uploads/2015/11/Oportunidades-Para-Florestas-Energ%C3%A9ticas-Na-Gera%C3%A7%C3%A3o-De-Energia-No-Brasil-1.pdf>>. Acesso em 25/05/2017.
- VALVERDE, S.R.; MAFRA, J.W.A.; MIRANDA, M. A., SOUZA, C.S.; VASCONCELOS, D. C. Silvicultura brasileira- oportunidades e desafios da economia verde, 2012. Disponível em: <http://fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-549.pdf>. Acesso em: 12/fev/2018.

## **CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DAS BIOMASSAS COMERCIALIZADAS POR EMPRESAS REPROCESSADORAS**

### **Resumo**

O objetivo deste capítulo é avaliar o potencial energético de biomassas comercializadas em empresas reprocessadoras do estado de São Paulo. Para isso, foram selecionadas três empresas, sendo amostrados sete materiais disponíveis para comercialização: três amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados, duas amostras de cavacos de eucalipto e duas amostras de cavacos de paletes. As amostras foram caracterizadas tecnologicamente, considerando os principais parâmetros de qualidade para materiais comercializados como biomassa energética. Os resultados mostram que, apesar das amostras terem apresentado granulometria semelhante entre si, os três cavacos de resíduos madeireiros reprocessados apresentaram os maiores tamanhos médios. Com relação ao teor de umidade, os cavacos de eucalipto foram os que apresentaram os maiores valores, enquanto os cavacos de paletes foram os materiais mais secos avaliados. Não foi observada uma tendência clara para os demais parâmetros, sendo que uma das amostras de eucalipto foi o material mais denso avaliado, enquanto um dos materiais reprocessados foi o que apresentou as menores densidades. O maior poder calorífico foi encontrado para um dos materiais de resíduos madeireiros reprocessados; já o menor valor deste parâmetro foi observado para outra amostra deste material. Observou-se que as biomassas energéticas são extremamente heterogêneas entre si, o que pode prejudicar o processamento destes materiais. Dessa forma, o controle da qualidade e da variabilidade das características de materiais utilizados como biomassa para a geração de energia é um desafio tanto para aqueles que comercializam quanto para aqueles que adquirem este tipo de material.

Palavras-chave: Potencial energético, Caracterização tecnológica, Biomassa energética

### **Abstract**

The objective of this chapter is to evaluate the energetic potential of commercialized biomass through recycling companies in São Paulo state. For that, 3 companies were selected and 7 materials available for purchase: 3 samples of recycled chips, 2 samples of eucalypt chips and 2 samples of pallet chips. These samples were technologically characterized considering the main quality parameters for materials that are used as energetic biomass. The results show that, although all the samples have presented similar granulometry, the 3 recycled chips presented the larger medium sizes. Regarding moisture content, eucalypt chips presented the highest values for this parameter, while pallet chips were the driest materials analyzed. A clear tendency was not observed for the other parameters, as one of the eucalypt samples was the densest material evaluated, while one of recycled chips presented the lowest densities. The highest heating value was found for one of the recycled chips; the lowest value for this parameter was found in another recycled chip. It was observed that the energetic biomasses are very heterogeneous, which can impair the processing of these materials. In this way, the quality and variability controls of materials used as biomass for energy generation is a challenge for those who commercializes and for those who buy this kind of material.

Keywords: Energetic potential, Technological characterization, Energetic biomass

## Introdução

O uso da biomassa madeireira reprocessada para geração de energia é uma forma de utilizar resíduos provenientes do setor industrial e urbano como matéria-prima para geração de energia e, também, uma maneira desses setores destinarem de maneira ambientalmente correta seus resíduos de produção.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, a principal origem dos resíduos sólidos urbanos são os setores da construção civil, de arborização urbana e de embalagens defeituosas (MMA, 2009). Além disso também fazem parte as sobras de madeira de reformas residenciais, descarte de móveis, de caixas de madeira e paletes (LYON, BOND, 2014).

A Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil, de forma geral, propõe a redução dos resíduos gerados e incentiva a reciclagem e reaproveitamento dos mesmos. Dessa forma, pode-se dizer que a lei estabelece um campo de oportunidades relacionadas ao aproveitamento energético de materiais que seriam descartados em aterros.

Na indústria, 65,8% dos resíduos são destinados para geração de energia, por meio da queima em caldeiras que geram vapor e, eventualmente, energia elétrica para o processo produtivo, eliminando a utilização de combustível fóssil (IBÁ, 2017).

A utilização desses resíduos na produção de energia é uma alternativa para agregar valor e reduzir os impactos causados pelos mesmos (QUIRINO 2003). Além disso, a valorização energética dessa biomassa possui grandes vantagens, tais como: contribuição para mudança na matriz energética e redução na emissão dos gases causadores do efeito estufa, redução no volume de resíduos depositados em aterros sanitários, geração de renda, entre outros.

As empresas ditas recicladoras ou reprocessadoras de resíduos de biomassa madeireira ganham maior importância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, pois elas representam uma alternativa de destinação para resíduos do setor industrial e até mesmo urbano, uma vez que elas recebem os materiais que seriam descartados por esses setores, reprocessando-os e comercializando-os para uso energético.

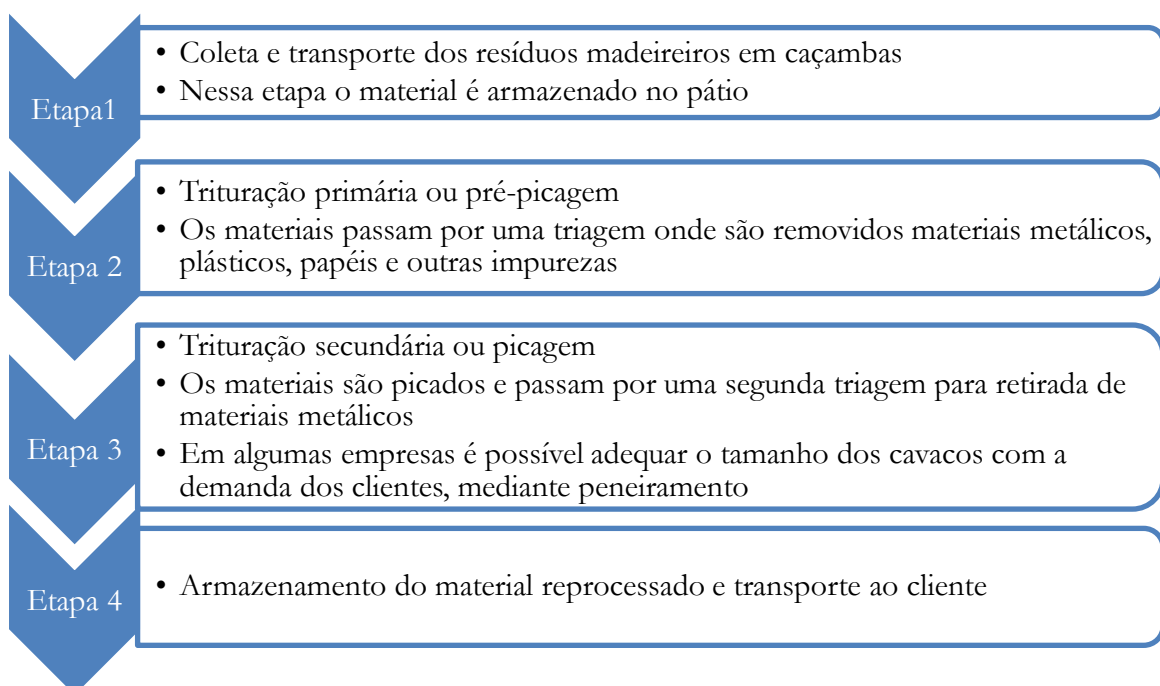
Os resíduos madeireiros gerados no ambiente urbano possuem caráter renovável e potencial para uso energético. Os autores Atkins e Dorovan (1996) usam o termo “resíduos de madeira urbana” para referir-se aos paletes, madeiras de construção e demolição, e madeiras que são comumente misturadas com outros resíduos sólidos urbanos. Andrade (2016) estudou os resíduos madeireiros urbanos e também cita madeiras oriundas de mobiliário, os painéis reconstituídos, e podas de árvores. De acordo com esses autores, algumas das características comuns desses materiais descartados são o teor de umidade relativamente baixo, geralmente entre

7 a 20%, e a probabilidade de contaminação por aditivos, tintas, colas, concreto, argamassa, solo, gesso, papel, papelão, metais, entre outros.

Alguns critérios são importantes para uso da madeira para geração de energia. O teor de umidade, por exemplo, não deve ser superior a 20%, uma vez que isso reduz a capacidade de calor de combustão. A presença da água reduz o poder calorífico pois parte da energia liberada será usada para vaporização da mesma (LOPES, 2012). A composição química, o poder calorífico e teor de umidade da biomassa podem sofrer variações em relação ao tempo de estocagem (BRAND e MUNIZ, 2012; MORAIS, 2018). A viabilidade técnica e econômica do uso de materiais madeireiros descartados para uso energético tem relação direta com a umidade, poder calorífico e cinzas (FARAGE et al., 2013).

O crescente desenvolvimento de pesquisas sobre parâmetros da madeira que exerçam influência nas suas propriedades combustíveis tende a alcançar o máximo de aproveitamento da energia gerada. Os ensaios do poder calorífico, umidade, densidade e análise imediata são considerados como as propriedades mais importantes da madeira para sua utilização como combustível (BRITO e BARRICHELO, 1978; PINCELLI, 2011; LOPES, 2012, ANDRADE, 2016).

As empresas reprocessadoras recebem diariamente toneladas de resíduos madeireiros provenientes, por exemplo, da construção civil e de outros setores do município que foram coletados pelo serviço de aluguel de caçambas que essas empresas oferecem. O fluxograma abaixo exemplifica o funcionamento de uma empresa recicladora.



Diante do exposto, sabe-se que os componentes madeireiros que podem estar presentes nos cavacos reprocessados são variáveis e a diversidade pode interferir em propriedades importantes para o uso energético, e as informações sobre esse tipo de material são escassas na literatura. Assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar o potencial energético das biomassas disponíveis para venda em três empresas reprocessadoras de material madeireiro.

## **Materiais e Métodos**

### **Materiais**

Os materiais de estudo foram coletados em três empresas do estado de São Paulo durante o mês de julho de 2017. As amostras foram coletadas de acordo com a norma brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004). Após a coleta, os materiais foram armazenados em sacos plásticos grossos, vedados, identificados, transportados e armazenados no Laboratório de Química, Celulose e Energia da ESALQ-USP para execução das análises.

Foram coletadas amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados, cavacos de paletes e cavacos de eucalipto provenientes de plantios florestais. Esses materiais estavam disponíveis para comercialização no momento da visita às empresas selecionadas. O eucalipto plantado era revendido pelas empresas, nenhuma delas produzia o mesmo para venda.

A Tabela 2.1 apresenta os materiais coletados de cada empresa e a localização das mesmas.

Tabela 2.1 – Materiais utilizados e siglas

<b>Sigla</b>	<b>Material</b>	<b>Empresa</b>	<b>Município</b>
CAV A	Cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	A	Sorocaba-SP
Euca A	Cavaco de eucalipto	A	Sorocaba-SP
Paleta A	Cavaco de paleta	A	Sorocaba-SP
CAV B	Cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	B	Embu das Artes-SP
CAV C	Cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	C	Mogi Guaçu-SP
Euca C	Cavaco de eucalipto	C	Mogi Guaçu-SP
Paleta C	Cavaco de paleta	C	Mogi Guaçu-SP

## Métodos

### Avaliação visual da composição da biomassa

Os cavacos de resíduos madeireiros reprocessados são compostos por uma grande gama de componentes madeireiros. Sua composição pode incluir resíduos madeireiros oriundos de construção civil, painéis, restos de móveis, resíduos de poda urbana, entre outros. Em função disso, concluiu-se que seria importante identificar e quantificar os componentes dessa biomassa. Assim, foi realizada uma análise visual para a identificação e quantificação dos componentes de cada material.

Uma amostra de 20 litros de cada biomassa foi separada. Os diferentes materiais identificados visualmente foram manualmente separados, sendo levados a estufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante. A proporção de cada material identificado foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$PM = \left( \frac{MSm}{MSt} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

Em que:

PM = Proporção do material na biomassa avaliada (%);

MSm = Massa seca do material (g);

MSt = Massa seca total da biomassa (g).

### Granulometria

A granulometria dos materiais foi determinada baseada na norma ABNT NBR 7402 (1982). Essa determinação utiliza um conjunto de peneiras de diferentes aberturas, a saber: 16, 8 e 4 mm de abertura da malha. Colocou-se uma quantidade conhecida de material seco em estufa na primeira peneira e agitou-se o conjunto em agitador eletromagnético, após seguir o tempo determinado pela norma, a porção que ficou retida em cada peneira, bem como no fundo, foi pesada. Então, o tamanho médio das partículas foi obtido através da seguinte equação:

$$TM = [B(a - c) + C(b - d) + \dots + L(k - m) + 100 \times 1] \cdot 0,005 \quad (2.2)$$

Em que:

TM = tamanho médio das partículas (mm);

A, B, C, D...L, M = percentagens acumuladas (%);

a, b, c, d...l, m = abertura das malhas das peneiras (mm).



## Teor de Umidade

Os valores de umidade base úmida foram determinados nos resíduos logo após a coleta e transporte do material, sendo que a norma utilizada foi a NBR 14929 (ABNT, 2003). O cálculo é feito através da diferença de massa entre o material úmido, como recebido da amostragem, e após secagem em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até massa constante, utilizando-se a equação abaixo:

$$U = \left( \frac{MU-MS}{MU} \right) \times 100 \quad (2.3)$$

Na qual:

U = Umidade da biomassa (%);

MU = Massa do material úmido (kg);

MS = Massa do material seco (kg).

## Densidade à granel e densidade aparente

O cálculo da densidade à granel foi baseado na norma da ABNT NBR 6922 (1981). Para tanto, o material foi colocado em um recipiente de dimensões, massa e volume conhecidos. Após, foi determinada a massa do conjunto. Para o cálculo final da massa da amostra foi descontado o valor da tara do recipiente. O cálculo da densidade à granel foi realizado conforme equação abaixo:

$$DG = \frac{MU}{VU} \quad (2.4)$$

Em que:

DG = densidade à granel ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

MU = massa da amostra úmida (g);

VU = volume úmido ( $\text{cm}^3$ ).

Para a realização dessa análise o material foi utilizado na umidade em que foi coletado.

Já para o cálculo da densidade aparente, foi considerada a massa seca de cada material, ou seja, a umidade foi descontada. Assim, o cálculo da densidade aparente foi realizado conforme a equação abaixo:

$$Da = \frac{Ms}{Va} \quad (2.5)$$

Em que:

Da= densidade aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

Ms= massa seca dos cavacos (g);

Va= volume aparente dos cavacos secos ( $\text{cm}^3$ ).

### **Poder calorífico superior**

Para a realização dessa análise, o material foi moído em moinho, peneirado e transformado em pastilhas de aproximadamente 1 grama. Logo após foram acondicionadas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até peso constante. O poder calorífico superior foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica modelo Ika C200 de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

### **Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo**

A análise imediata foi realizada para determinação dos materiais voláteis, cinzas e carbono fixo segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

### **Análise Estatística**

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado e todas as análises foram feitas com 5 repetições. Para análise dos dados foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas através do software Minitab 17 Statistical Software.

## **Resultados e Discussão**

### **Avaliação visual da composição da biomassa**

Para uma melhor caracterização do material estudado e identificação de seus componentes, foi realizada uma análise visual das biomassas utilizadas no trabalho. Segundo informações dos proprietários das empresas, as três apresentam uma alta rotatividade de material, foi relatado que o material fica, no máximo, dois dias no pátio. Assim que é picado, o material permanece estocado durante um período máximo de dois dias no pátio, mas o mais comum é que seja transportado no mesmo dia. Diante desse processo produtivo, a composição dessas biomassas vai depender muito do momento em que a coleta é realizada. Embora os componentes geralmente sejam os mesmos, suas frações podem variar de acordo com o material que a empresa recebe para

o reprocessamento. Dessa forma, os resultados obtidos nesse trabalho apresentam um cenário do momento da coleta. A figura 2.1 exemplifica os materiais coletados na empresa C: cavaco de resíduos madeireiros reprocessados, cavaco de palete e cavaco de eucalipto. Já a figura 2.2 apresenta os diferentes materiais encontrados nos cavacos de resíduos madeireiro reprocessados.



Figura 2.1 – Exemplo de material coletado na empresa C- (1)cavaco de resíduos madeireiros reprocessados/CAV C, (2)cavaco de palete/Palette C e (3)cavaco de eucalipto/Euca C



Figura 2.2 – Exemplo de separação de material reprocessado - (1)madeira sólida (2)casca (3)compensado (4)MDF (5)aglomerado

Os cavacos de resíduos madeireiros reprocessados, CAV A, CAV B e CAV C, apresentaram os seguintes componentes: madeira sólida, casca, compensado, MDF e aglomerado. Tais componentes foram separados manualmente e pesados individualmente para que a proporção de cada um em todos os materiais avaliados fosse calculada. A tabela 2.2 apresenta esses resultados, considerando as massas secas de cada fração.

Tabela 2.2 – Análise visual dos componentes de cada material estudado

<b>Material</b>	<b>Madeira sólida (%)</b>	<b>Casca (%)</b>	<b>Compensado (%)</b>	<b>Painéis* (%)</b>	<b>Aglomerado (%)</b>	<b>Total (%)</b>
CAV A	34,6	-	12,2	18,8	34,4	100
Euca A	77,2	22,8	-	-	-	100
Paleta A	100,0	-	-	-	-	100
CAV B	51,1	-	11,7	26,5	10,7	100
CAV C	62,5	5,4	8,3	8,5	15,3	100
Euca C	79,5	20,5	-	-	-	100
Paleta C	100,0	-	-	-	-	100

\*Painéis: MDF, HDF, OSB e chapa dura

Pode-se observar que as amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados das três empresas, CAV A, CAV B e CAV C apresentaram como principal componente a madeira sólida, com 34,6%, 51,1%, e 62,5% da massa total das amostras, respectivamente. Já como segundo componente principal, o CAV A e o CAV C apresentaram o aglomerado. Já o CAV B apresentou o MDF.

Como era esperado, as amostras de cavacos de eucalipto possuem apenas dois componentes: madeira sólida e casca. Enquanto o material Euca A apresentou 77,2% de madeira sólida e 22,8% de casca, o Euca C apresenta 79,5% e 20,5% desses componentes, respectivamente.

Os cavacos de paletes coletados não possuíam outro componente misturado. Vale ressaltar que os materiais Paleta A e Paleta C, também considerados materiais reprocessados, são picados e vendidos separadamente nas duas empresas que tinham esse material pois, segundo elas, essa é uma demanda dos clientes.

### **Análise da qualidade dos materiais**

A análise da qualidade dos materiais considerou seus parâmetros tecnológicos, listados a seguir: granulometria, umidade, densidade a granel, densidade aparente, poder calorífico superior, compostos voláteis, cinzas e carbono fixo.

### **Granulometria**

As amostras analisadas foram classificadas em conjunto de peneiras para a determinação das proporções retidas em cada fração granulométrica. Esses resultados de distribuição

granulométrica dos materiais são apresentados na figura 2.3 e tabela 2.3. A tabela 2.4 apresenta os valores do tamanho médio das partículas de cada material.

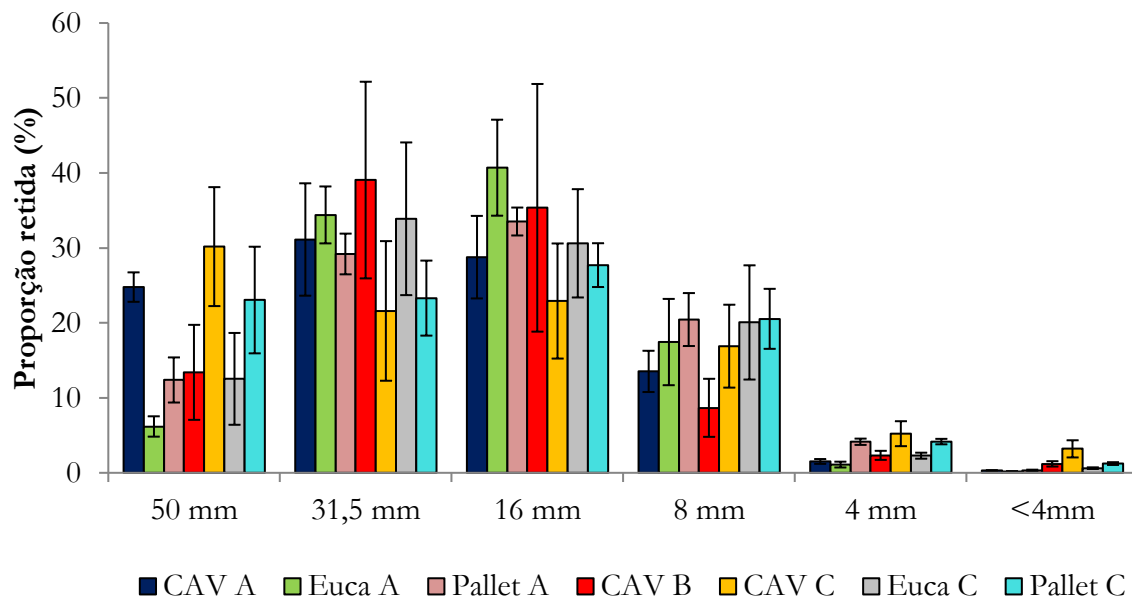


Figura 2.3 – Percentagem do material retido em função da abertura da malha das peneiras

Tabela 2.3 – Proporção dos materiais retidos em cada peneira – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material	Abertura da malha das peneiras (mm)					
	>50,0	31,5	16,0	8,0	4,0	<4,0
	-----%-----					
CAV A	24,78 a	31,12 ab	28,77 ab	13,53 ab	1,52 b	0,29 cd
Euca A	6,18 c	34,40 ab	40,70 a	17,44 ab	1,10 b	0,17 d
Paleta A	12,39 bc	29,19 ab	33,52 ab	20,44 a	4,14 a	0,31 bcd
CAV B	13,40 bc	39,05 a	35,35 ab	8,67 b	2,33 b	1,19 bc
CAV C	30,17 a	21,59 b	22,92 b	16,89 ab	5,22 a	3,20 a
Euca C	12,53 bc	33,89 ab	30,61 ab	20,06 a	2,29 b	0,62 bcd
Paleta C	23,05 ab	23,30 ab	27,71 ab	20,54 a	4,17 a	1,23 b

As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 2.4 – Tamanho médio das partículas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material	Tamanho médio das partículas (mm)	
	Média	D.P.
CAV A	31,3 a	1,73
CAV B	31,0 a b	2,94
CAV C	28,9 a b	1,46
Euca C	28,7 a b	2,19
Euca A	28,4 a b	0,94
Palete C	28,2 a b	1,03
Palete A	27,6 b	1,21

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). D.P.- Desvio Padrão

Os cavacos de resíduos madeireiros reprocessados CAV A e CAV B apresentaram maior percentual de material retido na peneira de 31,5 mm, com 31,12% e 39,05% respectivamente. Já o CAV C apresentou 30,17% do material retido na peneira de 50 mm. O Euca A apresentou 40,7% do material retido na peneira de 16 mm, já o Euca C ficou 33,89% retido na peneira de 31,5 mm. O Palete A e o Palete C tiveram a maior percentual do seu material retido na peneira de 16 mm, 33,52% e 27,71%, respectivamente.

Os resultados encontrados para a análise granulométrica indicam que as amostras avaliadas apresentam tamanhos médios de partículas muito próximos entre si, variando entre 27,6 e 31,3 mm. Os maiores tamanhos médios de partícula foram observados nos três cavacos de resíduos madeireiros reprocessados (CAV A, CAV B e CAV C), cujos tamanhos médios variaram entre 28,9 e 31,3 mm. O fato de os cavacos de resíduos madeireiros reprocessados terem apresentado tamanhos médios superiores aos demais pode estar relacionado ao tamanho desses materiais na sua origem e também à sua composição heterogênea, o que influenciou a picagem do material favorecendo a presença de partículas de maiores dimensões.

O tamanho e a forma das partículas afetam diretamente sua taxa de conversão energética durante o processo de queima. Partículas de tamanhos e formas diferentes terão diferentes superfícies de contato, nas quais ocorrem as reações químicas e, dessa maneira, a desuniformidade poderá influenciar na taxa de combustão do material. Além disso, o tamanho e forma das partículas determinam uma proporção maior ou menor de espaços vazios entre elas, interferindo na quantidade de oxigênio necessária para sua queima (CANTO, 2009; POTTIE e GUIMIER, 1985).

Pelo fato de todos os materiais avaliados terem apresentado tamanhos médios muito próximos entre si, não foram observadas grandes diferenças estatísticas nos valores apresentados. Os únicos materiais que apresentam tamanhos de partículas estatisticamente diferentes entre si foram CAV A (maior tamanho médio) e Palete A (menor tamanho médio).

## Teor de umidade

A tabela 2.5 apresenta a variação dos teores de umidade entre os tipos de materiais.

Tabela 2.5 – Teor de umidade dos materiais analisados – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

<b>Material</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>D.P. (%)</b>	<b>C.V. (%)</b>
Euca C	14,3 a	0,34	2,37
Euca A	14,0 a	0,36	2,58
CAV A	10,0 b	0,25	2,50
CAV C	9,9 b c	0,12	1,23
CAV B	9,7 b c	0,08	0,87
Palete A	9,7 b c	0,10	1,02
Palete C	9,4 c	0,21	2,25

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). D.P.- Desvio Padrão, C.V.- Coeficiente de Variação

Os teores de umidade encontrados nos materiais analisados variaram de 9,4 a 14,3%. As amostras de eucalipto plantado apresentaram os maiores teores de umidade dentre todos os materiais avaliados, 14,3% para o Euca C e 14,0% para o Euca A, sendo que a diferença de umidade destes materiais foi estatisticamente superior que as demais umidades. Os cavacos de eucalipto foram seguidos pelos cavacos reprocessados, onde CAV A apresentou 10%, CAV C, 9,9%, CAV B, 9,7%, Palete A com 9,7% e Palete C, 9,4%.

Os resultados obtidos estão de acordo com Atkins e Donovan (1996) que citam valores de umidade entre 7 e 20% para resíduos de madeira de origem urbana. Pincelli (2011) e Santos (2011), trabalharam com resíduos florestais da colheita de eucalipto e encontraram valores de umidade média de 10,4 e 11%, respectivamente. Já Farage et al. (2013), encontraram valores de umidade de 17,8% para madeira maciça, 10,3% para aglomerado e 9,8% para MDF em seu estudo com resíduos de madeira do polo moveleiro de Ubá em Minas Gerais. E ainda, Lopes (2012), também trabalhou com madeira reprocessada para uso energético e encontrou umidade média de 15,1% para mistura de resíduos de pinus e eucalipto, e de 15% para mistura de resíduos de painéis, móveis e madeira oriunda de construção civil.

O teor de umidade é muito importante pois é um dos fatores que mais exerce influência sobre o uso da madeira para energia. A presença de água representa poder calorífico negativo uma vez que parte da energia liberada é usada na sua vaporização antes da combustão. Além disso, um conteúdo de água muito variável pode dificultar o processo de combustão.

No caso de materiais reprocessados, isto é, que já tiveram algum uso anterior, como os materiais CAV A, CAV B, CAV C, Paleta A e Paleta C, os teores de umidade tendem a ser mais baixos pois eles provavelmente já estavam próximos da umidade de equilíbrio do município de coleta de cada um. Tal fato pode ser observado na tabela 2.5, que indica que os dois materiais mais úmidos são os cavacos de eucalipto provenientes de plantios, Euca A e Euca C.

O teor de umidade da madeira quando em equilíbrio com o ar atmosférico é chamado “umidade de equilíbrio da madeira”, sendo um parâmetro que depende das condições sazonais da região, como temperatura do ar e umidade relativa. Tais condições podem variar diariamente e sazonalmente, sendo que as variações diárias afetam a madeira apenas superficialmente, ao passo que as variações sazonais podem causar alterações dimensionais na madeira (CASSIANO et al., 2013; FIORESI et al., 2014).

Foelkel (2016) cita que a umidade de equilíbrio da madeira encontra-se entre 8 e 20% em base seca, ou 7,5 a 16,7% em base úmida, ou seja, todos os materiais analisados neste trabalho encontram-se próximos à umidade de equilíbrio. Com isso, pode-se concluir que, apesar do pouco tempo de estocagem destes materiais, todos apresentaram baixo teor de umidade, o que é um aspecto positivo em relação ao uso energético.

### Densidade à granel e densidade aparente

Os resultados de densidade à granel e densidade aparente são apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Densidade a granel e aparente dos materiais analisados – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material	Densidade a granel (kg/m <sup>3</sup> )		Densidade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	
	Média	D.P.	Média	D.P.
Euca A	239 a	10,5	205 a	8,85
CAV A	204 b	8,83	183 b	8,17
CAV B	185 b	12,30	167 b	11,03
Paleta A	184 b	9,64	166 b	8,68
Euca C	162 c	13,99	138 c	11,63
Paleta C	140 d	8,37	126 c d	7,44
CAV C	131 d	11,25	118 d	10,20

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). D.P.- Desvio Padrão



A maior densidade à granel foi observada para Euca A com 239 kg/m<sup>3</sup> seguida por CAV A e CAV B, com 204 e 185 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Já os menores valores para este parâmetro foram encontrados na amostra Palete C e CAV C, com 140 e 131 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Por definição, a densidade à granel de um determinado material é a massa total em um determinado volume, ou seja, é a massa de biomassa colocada aleatoriamente num recipiente até completar o seu volume. Portanto a densidade a granel está diretamente relacionada com a granulometria e com o teor de umidade (LOPES, 2012). A densidade à granel é importante para quantificar volume de materiais com formatos irregulares, uma vez que considera os espaços vazios entre as partículas e fornece dados importantes para a logística e transporte. Dessa forma, quanto maior a densidade à granel, menor os espaços entre as partículas, conseqüentemente, maior a massa contida num recipiente de volume fixo.

Dessa forma, conforme já apresentado na tabela 2.3, o CAV C apresenta uma distribuição bastante heterogênea, indicando que os cavacos são de tamanhos muito variáveis e, conseqüentemente, há muitos espaços vazios entre eles, fato que pode ter contribuído para esse material ter apresentado a menor densidade a granel.

Já a maior densidade à granel do Euca A pode ter sido influenciada pelo teor de umidade, uma vez que esse material possui um dos maiores teores de umidade dos materiais analisados, ou mesmo por possuir alta densidade básica, parâmetro que não foi calculado neste trabalho. Tanto um quanto outro ocasionaria um aumento na massa do material, resultado no aumento da densidade à granel.

Para efeito comparativo, Pincelli (2011) encontrou valores de densidade à granel para resíduos de eucaliptos de 193,5 kg/m<sup>3</sup>, valor próximo ao encontrado nesse trabalho. Já Farage et al. (2013) trabalharam com resíduos madeireiros e encontraram valores de 303 kg/m<sup>3</sup> para densidade à granel de resíduos de MDF, e 200 kg/m<sup>3</sup> para os de madeira maciça, sendo este último próximo ao que foi encontrado neste trabalho.

A densidade aparente é a relação entre massa seca de madeira ou biomassa e seu volume aparente. Ou seja, trata-se da densidade a granel descontando o teor de umidade da biomassa. A ordem das amostras considerando a densidade aparente é exatamente a mesma do ranqueamento de densidade a granel. Ou seja, a amostra Euca A apresentou a maior densidade aparente, com 205 kg/m<sup>3</sup>, enquanto CAV C apresentou o menor valor para este parâmetro, 118 kg/m<sup>3</sup>.

Considerando cavacos de eucalipto, os resultados encontrados no presente trabalho refletem a variação dos valores reportados na bibliografia. Segura (2012), avaliando cavacos de *E. grandis* x *E. urophylla* com 6 anos de idade, encontrou densidade aparente de 201 kg/m<sup>3</sup>, valor muito

próximo ao encontrado para a amostra Euca A. Já Vivian (2015), trabalhando com o mesmo híbrido aos 5 anos de idade, reporta densidade aparente de 167 kg/m<sup>3</sup>.

Como já citado anteriormente, existe uma relação estreita entre a densidade a granel, granulometria e teor de umidade. Porém, vale ressaltar que, no caso da madeira, a densidade aparente está relacionada com a densidade básica

Em seu trabalho, Segura (2012) encontrou valores de densidade básica de 2,85 a 2,99 vezes superiores que os valores encontrados para densidade aparente. Essa relação entre densidade básica e densidade aparente pode explicar a grande variação nos valores de densidade aparente encontrados para os cavacos de eucalipto. Isso porque é observada, na literatura, grande variação de densidade básica na madeira de eucalipto. Esta característica da madeira é dependente de diversos fatores, como espécie, idade, tipo de solo, clima do local de plantio e ritmo de crescimento das árvores (SILVA, 2011). Exemplificando a grande variação deste parâmetro em madeiras do gênero *Eucalyptus*, Bassa (2006) encontrou densidade básica de 0,502 g/cm<sup>3</sup> para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* aos 7 anos de idade e 0,497 g/cm<sup>3</sup> para a madeira de *E. globulus* com a mesma idade. Já Duarte (2006) reporta valores de 0,458 a 0,478 g/cm<sup>3</sup> para a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* com idade variável entre 5 e 6 anos de idade, enquanto Guedes (2010) encontrou densidade básica entre 0,345 e 0,532 g/cm<sup>3</sup> avaliando 85 indivíduos de *E. grandis* x *E. urophylla* com 4 anos de idade.

### Poder calorífico superior

Os resultados de poder calorífico superior (PCS) dos diferentes tipos de materiais são apresentados na tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Poder calorífico superior dos materiais analisados – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material	Poder calorífico superior (kcal/kg)	D.P. (kcal/kg)	C.V. (%)
CAV B	4.717 a	22,37	0,47
Euca A	4.692 a b	37,60	0,80
Paleta A	4.657 a b	50,32	1,08
Paleta C	4.655 a b	45,26	0,97
CAV A	4.645 a b	41,41	0,95
Euca C	4.607 b	48,35	1,05
CAV C	4.603 b	38,41	0,83

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). D.P.- Desvio Padrão, C.V.- Coeficiente de Variação

Os resultados indicaram valores de PCS semelhantes entre si, variando de 4.603 a 4.717 kcal/kg, estando de acordo com os encontrados por diversos autores. Lopes (2012), em seu estudo com material madeireiro reprocessado encontrou valores de PCS entre 4.589 a 4.875 kcal/kg. Andrade (2016) encontrou valores variando entre 4.345 a 4.805 kcal/kg para resíduos madeireiros. Farage et al. (2013) relatam valores de PCS de 4.732 kcal/kg para MDF, 4.730 kcal/kg para madeira maciça, 4.419 kcal/kg para compensado e 4.527 kcal/kg para aglomerado. Quirino et al. (2004), estudaram o PCS de 258 espécies florestais, tendo encontrado uma variação entre 4.685 e 4.736 kcal/kg.

### **Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo**

A tabela 2.8 apresenta os resultados de análise imediata das amostras estudadas.

Tabela 2.8 – Análise imediata dos materiais estudados – teste de comparação de médias (Teste de Tukey)

Material	Teores (%)					
	Materiais voláteis		Cinzas		Carbono fixo	
	Média	D.P.	Média	D.P.	Média	D.P.
CAV A	79,8 b	0,46	1,03 c	0,11	19,19 a	0,53
Euca A	82,8 a	1,95	0,71 c d	0,13	16,49 a b	1,88
Paleta A	83,6 a	1,81	0,61 c d	0,11	15,76 b	1,71
CAV B	79,6 b	0,51	1,60 b	0,42	18,84 a	0,52
CAV C	84,2 a	0,99	0,54 d	0,04	15,29 b	0,98
Euca C	82,1 a b	0,80	2,30 a	0,38	15,64 b	0,87
Paleta C	81,9 a b	2,33	0,55 d	0,05	17,52 a b	2,31

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ ). D.P.- Desvio Padrão

O teor de materiais voláteis variou entre 79,6 e 84,2%, no qual o maior valor foi encontrado no CAV C e o menor, no CAV B. O teor de cinzas ficou entre 0,54 e 2,30%, para CAV C e Euca C, respectivamente. Já o carbono fixo variou entre 15,29 e 19,19 no qual o menor valor encontrado foi para CAV C e o maior para CAV A. O teor de cinzas de 2,3% encontrado para Euca C, provavelmente é devido à presença da casca.

Os resultados encontrados estão próximos aos observados na literatura para diferentes biomassas lenhosas, conforme relata Andrade (2016), que trabalhou com resíduos madeireiros e encontrou teores de materiais voláteis variando de 77,65 a 82,64%, teor de cinzas entre 0,9 e 1,7% e carbono fixo entre 16,33 e 20,83%. Valores muito semelhantes aos encontrados no presente estudo.

Silva et al. (2014) estudaram quatro tipos de resíduos de madeiras tropicais. Os autores relataram valores de materiais voláteis variando entre 80,94 a 82,76%, de carbono fixo entre 16,99 e 18,94% e de cinzas entre 0,12 e 0,56%.

Poletto et al. (2014) citam valores de 78,3% para materiais voláteis, 21,17% para carbono fixo, 0,53% para cinzas de MDF. Já Pincelli (2011) encontrou valores de 81,9% para materiais voláteis, 0,98% para teor de cinzas e 16,7% para carbono fixo de resíduos de eucalipto.

Lopes (2012) reporta teor de cinzas variando entre 0,44 a 2,45% para resíduos madeireiros semelhantes ao do presente estudo usados em indústria cerâmica.

A composição química imediata apresenta o teor de umidade, de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo da madeira. Os materiais voláteis são os componentes despreendidos no início da combustão, sendo composto principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). 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” (SANTOS et al., 2011).

## **Conclusões**

Os materiais reprocessados que foram analisados neste estudo apresentam características similares ao material tradicionalmente tido como referência para uso energético, que é o cavaco oriundo de plantios florestais, neste trabalho representado por Euca A e Euca C. Portanto, os materiais reprocessados avaliados possuem potencial para uso energético, confirmando o que já ocorre na prática.

Foi possível observar que há grande variabilidade em algumas das principais características tecnológicas dos materiais disponíveis no mercado para comercialização como biomassa energética. A densidade a granel, granulometria, umidade e teor de cinzas variaram significativamente. Essa heterogeneidade pode prejudicar o processamento destes materiais, uma vez que grandes variações nestas características não são desejáveis. O controle da qualidade e das características da biomassa comprada para queima compreende, portanto, um importante ponto de atenção para a comercialização e uso destes materiais.

Como a comercialização de cavacos para energia é realizada com base em volume, é necessária uma maior padronização desse material, já que o estudo mostrou que a granulometria e umidade influenciam de forma decisiva no volume a granel do material.

## Referências

- ANDRADE, C. R. Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016. 88 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6922: carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2p.
- \_\_\_\_\_. NBR 7402: carvão vegetal - determinação granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 5p.
- \_\_\_\_\_. NBR 8633: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- \_\_\_\_\_. NBR 8112: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986. 5p.
- \_\_\_\_\_. NBR 14929: 2003: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.
- \_\_\_\_\_. NBR 10.007: 2004: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 25p.
- ATKINS, R. S.; DONOVAN, C. T. Wood Products in the Waste Stream: Characterization and Combustion Emissions. Washington: [s.n.], 1996.
- BASSA, A.G.M.C. Misturas de madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do Processo Lo-Solids®. 2006. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B. De. Influência da Época de Colheita e da Estocagem na Composição Química da Biomassa Florestal. *Floresta e Ambiente*, v. 19, n. 1, p. 66–78, 2012.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, 3 ago. 2010.
- BRITO, J. O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. *Silvicultura*, v. 11, n. 41, p. 188–193, 1986.
- 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.
- CANTO, J.L. Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia. 2009. 127 p. Tese. (Doctor Scientiae). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- CASSIANO, C.; SOUZA, A. P.; STANGERLIN, D. M.; PAULINO, J.; MELO, R. R. Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v.41, n. 100, p.457-68, 2013.

- DUARTE, F.A.S. Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinadas à produção de polpa celulósica kraft. 2006. 107 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. de C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fabricas do polo moveleiro de Ubá - MG. *Ciência Florestal*, v. 23, n. 1, p. 203–212, 2013.
- FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracinga (*Mimosa scrabella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. (Série técnica). FUFEP, p. 14,1981.
- FIORESI, T.; PIROCA, S.; DALLA COSTA, H.W.; FORTES, F.O.; GATTO, D.A. Umidade de equilíbrio da madeira na região norte do Rio Grande do Sul em diferentes estações do ano. *Ciência da Madeira*, Pelotas, v. 5, n. 1, p.34-41, 2014.
- FOELKEL, C. Utilização da Biomassa do Eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. *Eucalyptus Online Book and Newsletter*, capítulo 43, 2016. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em 05/03/2017.
- GUEDES, F.T.P. Qualidade da madeira de e da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e genotipagem a partir de marcadores moleculares TRAP e microssatélites para estudos de associação. 2010. 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- IBÁ, Industria Brasileira de Árvores. Relatório 2017. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em 12/11/2017.
- MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. Aproveitamento de Resíduos e Subprodutos Florestais, Alternativas Tecnológicas e Propostas de Políticas ao uso de Resíduos Florestais para Fins Energéticos. MMA. Curitiba, 2009.
- LOPES, G. DE A. Uso energético de resíduos madeireiros em um polo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. 101 p.
- LYON, S.; BOND, B. What is urban wood waste? v. 64, p. 166–170, 2014.
- MORAIS, W. W. C. Potencial de resíduos madeireiros gerados em Roraima para a produção de energia e carvão vegetal. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2018. 105 p.
- PINCELLI, A. L. P. S. M. Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética. 2011. 127 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- POTTIE, M.A.; GUIMIER, D.Y. Preparation of forest biomass for optimal conversion. Canadá: FERIC/IEA, 1985. 112 p.

- POLETTI, M.; JUNIOR, H.; ZATTERA, A. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. *Materials*, v. 7, n. 9, p. 6105–6119, 25 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/7/9/6105/htm>>.
- QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Brasília, Laboratório de Produtos Florestais - LPF/IBAMA, 2003. 14 p.
- QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia*, Viçosa, v. 1, n. 2. p. 173-182. 2004.
- SANTOS, J. R. S. Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. 85 p.
- SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.
- SEGURA, T. E. S. Avaliação das madeiras de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Acacia mearnsii* para a produção de celulose kraft pelos processos convencional e Lo-Solids®. 2012. 99 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- SILVA, D. A. da; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B. de. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 4, p. 561–568, 2014.
- SILVA, M.G. Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada. 2011. 94 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- VIVIAN, M.A. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. 2015. 125 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

## CAPÍTULO 3 – VARIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DOS RESÍDUOS MADEIREIROS AO LONGO DO ANO

### Resumo

O objetivo deste capítulo foi avaliar a variação em diferentes períodos de alguns dos principais parâmetros de qualidade da biomassa disponível para utilização para geração de energia. Para isso, foram amostrados, em três períodos diferentes, quatro materiais disponíveis para comercialização em duas empresas reprocessadoras do estado de São Paulo, sendo dois materiais de resíduos madeireiros reprocessados, uma amostra de cavacos de palete e uma amostra de cavacos de eucalipto. Os resultados mostram que os cavacos de palete foram os menos sujeitos à variação dos teores de umidade, enquanto a maior variação para este parâmetro foi observada para os cavacos de eucalipto. Os cavacos de palete foram os que apresentaram a maior variação do tamanho médio de partículas, enquanto os valores de poder calorífico se apresentaram mais estáveis. Já o teor de cinzas foi muito variável entre as coletas, indicando a presença de agentes contaminantes externos na composição dos materiais. Dessa forma, conclui-se que há a necessidade de aprimoramento no controle de algumas das principais propriedades tecnológicas das biomassas disponíveis, com destaque para os teores de umidade e cinzas, uma vez que oscilações nesses parâmetros podem prejudicar o processamento destes materiais.

Palavras-chave: Caracterização tecnológica, Geração de energia, Estabilidade de processos

### Abstract

The purpose of this chapter was to evaluate the variation over time of some of the main quality parameters of biomass used for power generation. For this, four materials available for sale in two reprocessing companies in the state of São Paulo were sampled in three different periods, two recycled wood materials, a sample of pallet chips and a sample of eucalyptus chips. The evaluation of the main technological parameters aiming the energy use of biomass was performed in the materials of the three collections, allowing the evaluation of their variation in different periods. The results show that the pallet chips were the least subject to moisture content variation, while the highest variation for this parameter was observed for eucalyptus chips. Despite this, the pallet chips presented the largest variation in the average particle size, while the calorific values varied within a considered normal range for burning biomass. As for the ash content was very variable among the collections, the influence of contaminants external to the composition of the evaluated materials was highlighted. In this way, it is possible to conclude that there is a need for improvement in the control of some of the main technological properties of biomass available, especially the moisture and ash content, since oscillations in these parameters may impair the combustion processes of these materials.

Keywords: Technological characterization, Power generation, Process stability

### Introdução

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída pela Lei nº 12.305/10 de 02 de agosto de 2010 e regulamentada pelo decreto nº 7.404/10. A PNRS faz referência à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, uniformizando o comportamento e a atuação das partes interessadas no aproveitamento econômico dos resíduos ou na destinação ambientalmente correta dos rejeitos gerados no ciclo produtivo.



A partir da PNRS, as ações relativas à destinação adequada para resíduos sólidos, entre eles biomassas, tornaram-se uma obrigação legal. Esse fato possibilita a oportunidade de reaproveitamento de diversos materiais antes tidos como rejeitos, com destaque para resíduos madeireiros e resíduos sólidos urbanos. Existem diversas opções para reaproveitamento ou valorização de resíduos madeireiros, sendo que a implantação da PNRS possibilita diversas oportunidades para o segmento madeireiro, moveleiro e de geração de energia.

A principal destinação dos resíduos de madeira é o processamento mecânico. As possibilidades de aproveitamento desse material são inúmeras. Móveis antigos podem ser reprocessados para a fabricação de novos produtos ou podem ser transformados em partículas para a fabricação de painéis de MDF e OSB, entre outros produtos. Em alguns países da Europa, como a Itália, a fabricação de painéis de MDF é realizada com o aproveitamento de resíduos gerados a partir de outros painéis, como o próprio MDF.

Todo resíduo de madeira tem conteúdo energético e pode ser utilizado como combustível para a geração de energia. Além de produzir energia de forma mais limpa, a utilização dessa biomassa possibilita uma alternativa de destinação para resíduos madeireiros urbanos e de diversas indústrias que necessitam destinar corretamente esses materiais.

É nesse contexto que já existem empresas especializadas oferecendo o gerenciamento dos resíduos sólidos para indústrias. Tais empresas reprocessam biomassa madeireira, surgindo como uma alternativa de destinação correta tanto para os resíduos madeireiros industriais quanto para diversos resíduos sólidos urbanos (RSU), como madeira proveniente de podas de árvores, resíduos da construção civil, móveis e outros produtos madeireiros descartados pela população.

As empresas reprocessadoras coletam os materiais descartados e os transportam a uma central de reprocessamento, onde a biomassa passa por processos de triagem para a eliminação de materiais não-madeireiros, como metais e plásticos. Na sequência, o material selecionado é picado, sendo transformado em cavacos e comercializado para uso energético. Esse material é chamado de cavaco reprocessado, podendo ser composto por um único material, como no caso de cavacos de paletes, ou por diversos componentes madeireiros, como é o caso do cavaco de resíduos madeireiros, composto por inúmeros materiais, como resíduos de construção civil, resíduos de podas de árvores, móveis descartados, entre outros. O fato desta biomassa reprocessada ser originária de resíduos de processos que utilizam produtos madeireiros ou mesmo madeira maciça, faz com que esse material possa apresentar grande variabilidade de componentes e características tecnológicas.

Um dos grandes desafios para a utilização de resíduos madeireiros para a geração de energia é a heterogeneidade que estes materiais apresentam naturalmente. É importante ressaltar

que a biomassa para uso energético deve ser a mais homogênea possível, causando a menor variação no processo. Grandes variações nas características podem levar à instabilidade nos processos, com potencial redução da eficiência e dos rendimentos dos equipamentos envolvidos.

A importância do conhecimento das características tecnológicas de biomassas utilizadas como fonte energética é ainda maior no caso de materiais reprocessados, originários de diferentes fontes. As variações destas características dentro de espécies de madeiras são conhecidas e descritas em literatura. Diversos trabalhos com diferentes materiais genéticos do gênero *Eucalyptus* evidenciam a heterogeneidade que madeiras chamadas de “eucalipto” apresentam entre si (PINCELLI, 2011; SILVA, 2011; SANTOS, 2012; VIVIAN, 2015; SEGURA 2015, GALLIO et al. 2016; SEGURA et al., 2016; JESUS et al. 2017). Dessa forma, para materiais reprocessados, cujas fontes são variáveis e nem sempre conhecidas, é esperada grande heterogeneidade, o que maximiza a importância de estudos mais detalhados das características tecnológicas destes materiais e de suas variações, aprimorando assim sua utilização.

Diante do exposto, o objetivo do presente capítulo foi verificar a variação de alguns dos principais parâmetros de qualidade da biomassa utilizada para uso energético em diferentes períodos de coleta ao longo do ano.

## **Materiais e Métodos**

### **Materiais**

Para este estudo, os materiais foram coletados em duas empresas do estado de São Paulo em três períodos diferentes (Tabela 3.1). As amostras foram coletadas de acordo com a norma brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004). Após a coleta, os materiais foram armazenados em sacos plásticos grossos, vedados, identificados, transportados e armazenados no Laboratório de Química, Celulose e Energia da ESALQ-USP para execução das análises.

Foram coletados cavacos de resíduos madeireiros reprocessados, cavacos de palete e cavacos de eucalipto provenientes de plantios, considerado como um material de referência comumente utilizado para geração de energia. O intervalo total entre as três coletas foi de 12 meses, sendo 8 meses entre a primeira e a segunda coleta, e 4 meses entre a segunda e a terceira.

Tabela 3.1 – Materiais utilizados e siglas

Sigla	Material	Empresa	Município	1ª coleta	2ª coleta	3ª coleta
CAV A	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	A	Sorocaba-SP	julho/2017	março/2018	julho/2018
CAV B	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	B	Embu das Artes-SP	junho/2017	março/2018	julho/2018
Palete	cavaco de palete	A	Sorocaba-SP	julho/2017	março/2018	julho/2018
Euca	cavaco de eucalipto	A	Sorocaba-SP	julho/2017	março/2018	julho/2018

## Métodos

### Avaliação visual da composição da biomassa

Os cavacos de resíduos madeireiros reprocessados são compostos por uma grande gama de componentes madeireiros. Sua composição pode incluir resíduos madeireiros oriundos de construção civil, painéis, restos de móveis, resíduos de poda urbana, entre outros. Em função disso, concluiu-se que seria importante identificar e quantificar os componentes dessa biomassa. Assim, foi realizada uma análise visual para a identificação e quantificação dos componentes de cada material.

Uma amostra de 20 litros de cada biomassa foi separada. Os diferentes materiais identificados visualmente foram manualmente separados, sendo levados a estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante. A proporção de cada material identificado foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$PM = \left( \frac{MSm}{MSt} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Em que:

PM = Proporção do material na biomassa avaliada (%);

MSm = Massa seca do material (g);

MSt = Massa seca total da biomassa (g).

### Teor de Umidade

Os valores de umidade base úmida foram determinados nos resíduos logo após a coleta e transporte do material, a norma utilizada foi a NBR 14929 (ABNT, 2003). O cálculo é feito através da diferença de massa entre o material úmido, como recebido da amostragem, e após secagem em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até massa constante, utilizando-se a equação abaixo:

$$U = \left( \frac{MU-MS}{MU} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Em que:

U = Umidade da biomassa (%);

MU = Massa do material úmido (kg);

MS = Massa do material seco (kg).

### **Granulometria**

A granulometria dos materiais foi determinada baseada na norma ABNT NBR 7402 (1982). Essa determinação utiliza um conjunto de peneiras de diferentes granulometrias, a saber: 16, 8 e 4 mm de abertura da malha. Colocou-se uma quantidade conhecida de material na primeira peneira e agitou-se o conjunto em agitador eletromagnético. Após o tempo determinado pela norma, as porções que ficaram retidas em cada peneira, bem como no fundo, foram pesadas. Então, o tamanho médio das partículas foi obtido através da seguinte equação:

$$TM = [B(a - c) + C(b - d) + \dots + L(k - m) + 100 \times 1] \cdot 0,005 \quad (3.3)$$

Em que:

TM = tamanho médio das partículas (mm);

A, B, C, D...L, M = percentagens acumuladas (%);

a, b, c, d...l, m = abertura das malhas das peneiras (mm).

### **Densidade à granel**

O cálculo da densidade à granel foi baseado na norma da ABNT NBR 6922 (1981). Para tanto, o material foi colocado em um recipiente de massa e volume conhecidos. Na sequência, foi determinada a massa do conjunto. Para o cálculo final da massa da amostra foi descontado o valor da tara do recipiente. O cálculo da densidade à granel foi realizado conforme equação abaixo:

$$DG = \frac{MU}{VU} \quad (3.4)$$

Em que:

DG = densidade à granel ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

MU = massa da amostra úmida (g);

VU = volume úmido ( $\text{cm}^3$ ).

Para a realização dessa análise o material foi utilizado na umidade em que foi coletado.

### **Poder calorífico superior**

Para a realização dessa análise, o material foi moído em moinho de facas, peneirado e transformado em pastilhas de aproximadamente 1 grama. Logo após foram acondicionadas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  até peso constante. O poder calorífico superior foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica modelo Ika C200 de acordo com a norma NBR 8633 (ABNT, 1984).

### **Análise imediata: materiais voláteis, cinzas e carbono fixo**

A análise imediata foi realizada para determinação dos materiais voláteis, cinzas e carbono fixo segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

### **Análise Estatística**

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado e todas as análises foram feitas com 5 repetições. Para análise dos dados foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas através do programa Minitab 17 Statistical Software.

### **Resultados e Discussão**

A análise visual das biomassas estudadas foi realizada para complementar a caracterização dos materiais, em especial quanto à variação em diferentes períodos de coleta.

Os resultados da análise podem ser observados nas tabelas a seguir. A tabela 3.2 apresenta os resultados da análise visual dos componentes do material CAV A.

Tabela 3.2 – Análise visual dos componentes de cada material analisado – CAV A

<b>Material</b>	<b>Madeira sólida (%)</b>	<b>Casca (%)</b>	<b>Compensado (%)</b>	<b>MDF (%)</b>	<b>Aglomerado (%)</b>	<b>Total (%)</b>
1ª coleta	34,6	-	12,2	18,8	34,4	100
2ª coleta	44,8	11,1	15,2	17,4	11,5	100
3ª coleta	93,8	-	2,2	2,3	1,7	100

O componente principal do cavaco reprocessado denominado de CAV A foi a madeira sólida, nas três amostragens realizadas, variando de 34,6% na primeira amostragem a 93,8% na terceira. Já o componente com menor representação na primeira amostragem foi o compensado, com 12,2%, enquanto na segunda e terceira amostragens foi o aglomerado, com 11,5 e 1,7% respectivamente. Andrade (2016) realizou um estudo em uma empresa de reprocessamento de material madeireiro e, assim como neste trabalho, a maior parte dos resíduos amostrados, 56%, era de madeira maciça.

Observa-se também que a composição do material variou durante as três amostragens realizadas. O único ponto em comum é que a madeira sólida se mantém como principal componente. Isso se deve, provavelmente, ao fato da madeira sólida ser o componente mais abundante dos resíduos que a empresa reprocessadora recebe, como resíduos de poda urbana, madeiras oriundas de mobiliário, madeiras de demolição, provenientes de construção civil, entre outras.

Os resultados da análise visual dos componentes do material CAV B são apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Análise visual dos componentes de cada material analisado - CAV B

<b>Material</b>	<b>Madeira sólida (%)</b>	<b>Casca (%)</b>	<b>Compensado (%)</b>	<b>MDF (%)</b>	<b>Aglomerado (%)</b>	<b>Total (%)</b>
1ª coleta	51,1	-	11,7	26,5	10,7	100
2ª coleta	66,1	-	13,2	6,9	13,9	100
3ª coleta	46,6	-	31,4	13,3	8,7	100

O cavaco reprocessado CAV B também apresentou como componente principal a madeira sólida nas três coletas, sendo os valores encontrados de 51,1, 66,1 e 46,6% da primeira à última coleta, respectivamente. Na primeira e terceira coleta, o componente que apareceu em menor quantidade foi o aglomerado, com 10,7 e 8,7%, respectivamente. Já na segunda coleta foi o MDF, com 6,9%.

Assim como observado no CAV A, o CAV B varia sua composição durante as três coletas, com a madeira sólida sendo o principal componente em todas elas. O motivo provavelmente é o mesmo observado no CAV A. Resultado semelhante foi encontrado por Andrade (2016), onde 56% dos resíduos amostrados foi de madeira maciça, e dentro da categoria de painéis, a maior participação em termos de massa foi para resíduos de compensado, representando 23% de todo o resíduo madeireiro coletado.

Como observado nas duas amostras de resíduos madeireiros reprocessados, tais materiais apresentaram variações em suas composições nas três amostragens realizadas. Apesar desses materiais serem comercializados como um único produto, foram observadas variações nos diferentes períodos de coleta e também entre as diferentes empresas consideradas neste trabalho.

Na tabela 3.4 é possível observar os resultados da análise visual dos componentes da amostra de eucalipto.

Tabela 3.4 – Análise visual dos componentes de cada material analisado – Eucalipto

<b>Material</b>	<b>Madeira sólida (%)</b>	<b>Casca (%)</b>	<b>Compensado (%)</b>	<b>MDF (%)</b>	<b>Aglomerado (%)</b>	<b>Total (%)</b>
1ª coleta	77,2	22,8	-	-	-	100
2ª coleta	78,0	22,0	-	-	-	100
3ª coleta	78,8	21,2	-	-	-	100

Os cavacos de eucalipto também são vendidos pelas empresas visitadas como material para uso energético, porém, ele não é reprocessado, é um material oriundo de plantios comerciais e as empresas reprocessadoras visitadas já recebiam esse material como cavacos.

Como já era esperado, o componente principal do cavaco de eucalipto é a madeira sólida, com valores entre 77,2 e 78,2%, enquanto a casca apresentou valores de 21,2 a 22,8%. Foi observada baixa variação da composição deste material nos diferentes períodos de amostragem, o que, como já discutido anteriormente, é desejável para a geração de energia. Por ser proveniente de plantios comerciais o cavaco de eucalipto não contém outros componentes.

Os resultados da análise visual dos componentes de cada material analisado nos cavacos de paletes são apresentados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Análise visual dos componentes de cada material analisado – Palete

Material	Madeira sólida (%)	Casca (%)	Compensado (%)	MDF (%)	Aglomerado (%)	Total (%)
1ª coleta	100,0	-	-	-	-	100
2ª coleta	100,0	-	-	-	-	100
3ª coleta	100,0	-	-	-	-	100

Conforme esperado, os cavacos de paletes não apresentaram variação em sua composição nos diferentes períodos, o que, assim como no caso do eucalipto, é uma vantagem desse material considerando sua utilização como biomassa energética.

Os teores de umidade encontrados nas três coletas dos materiais de estudo podem ser observados na figura 3.1.

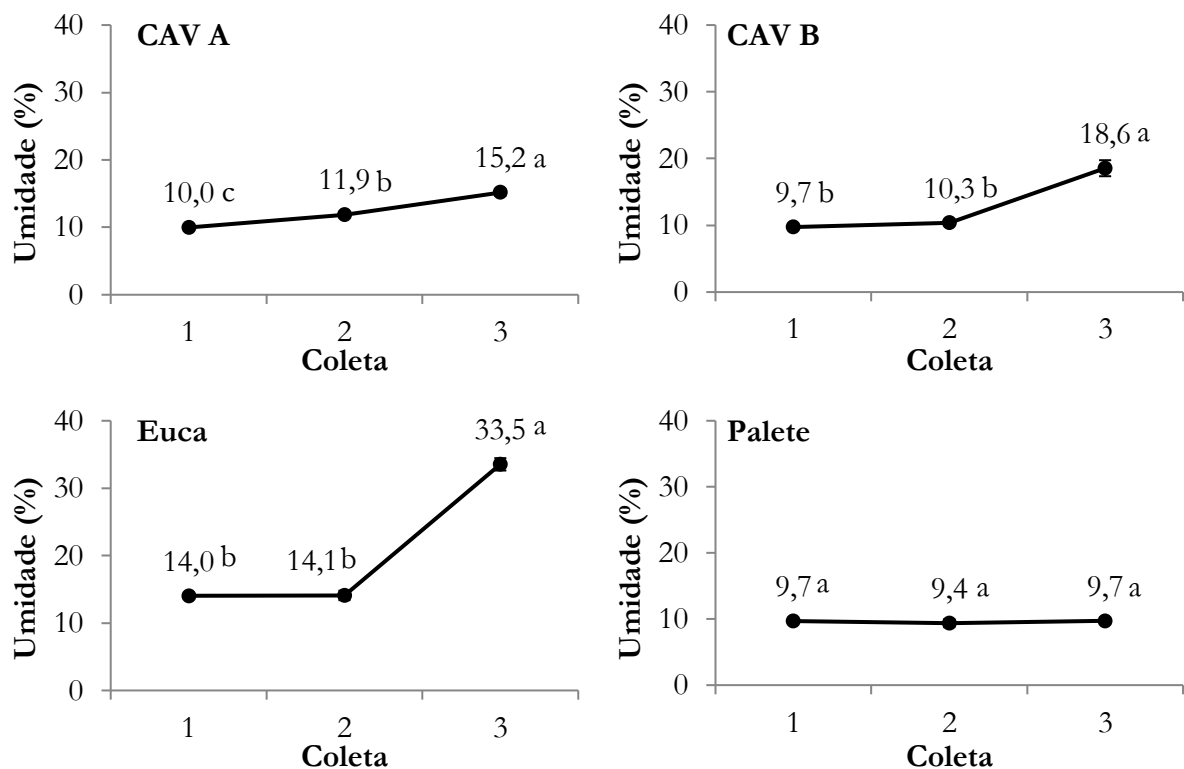


Figura 3.1 – Variação do teor de umidade nas três coletas realizadas

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Para CAV A, o menor teor de umidade encontrado foi 10%, e o maior 15,2%, sendo que para CAV B o teor de umidade variou de 9,7 a 18,6%. Os cavacos de eucalipto apresentaram umidades entre 14 e 33,5%, enquanto para o palete o menor teor de umidade foi 9,4% e o maior 9,7%.



Claramente, a variação de umidade dos paletes foi a menor dentre todos os materiais. Isso pode ser explicado pelo fato da madeira destas amostras já ter sido seca e utilizada anteriormente e também por este material não possuir outro componente que não seja a madeira de paletes. A maior variação de umidade foi observada para eucalipto, possivelmente, por este ser um material colhido a menos tempo, sem ter sido utilizado anteriormente, e com maior probabilidade de não ter atingido a umidade de equilíbrio com o ambiente. Os materiais de resíduos madeireiros reprocessados (CAV A e CAV B) apresentam variação estatisticamente significativa de umidade na terceira coleta em relação às anteriores.

Os resultados apresentados encontram-se dentro dos valores citados na literatura. Atkins e Donovan (1996) obtiveram teores de umidade variando entre 7 e 20% para resíduos de origem urbana. Farage et al. (2013) estudou resíduos de madeira e encontrou teor de umidade de 17,8% para madeira maciça. Já Andrade (2016) cita valores próximos para resíduos madeireiros, tendo encontrado valores médios de teor de umidade de 12,3 a 37,4% para madeira maciça, próximos aos encontrados para o eucalipto no presente estudo. Já para compensado, aglomerado e MDF, as médias dos teores de umidade variaram entre 12,3 e 15,0%. Lopes (2012) encontrou teores de umidade na faixa de 15% para resíduos reprocessados provenientes de resíduos urbanos e de construção civil.

O teor de umidade pode ser considerado uma das características mais importantes em um combustível, especialmente no caso da madeira. Talvez seja esse o fator que maior influência exerce sobre a queima de materiais combustíveis, por duas razões básicas. A primeira é que ele varia dentro de faixa ampla de valores em função de espécies, clima, tempo e condições de armazenamento, entre outros, prejudicando o controle do processo de combustão. A segunda razão é que a água apresenta um poder calorífico negativo, isso é, parte do calor empregado é utilizado para sua evaporação (BRITO, 1979).

Dada a importância do teor de umidade no uso energético da biomassa, os resultados apresentados neste trabalho indicam que especial atenção deve ser dada ao controle deste parâmetro por empresas que utilizam resíduos madeireiros e cavacos de eucalipto para a geração de energia.

Os resultados relacionados à granulometria e ao tamanho médio das partículas de cada material são observados a seguir. As tabelas 3.6 a 3.9 apresentam as variações das proporções retidas em cada peneira e dos tamanhos médios de partículas para os materiais CAV A e CAV B.

Tabela 3.6 – Proporção dos materiais retidos em cada peneira – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) – CAV A

Material	Abertura da malha das peneiras (mm)					
	>50,0	31,5	16,0	8,0	4,0	<4,0
	-----%-----					
1ª coleta	24,78 b	31,12 a	28,77 a	13,53 a	1,52 b	0,29 b
2ª coleta	26,02 b	30,16 a	28,61 a	12,38 a	2,12 b	0,71 b
3ª coleta	33,94 a	16,76 b	25,92 a	15,69 a	4,57 a	3,13 a

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 3.7 – Tamanho médio das partículas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - CAV A

Coleta	Tamanho médio das partículas (mm)	
	Média	D.P.
1ª coleta	31,3 a	1,73
2ª coleta	31,3 a	1,20
3ª coleta	29,0 b	0,56

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 3.8 – Proporção dos materiais retidos em cada peneira – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) – CAV B

Material	Abertura da malha das peneiras (mm)					
	>50,0	31,5	16,0	8,0	4,0	<4,0
	-----%-----					
1ª coleta	13,40 a	39,05 a	35,35 a	8,67 b	2,33 a	1,19 a
2ª coleta	16,63 a	35,21 a	33,71 a	11,90 b	1,77 ab	0,78 a
3ª coleta	19,30 a	31,07 a	30,77 a	17,40 a	1,29 b	0,17 b

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 3.9 – Tamanho médio das partículas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - CAV B

Coleta	Tamanho médio das partículas (mm)	
	Média	D.P.
1ª coleta	31,0 a	2,94
2ª coleta	30,7 a	1,08
3ª coleta	30,0 a	0,44

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Pode-se observar que os materiais CAV A e CAV B apresentaram comportamentos similares na distribuição granulométrica, sendo que a maior parte dos materiais ficou retida nas três primeiras peneiras, de aberturas maiores: 50, 31,5 e 16 mm de malha.

O CAV A apresentou 84,67% do material retido nas três peneiras de maior abertura na primeira coleta, 84,79% na segunda e 76,62% na terceira. Esse fato corrobora com os resultados de tamanho médio de partículas, que foram maiores nas duas primeiras coletas, com média de 31,3 mm e sem diferença estatística, e menor na terceira coleta, com média de 29 mm, estatisticamente diferente das duas primeiras.

O material CAV B também apresentou a maior parte do material retida nas três maiores peneiras, 87,8% na primeira, 85,55% na segunda e 81,14% na terceira. Já o tamanho médio das partículas variou de 30 a 31 mm, sem diferenças estatísticas nas três coletas.

As proporções retidas em cada peneira e o tamanho médio das partículas dos cavacos de eucalipto são apresentados nas tabelas 3.10 e 3.11, respectivamente.

Tabela 3.10 – Proporção dos materiais retidos em cada peneira – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - Eucalipto

Material	Abertura da malha das peneiras (mm)					
	>50,0	31,5	16,0	8,0	4,0	<4,0
-----%-----						
1ª coleta	6,18 b	34,40 a	40,70 a	17,44 a	1,10 a	0,17 b
2ª coleta	18,73 a	28,14 b	34,25 a	17,01 a	1,57 a	0,30 a
3ª coleta	18,58 a	30,00 ab	34,97 a	14,82 a	1,40 a	0,23 ab

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 3.11– Tamanho médio das partículas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - Eucalipto

Coleta	Tamanho médio das partículas (mm)	
	Média	D.P.
1ª coleta	28,4 b	0,94
2ª coleta	29,4 ab	0,60
3ª coleta	30,0 a	0,39

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

A maior parte dos cavacos de eucalipto na primeira coleta, 92,5%, ficou retida nas peneiras de 31,5, 16 e 8 mm. Já na segunda e terceira coletas, a maior parte ficou retida nas três peneiras de maior malha, com 81,12 e 83,55%. Esse resultado está de acordo com os valores de tamanho médio das partículas, no qual os cavacos de eucalipto da primeira coleta apresentaram tamanho menor

que das duas coletas seguintes, e o maior tamanho médio das partículas foi encontrado na terceira coleta.

Os resultados de proporções do material retidas em cada peneira e tamanho médio de partículas dos cavacos de palete são apresentados nas tabelas 3.12 e 3.13, respectivamente.

Tabela 3.12 – Proporção dos materiais retidos em cada peneira – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - Palete

Coleta	Abertura da malha das peneiras (mm)					
	>50,0	31,5	16,0	8,0	4,0	<4,0
-----%-----						
1ª coleta	12,39 b	29,19 ab	33,52 a	20,44 a	4,14 a	0,31 b
2ª coleta	22,85 a	31,99 a	32,58 a	11,15 b	1,19 b	0,24 b
3ª coleta	12,00 b	25,00 b	34,39 a	23,85 a	4,32 a	0,44 a

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Tabela 3.13 – Tamanho médio das partículas – teste de comparação de médias (Teste de Tukey) - Palete

Coleta	Tamanho médio das partículas (mm)	
	Média	D.P.
1ª coleta	27,6 b	1,21
2ª coleta	31,5 a	0,83
3ª coleta	26,4 b	0,19

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Conforme observado nas tabelas anteriores, os cavacos de palete apresentaram as distribuições granulométricas similares na primeira e terceira coleta, quando a maior parte do material ficou retido nas peneiras de 31,5 a 8 mm (83,15% na primeira coleta e 83,24% na terceira). A segunda coleta apresentou 87,42% do material retido nas três peneiras de maior malha. Da mesma forma, os tamanhos médios das partículas das coletas 1 e 3 não apresentaram diferença estatística entre si, 27,6 e 26,4 mm respectivamente. A segunda coleta apresentou tamanho médio de partícula superior às demais, 31,5 mm, resultado esperado quando observamos a distribuição granulométrica dos materiais.

O tamanho e a forma das partículas afetam diretamente sua taxa de conversão energética durante o processo de queima. Partículas de tamanhos e formas diferentes terão diferentes superfícies de contato, nas quais ocorrem as reações químicas e, dessa maneira, a desuniformidade poderá influenciar na taxa de combustão do material. Além disso, o tamanho e forma das partículas

determinam uma proporção maior ou menor de espaços vazios entre elas, interferindo na quantidade de oxigênio necessária para sua queima (CANTO, 2009, POTTIE e GUIMIER, 1985).

Os valores encontrados para densidade à granel dos materiais nas três coletas realizadas podem ser observados na figura 3.2.

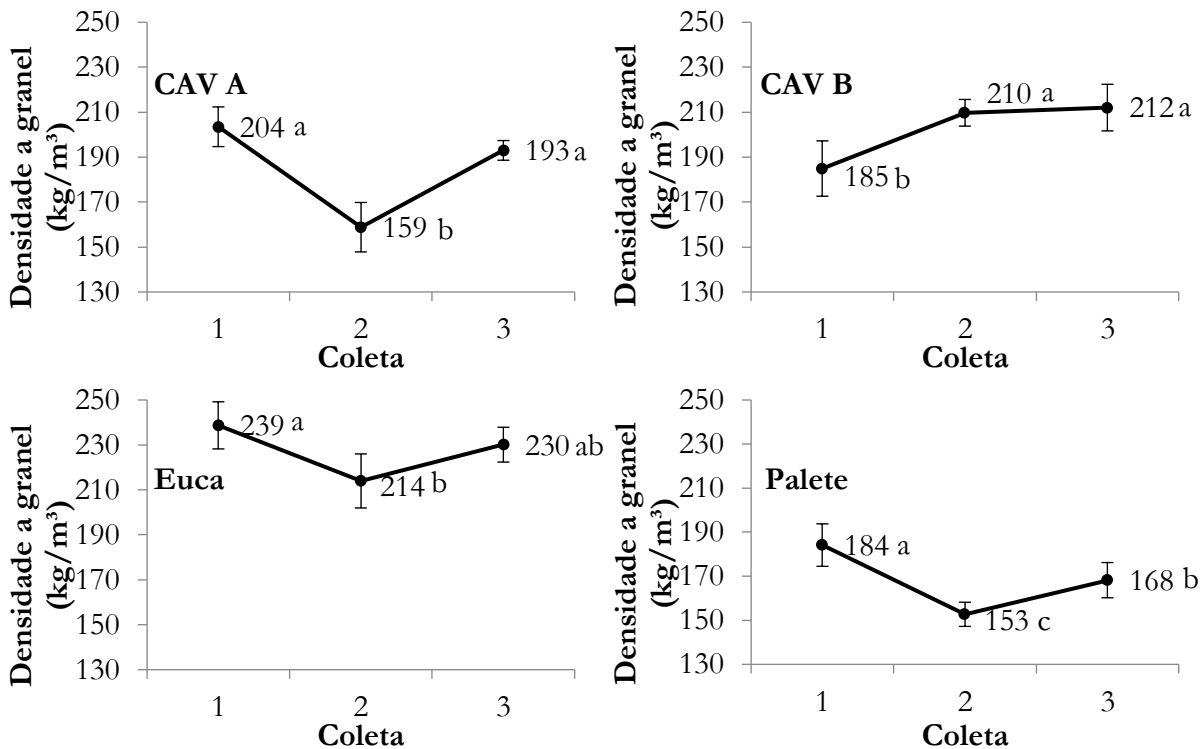


Figura 3.2 – Variação da densidade a granel nas três coletas realizadas.

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

A densidade à granel do material CAV A variou de 204 a 159 kg/m<sup>3</sup> entre as coletas. Essa grande variação deve-se ao resultado encontrado na segunda amostra, abaixo das demais. No caso do CAV B, essa variação foi de 185 a 212 kg/m<sup>3</sup>, variação menor que a encontrada na outra amostra de cavaco de resíduos madeireiros reprocessados. Para o eucalipto a variação foi de 214 a 239 kg/m<sup>3</sup>, enquanto para os cavacos de palete, a variação foi de 153 a 184 kg/m<sup>3</sup>.

A tabela 3.14 apresenta a variação da densidade à granel dos materiais nas diferentes coletas.

Tabela 3.14 – Variação da densidade à granel dos materiais nas diferentes coletas

Material	Densidade à granel		
	Maior (kg/m <sup>3</sup> )	Menor (kg/m <sup>3</sup> )	Variação (%)
CAV A	204	159	22,1
CAV B	212	185	12,7
Eucalipto	239	214	10,5
Palete	184	153	16,6

Como pode ser observado, os materiais reprocessados apresentaram maiores variações de densidade à granel entre as coletas quando comparados ao eucalipto. Sabe-se que a densidade à granel é influenciada pela densidade básica dos materiais, pela granulometria e pelo teor de umidade. Assim, trata-se de uma importante propriedade para biomassas destinadas à geração de energia, sendo que, trata-se de uma oportunidade de ajuste no processo de reprocessamento de resíduos madeireiros, com o objetivo de reduzir tais variações. Esse aprimoramento poderia ser realizado no momento da picagem dos materiais ou mediante peneiramento dos cavacos.

Os valores de densidade à granel observados encontram-se alinhados com a literatura. Andrade (2016) encontrou valores variando de 187 a 233 kg/m<sup>3</sup> para resíduos madeireiros reprocessados. Pincelli (2011) trabalhou com resíduos de colheita de eucalipto cita valor médio de 193,5 kg/m<sup>3</sup>. Da mesma forma, Pedrazzi et al. (2010) citam 186 kg/m<sup>3</sup> para a densidade à granel de cavacos de eucalipto.

Os valores encontrados para a variação do poder calorífico superior nas três coletas estão apresentados na figura 3.3.

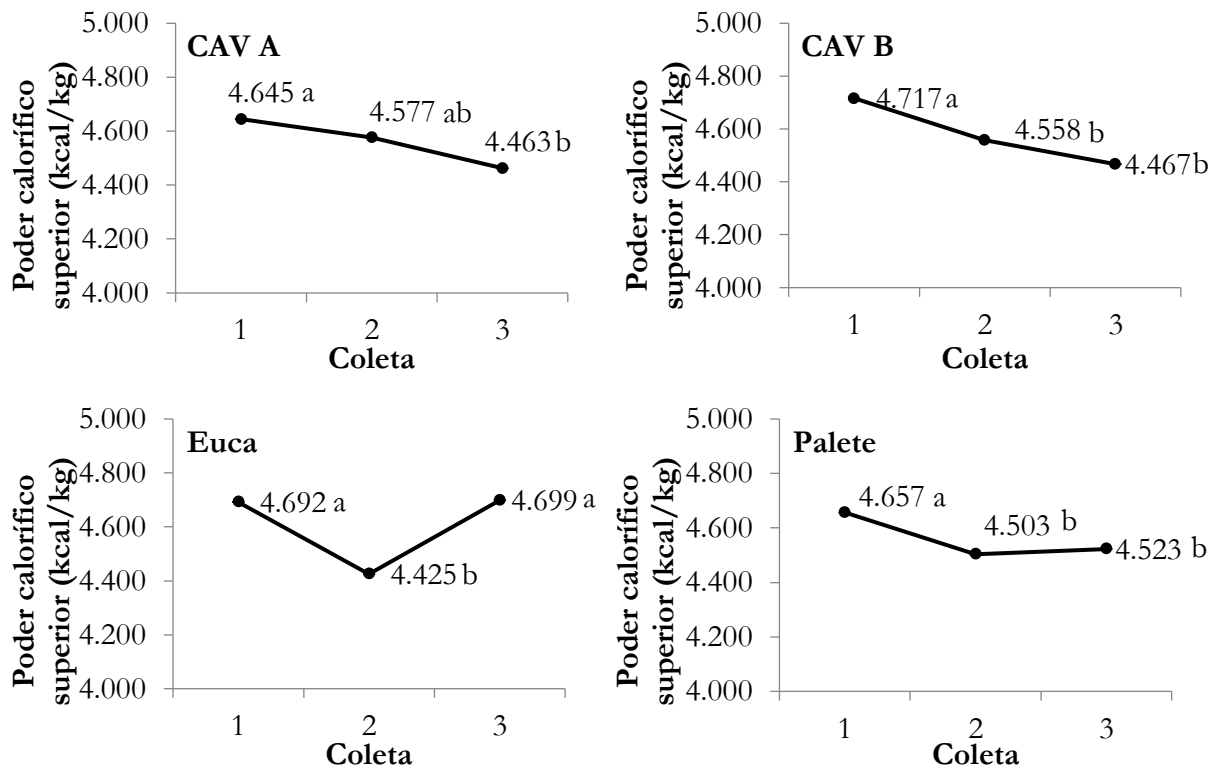


Figura 3.3 – Variação do poder calorífico superior nas três coletas realizadas.

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Os valores de poder calorífico superior variaram na faixa de 4.425 a 4.717 kcal/kg para os materiais analisados. O maior valor foi encontrado para CAV B, enquanto o menor foi observado para uma amostra de eucalipto.

As variações observadas entre as coletas, apesar de terem sido estatisticamente significativa em alguns casos, ficaram abaixo de 10% de variação entre as coletas para todos os materiais. Tal comportamento possivelmente deve-se ao fato de todos os materiais avaliados neste trabalho serem de origem madeireira – o poder calorífico da madeira encontra-se entre 3.000 e 5.400 kcal/kg (BRITO e BARRICHELO, 1982).

Os resultados obtidos encontram-se próximos aos citados por diversos autores que trabalharam com materiais madeireiros. Andrade (2016), que trabalhou com material madeireiro proveniente de resíduos urbanos, encontrou valores de poder calorífico superior variando de 4.345 a 4.805 kcal/kg. Quirino et al. (2004) trabalhou com 258 espécies florestais e o poder calorífico superior apresentou-se como uma propriedade pouco variável entre 4.685 e 4.736 kcal/kg. Lopes (2012) em seu trabalho com resíduos madeireiros utilizados por cerâmicas encontrou valores entre 4.589 e 4.875 kcal/kg.

O poder calorífico pode ser definido como a energia desprendida pela queima de uma unidade de massa de um combustível, sendo expresso em calorias ou joules por grama. O poder

calorífico superior (PCS) é definido 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). A energia contida em um combustível será proporcional ao seu poder calorífico, dada a importância do conhecimento dessa propriedade para a avaliação de uma biomassa como insumo energético (PÉREZ et al., 2008). O poder calorífico depende, principalmente, da composição química do combustível (INCE, 1977).

Os resultados de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas podem ser observados nas figuras 3.4 a 3.6.

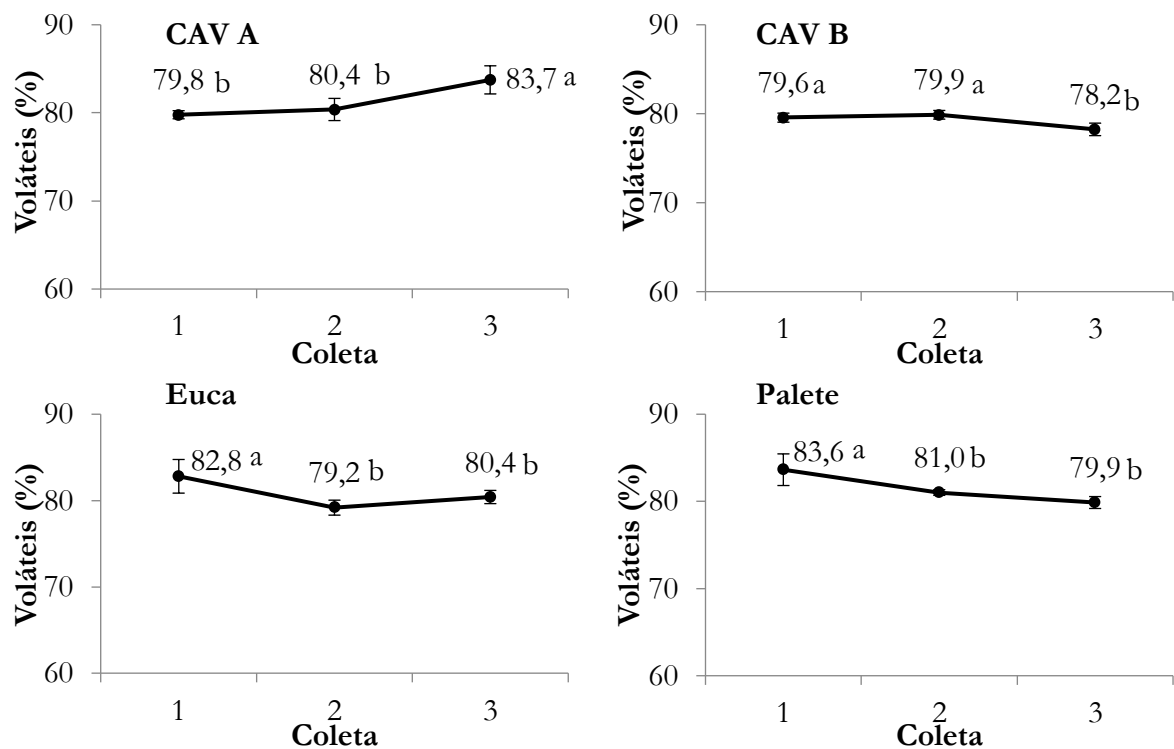


Figura 3.4 – Variação dos voláteis nas três coletas realizadas  
As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )



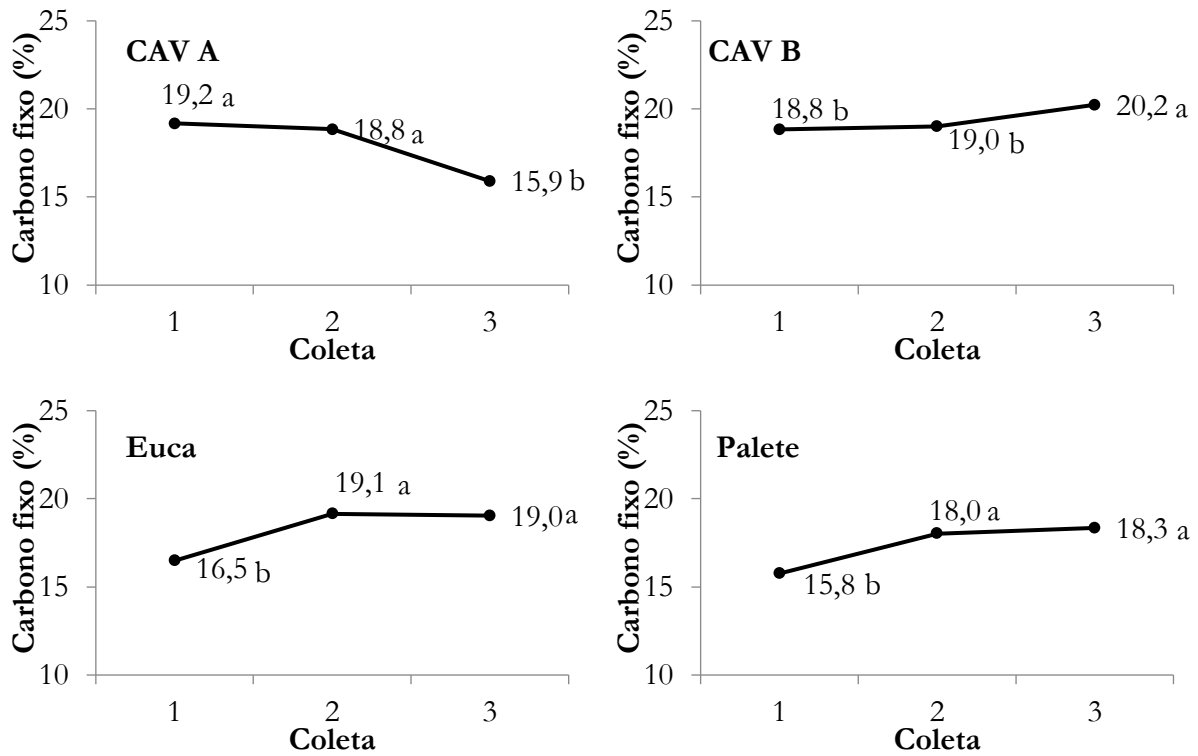


Figura 3.5 – Variação do carbono fixo nas três coletas realizadas  
As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

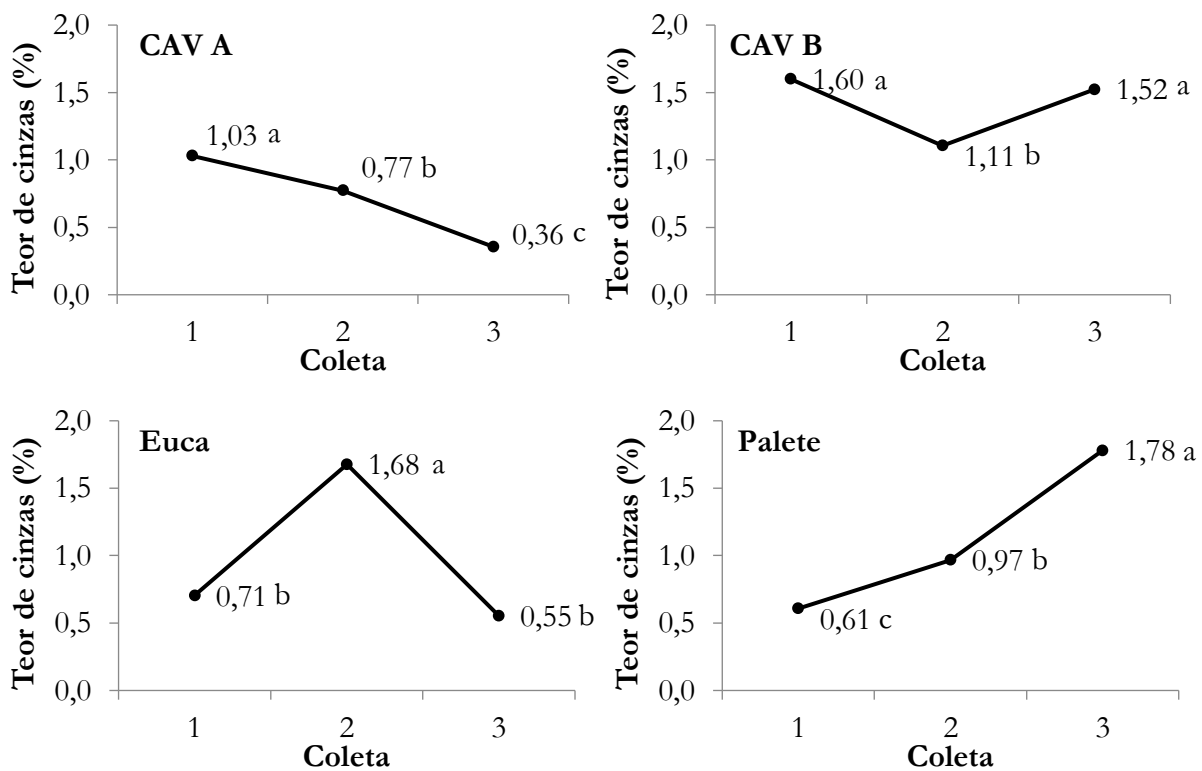


Figura 3.6 – Variação do teor de cinzas nas três coletas realizadas. As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Do ponto de vista absoluto, o menor valor observado para materiais voláteis foi de 78,2% para o CAV B e o maior foi 83,7% para o CAV A. Para carbono fixo o menor valor foi 15,8% para o Palete e o maior valor foi de 20,2% para o CAV B. No teor de cinzas, o menor valor é do CAV A, 0,36% e o maior é do Palete com 1,78%.

Os materiais voláteis são os primeiros a se dissiparem durante a combustão da biomassa, diminuindo o tempo de queima do combustível e, conseqüentemente, diminuindo a eficiência energética. O carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico, aumentando o tempo de queima da biomassa. Os teores de materiais voláteis e carbono fixo são dependentes entre si, uma vez que a percentagem de cinzas na sua constituição geralmente é baixa (CHAVES, 2013; PEREIRA, 2000).

Os valores de materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas encontram-se próximos aos descritos na literatura para diferentes biomassas lenhosas. Observa-se que o teor de cinzas foi bastante variável para todos os materiais avaliados, o que pode estar relacionado com contaminações destas biomassas. Andrade (2016) cita valores de materiais voláteis variando de 77,65% para compensado a 82,64% para madeira maciça. Para carbono fixo a variação foi de 16,33% para chapas e 20,83% para compensados.

Em relação ao teor de cinzas, a variação encontrada foi de 0,9% para madeira maciça e 1,7% para chapas. Poletto et al. (2014) trabalharam com MDF e citam valores de 78,3% para materiais voláteis, 21,17% para carbono fixo e 0,53% para teor de cinzas. Pincelli (2011) encontrou, para resíduos de eucalipto, valores de 80,1% para materiais voláteis, 19,4% para carbono fixo e 0,53% para cinzas. Farage et al. (2013) trabalhou com resíduos de material madeireiro e encontrou valores de cinzas variando entre 0,48 a 0,95%. E ainda, Silva et al. (2014) utilizaram em seu estudo quatro tipos de resíduos de madeiras tropicais, encontrando valores de materiais voláteis entre 80,94 a 82,76%, 16,99 a 18,94% de carbono fixo e 0,12 a 0,56% de teor de cinzas.

O teor de cinzas é uma propriedade de grande importância para uso de biomassa para energia. Para uso combustível o ideal é que o material tenha o menor teor de cinzas possível, pois quanto maior o seu teor maior poderá ser o desgaste de ferramentas de corte para moer e triturar tais materiais (SOUZA et al., 2009). A energia disponível em uma biomassa é reduzida proporcionalmente ao aumento do teor de cinzas nela encontrado, pois as cinzas diminuem o poder calorífico do combustível (BRAND, 2010). E ainda, em processos de combustão as cinzas podem se fundir, entrando em fase líquida a elevadas temperaturas, tendo como consequência a redução do rendimento do processo (KROOK et al., 2004; BRAND, 2010), levando à necessidade de limpezas mais frequentes de fornos e caldeiras, problemas de entupimento e incrustações (Debal et al., 2014) e ao aumento dos riscos de corrosão, resultando em aumento de custos operacionais.

## Conclusões

Os resultados apresentados neste capítulo permitem concluir que as principais características tecnológicas de materiais utilizados como biomassa energética são variáveis em diferentes períodos de amostragem.

Dentre os materiais avaliados, os cavacos de paletes apresentaram as menores variações do teor de umidade e as maiores variações de tamanho de partículas. Os cavacos de resíduos madeiros reprocessados apresentaram alta variação na composição e na densidade a granel, enquanto os cavacos de eucalipto foram mais heterogêneos no teor de umidade. Todos os materiais apresentaram grande variação do teor de cinzas, fator possivelmente relacionado à presença de contaminantes.

Pode-se considerar que há a necessidade de aprimoramento no controle de algumas das principais propriedades tecnológicas das biomassas disponíveis para compra, com destaque para os teores de umidade e cinzas, que apresentaram grandes variações na maioria das biomassas avaliadas. O teor de umidade pode prejudicar o controle do processo de combustão, enquanto altos teores de cinzas podem causar redução do poder calorífico da biomassa e aumento dos desgastes dos equipamentos envolvidos no processo de combustão.

## Referências

- ANDRADE, C. R. Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016. 88 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 6922: carvão vegetal - ensaios físicos - determinação da massa específica (densidade a granel). Rio de Janeiro, 1981. 2p.
- \_\_\_\_\_. NBR 7402: carvão vegetal - determinação granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 1982. 5p.
- \_\_\_\_\_. NBR 8633: carvão vegetal - determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- \_\_\_\_\_. NBR 8112: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986. 5p.
- \_\_\_\_\_. NBR 14929: 2003: Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 25p.
- \_\_\_\_\_. NBR 10.007: 2004: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 25p.
- ATKINS, R. S.; DONOVAN, C. T. Wood Products in the Waste Stream: Characterization and Combustion Emissions. Washington: [s.n.], 1996.

- BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114p.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 3 ago. 2010.
- BRITO, J. O. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. Circular Técnica IPEF, Piracicaba, n.52, p.1-15, 1979.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L.E.G. 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, p. 101-137, 1982.
- CANTO, J.L. Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia. 2009. 127 p. Tese. (Doctor Scientiae). Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- CHAVES, A. M. B. Características energéticas da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533 – 542, 2013.
- DEBAL, M.; GIRODS, P.; LÉMONON, J.; KARAMA, J. P.; DONNOT, A.; ROGAUME, Y. TG-FTIR kinetic study of the thermal cleaning of wood laminated flooring waste. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 118, n. 1, p. 141–151, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10973-014-3942-9>>.
- FARAGE, R. M. P.; REZENDE, A. A. P.; SILVA, C. M.; NUNES, W. G.; CARNEIRO, A. de C. O.; VIEIRA, D. B.; RODRIGUES, C. L. S. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fabricas do polo moveleiro de Ubá - MG. *Ciência Florestal*, v. 23, n. 1, p. 203–212, 2013.
- Gallio, E.; Santini, E.J.; Gatto, D.A.; De Souza, J.T.; Ravasi, R.; De Menezes, W.M.; Floss, P.A. & Beltrame, R. Caracterização Tecnológica da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage. *Revista Scientia Agraria Paranaensis*, vol. 15, n. 3, 2016. p. 244-250.
- INCE, P.J. Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents. Madison: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. 9 p. (Gen. Tech. Report FPL, 13).
- JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. *FLORESTA*, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 11 - 16, 2017.
- KROOK, J.; MARTENSSON, A.; EKLUND, M. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 41, n. 1, p. 1–14, 2004.
- LOPES, G. DE A. Uso energético de resíduos madeireiros em um polo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. 101 p.

- PEDRAZZI, C.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C. de; MUGUET, M.C.S.; GOMIDE, J.L. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de polpas produzidas por novas seqüências de branqueamento. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 123-135, jan./mar. 2010.
- PEREIRA, J. C. D. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Documento 38, Colombo: Embrapa Florestas, 2000.
- PÉREZ, S.; RENEDO, C.J.; ORTIZ, A.; MAÑANA, M. Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria). *Bioresource Technology*, New York, v. 99, n. 14, p. 6339-6345, 2008.
- PINCELLI, A. L. P. S. M. Características dos resíduos da colheita de madeira de eucalipto e pinus, submetidos ao tratamento térmico, com foco na aplicação energética. 2011. 127 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.
- POLETTI, M.; JUNIOR, H.; ZATTERA, A. Native Cellulose: Structure, Characterization and Thermal Properties. *Materials*, v. 7, n. 9, p. 6105–6119, 25 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1944/7/9/6105/htm>>.
- POTTIE, M.A.; GUIMIER, D.Y. Preparation of forest biomass for optimal conversion. Canadá: FERIC/IEA, 1985. 112 p.
- QUIRINO, W.F.; VALE, A.T.; ANDRADE, A.P.A.; ABREU, V.L.S.; AZEREDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos. *Biomassa e Energia*, Viçosa, v. 1, n. 2. p. 173-182. 2004.
- SANTOS, J. R. S. Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2012. 85 p.
- SEGURA, T. E. S. Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose Kraft branqueada. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015. 198 p.
- SEGURA, T. E. S.; SILVA JR., F. G. Potential of *C. citriodora wood* species for kraft pulp production. *Tappi Journal* v. 15, p. 159-164, 2016.
- SILVA, D. A. da; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B. de. Avaliação das Propriedades Energéticas de Resíduos de Madeiras Tropicais com Uso da Espectroscopia NIR. *Floresta e Ambiente*, v. 21, n. 4, p. 561–568, 2014.
- SILVA, M. G. Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011. 95 p.
- SOUZA, S. S. de; SANATOS, P. O. dos; VAREJÃO, M. de J. C.; NASCIMENTO, C. C. do. DETECÇÃO DO TEOR DE CINZAS E SÍLICA EM MATERIAIS LIGNOCELULÓSICOS, 2009, Manaus/AM. Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/61ra/resumos/resumos/5044.htm>>.

VIVIAN, M.A. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. 2015. 125 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.



## **CAPÍTULO 4 – PRESENÇA DE CONTAMINANTES NAS CINZAS DE RESÍDUOS MADEIREIROS REPROCESSADOS PARA USO ENERGÉTICO**

### **Resumo**

O objetivo deste capítulo é avaliar a presença de contaminantes em diferentes resíduos madeireiros comercializados para uso energético no estado de São Paulo. Para isso, foram amostrados sete materiais disponíveis para este uso, sendo seis amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados e uma amostra de cavacos de eucalipto, utilizada como referência. Para a amostragem dos cavacos reprocessados, foram consideradas duas empresas, denominadas A e B, tendo sido coletados três materiais de cada uma. Para avaliação da concentração de contaminantes potencialmente prejudiciais à equipamentos destinados à queima destes materiais, alguns dos principais parâmetros correlacionados ao desgaste destes foram avaliados. Os resultados encontrados mostram que os cavacos reprocessados são, na maioria dos casos, mais agressivos aos equipamentos em comparação ao cavaco de eucalipto. A única exceção é o material CAV A3, que possui características próximas aos do eucalipto, menos corrosivas que os demais materiais reprocessados. Além disso, são nítidas as menores taxas de contaminação dos cavacos reprocessados e comercializados pela empresa A em comparação aos materiais da empresa B. A partir dos resultados encontrados, foi possível concluir que há grande variação na concentração de contaminantes entre os resíduos avaliados. Desse modo, visando à integridade e manutenção dos equipamentos envolvidos no processo de queima de biomassa, recomenda-se criteriosa seleção e controle de qualidade dos materiais utilizados, sobretudo cavacos de madeira reprocessada.

Palavras-chave: Corrosão, Metais, Qualidade da biomassa, Cinzas

### **Abstract**

The objective of this chapter is to evaluate the presence of contaminants in different wood residues commercialized for energy use in the state of São Paulo. For this, seven materials available for this use were sampled: six samples of recycled chips and one sample of eucalyptus chips, used as a technological reference. For the sampling of the reprocessed chips, two companies, named A and B, were considered, and three materials were sampled from each one. To evaluate the concentration of contaminants potentially harmful to the equipment intended for the burning of these materials, some of the main parameters correlated to their wear were evaluated. The results show that the recycled chips are, in most cases, more aggressive to the equipment compared to eucalyptus chips. The only exception is CAV A3 material, which has similar characteristics to those of eucalyptus, presenting less corrosive characteristics than other recycled materials. In addition, recycled chips sold by Company A presented lower contamination rates compared to Company B materials. It was possible to conclude that there is a high variation in contaminants concentration on the evaluated recycled biomasses, and, aiming at the integrity and maintenance of the equipment involved in the biomass burning process, a careful selection and quality control is recommended for the used materials, especially recycled wood chips.

Keywords: Corrosion, Metals, Biomass quality, Ash



## Introdução

A utilização de resíduos para a geração de energia apresenta diversas vantagens, como o reaproveitamento de materiais que seriam descartados, a redução de resíduos industriais e urbanos, e o aumento de oferta de matéria-prima para estes fins. Porém, este reaproveitamento também apresenta algumas desvantagens e riscos, com destaque para a possível presença de contaminantes. Tais materiais podem tanto reduzir a eficiência de combustão quanto aumentar os riscos de corrosão em equipamentos utilizados no processo.

De acordo com Foelkel (2016), o licor preto em fábricas de celulose, os resíduos silviculturas, como galhos, folhas e cascas, e resíduos de processos de industrialização da madeira, como cavacos, serragens, aparas, paletes e caixotes de embalagem, constituem a chamada biomassa florestal energética. Estes resíduos são os combustíveis preferidos para fornos e caldeiras de biomassa com o objetivo de gerar energia (LOPES et al., 2013).

A presença de contaminantes na biomassa pode causar efeitos negativos ao processo e à preservação dos equipamentos envolvidos, sobretudo das caldeiras. Esses contaminantes podem ser agentes externos, como peças metálicas, pedras, plásticos e terra, ou internos, da constituição química da biomassa, como compostos absorvidos pelas plantas durante sua vida. Como exemplo destes compostos podem ser citados nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, fósforo, cobre, ferro e manganês.

De acordo com Oliveira et al. (2000), a necessidade de adubação de plantios florestais se dá pois nem sempre o solo é capaz de fornecer todos os nutrientes que as plantas necessitam para se desenvolverem.

Segundo Gonçalves (1995), as características e quantidade de adubos aplicados dependem, principalmente, das necessidades nutricionais das espécies florestais, da fertilidade do solo e da forma de reação dos adubos com o solo.

Em plantios de eucalipto, normalmente utilizam-se fertilizantes com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK). Algumas espécies de eucalipto são exigentes em alguns micronutrientes, como boro (B) e zinco (Zn), fazendo-se necessário o complemento da adubação com esses nutrientes (OLIVEIRA et al., 2000). Os demais nutrientes que devem ser avaliados e, em caso de necessidade, aplicados no solo são: cálcio, magnésio, enxofre, ferro, manganês, cobre e molibdênio (GONÇALVES, 1995).

De acordo com Foelkel (2011), esses nutrientes são acumulados na árvore durante seu desenvolvimento. Nas cascas e madeiras, segundo o autor, há alta concentração de cálcio, potássio e cloretos.

Silveira (2000) avaliou a concentração de macronutrientes em diferentes partes de mudas de eucalipto, tendo encontrado maiores concentrações de nitrogênio, potássio e cálcio nas folhas, fósforo no caule e ramos, e magnésio e enxofre nas raízes. Já para a concentração de micronutrientes nas diferentes partes de mudas de eucalipto, o autor encontrou as maiores concentrações de boro, cobre e ferro nas raízes, e de manganês nas folhas.

Stahl (2009) cita que, normalmente, o potássio é o segundo ou terceiro nutriente mais utilizado e acumulado por árvores de eucalipto, ficando algumas vezes abaixo do nitrogênio e do cálcio. Araújo et al. (2001) avaliaram a concentração de nutrientes em clones de eucalipto plantados no sul da Bahia com diferentes idades. Os autores indicam que a concentração dos nutrientes nas árvores seguiu a seguinte ordem: cálcio>nitrogênio>potássio>manganês>enxofre, conforme apresentado na figura 4.1.

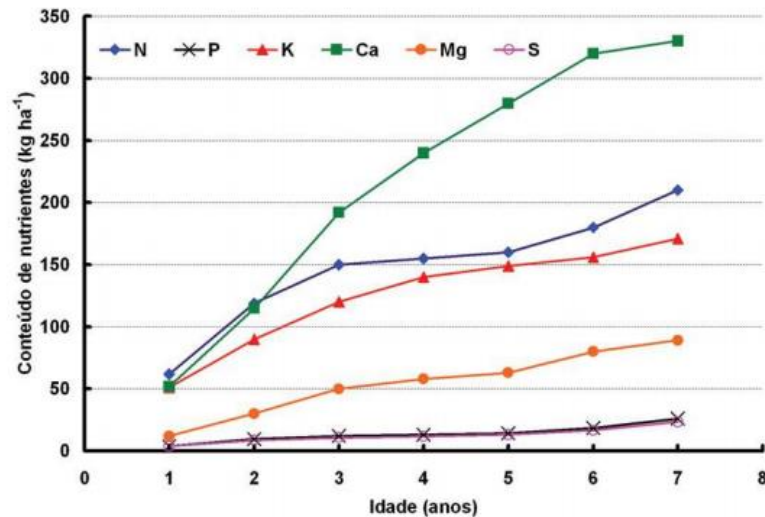


Figura 4.1 – Nutrientes acumulados por árvores de eucalipto. Fonte: Araújo et al. (2001)

As caldeiras estão presentes em diversos segmentos industriais, como alimentício, açúcar e álcool, papel e celulose, siderúrgico, mineração, petroquímico, entre outros. A principal finalidade das caldeiras industriais é a geração de vapor para alimentar os processos. Porém, com o aumento do custo da energia elétrica, elas também vêm sendo utilizadas para a cogeração de energia (SAMPAIO, 2014).

De acordo com Tolmasquim (2003), o mercado de caldeiras apresenta diferentes alternativas de tecnologias de queima, sendo as principais: queima em grelha fixa, queima em grelha móvel, queima em suspensão, queima em leito fluidizado e reatores de combustão pirolítica, neste caso antecidos pelo processo de gaseificação.

Os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos são caracterizados como cinzas. As cinzas são constituídas por silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Quando em alta concentração podem diminuir o poder calorífico dos materiais. A presença das cinzas afeta também a transferência de calor, sendo necessária a remoção das mesmas. As cinzas podem originar-se de elementos metálicos já presentes no combustível; de argila, areia e sais que possam estar na biomassa e ainda por solos misturados à biomassa durante sua colheita ou manuseio. (NOGUEIRA e RENDEIRO, 2008; KLAUTAU, 2008).

A presença destes nutrientes nas cinzas resultantes da combustão da biomassa faz com que este material tenha potencial de ser utilizado como fertilizante em plantios agrícolas e florestais (GONZALEZ, 2014; CACURO e WALDMAN, 2015; FÜZESI et al., 2015).

Por outro lado, tais constituintes minerais presentes na biomassa podem influenciar suas reações de conversão térmica para aproveitamento de sua energia (KARAYILDIRIM et al., 2008). Como exemplo, Andrade et al. (2007) explicam que os sais de dióxido de silício e o óxido de potássio, presentes em alguns tipos de biomassa como na casca do arroz, quando em temperaturas superiores a 850°C se fundem formando pequenas barras de material vítreo, que podem causar danos em todo o sistema.

Arvelakis et al. (2003) citam que as cinzas de caldeiras de biomassa, associadas às condições de operação, podem originar graves problemas operacionais. De acordo com Van Loo e Koppejan (2008), os principais problemas causadores de distúrbios operacionais são: aglomeração das partículas de cinza em leito fluidizado, deposição de cinzas no queimador, acúmulo de grandes quantidades de partículas de cinza fundidas e aumento da deposição de cinzas fundidas sobre os permutadores de calor.

De acordo com Nogueira e Rendeiro (2008), altas concentrações de cinzas no material combustível diminuem o poder calorífico da biomassa, podendo causar corrosão em refratários. Além disso, pode causar aglomeração em material particulado quando a temperatura for alta o suficiente para atingir sua fusão, o que geralmente inviabiliza a continuidade do processo ou reduz a eficiência da troca de calor do equipamento.

Outros problemas operacionais também podem surgir em caldeiras de biomassa, como a formação de incrustações (PINTO, 2011). Esse fenômeno é muitas vezes responsável por reduzir a transferência de calor das superfícies do reator e provoca corrosão e erosão, diminuindo a vida útil do equipamento (DEMIRBAS, 2005). De acordo com PINTO (2011), NaCl, KCl, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> presentes nos combustíveis são os principais responsáveis por este problema, causando a

diminuição da temperatura de fusão das cinzas, levando a um aumento da aderência de partículas de cinzas às superfícies do reator, originando as incrustações.

Outro ponto importante a ser observado é a presença de metais pesados na biomassa, uma vez que os níveis de concentração destes elementos podem condicionar a reutilização de suas cinzas (PINTO, 2011).

É grande a importância dada à qualidade da biomassa para queima em caldeiras. De acordo com Foelkel (2016), esses materiais devem passar por diversas etapas antes de serem utilizados como fonte de energia. Normalmente essas etapas são adequação granulométrica, com o objetivo de uniformizar o tamanho das partículas, limpeza, para eliminação de constituintes indesejáveis, secagem, para aumento do poder calorífico, manuseio, transporte e estocagem.

Neste contexto, o objetivo deste capítulo é avaliar a presença de contaminantes em biomassas comercializadas no estado de São Paulo, comparando: cavacos de resíduos madeireiros reprocessados com cavacos de eucalipto.

## **Materiais e Métodos**

### **Materiais**

Para este estudo, foram coletados sete materiais em duas empresas que comercializam biomassa para uso energético no estado de São Paulo (Tabela 4.1). As amostras foram coletadas de acordo com a norma brasileira NBR 10007 (ABNT, 2004). Após a coleta, os materiais foram armazenados em sacos plásticos grossos, vedados, identificados, transportados e armazenados no Laboratório de Química, Celulose e Energia da ESALQ-USP para execução das análises.

Foram coletadas seis amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados e uma amostra de cavacos de eucalipto.

Tabela 4.1 – Materiais utilizados e siglas

<b>Sigla</b>	<b>Material</b>	<b>Empresa</b>	<b>Município</b>
CAV A1	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	A	Sorocaba-SP
CAV A2	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	A	Sorocaba-SP
CAV A3	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	A	Sorocaba-SP
CAV B1	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	B	Embu das Artes-SP
CAV B2	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	B	Embu das Artes-SP
CAV B3	cavaco de resíduos madeireiros reprocessados	B	Embu das Artes-SP
Euca	cavaco de eucalipto	A	Sorocaba-SP

## Métodos

### Avaliação visual da composição da biomassa

Os cavacos de resíduos madeiros reprocessados são compostos por uma grande gama de tipos de componentes. Eles podem incluir resíduos madeiros oriundos de construção civil, painéis, restos de móveis, resíduos de poda urbana, entre outros. Em função disso, concluiu-se que seria importante identificar e quantificar os componentes dessa biomassa. Assim, foi realizada uma análise visual para a identificação e quantificação dos componentes de cada material.

Uma amostra de 20 litros de cada biomassa foi separada. Os diferentes materiais identificados visualmente foram manualmente separados, sendo levados a estufa a  $103\pm 2^\circ\text{C}$  até massa constante. A proporção de cada material identificado foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$PM = \left( \frac{MSm}{MSt} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Em que:

PM = Proporção do material na biomassa avaliada (%);

MSm = Massa seca do material (g);

MSt = Massa seca total da biomassa (g).

### Contaminantes minerais das cinzas

A determinação de contaminantes minerais foi baseada na análise realizada por Andrade (2016) que também estudou material madeiro reprocessado. A análise foi feita mediante determinação dos teores de cinzas das amostras. Para tanto, o teor de cinzas total (minerais de composição e minerais contaminantes) foi determinado segundo a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

Para determinação do teor de minerais de composição foram utilizadas dez gramas de serragem que foi classificada em conjunto de peneiras. Para a análise, foi utilizada a fração que passou pela peneira de 20 mesh e ficou retida na peneira de 40 mesh. As amostras foram colocadas em um béquer de 250 ml, com 200 ml de água destilada. A solução foi agitada por um minuto e deixada em repouso por dois minutos. Na sequência a serragem que se encontrava sobrenadante à solução foi recolhida e colocada para secar até massa constante. Nessa serragem, absolutamente seca, foi então analisado o teor de cinzas segundo procedimento descrito na norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

Considera-se que o teor de cinzas obtido nesta análise seja isento de contaminantes, ou seja, que os minerais que foram adquiridos decantem no béquer durante o ensaio.

A taxa de contamina o foi calculada baseada na equa o descrita por Brito e Ceribelli (2012).

$$Txcont = \frac{Tczt - Tczm}{Tczt} \times 100 \quad (4.2)$$

Em que:

Txcont = Taxa de contamina o (%)

Tczt = Teor de cinzas total (cinzas da madeira + cinzas adquiridas/contaminante) (%)

Tczm = Teor de cinzas da madeira livre de minerais contaminantes (%).

### Determina o de Insolúveis em HCl

Para a determina o do teor de insolúveis em ácido clorídrico (HCl), foram utilizadas as cinzas resultantes da análise do teor de cinzas. Foram adicionados 5 mL de ácido clorídrico 6M na cápsula com as cinzas. Após isso, as cápsulas foram colocadas em chapas de aquecimento até a evapora o total. Outros 5 mL de ácido clorídrico 6M foram adicionados ao resíduo, sendo as cápsulas colocadas em chapa aquecida até o início da fervura. Na sequência, a mistura foi diluída com 20 mL de água destilada e filtrada em papel de filtro quantitativo tarja preta, sendo lavada com 100 mL de água destilada quente. O filtro contendo o resíduo insolúvel foi colocado na cápsula para queima na mufla a  $575 \pm 25^\circ\text{C}$  por 2 horas. O resíduo foi pesado para cálculo do teor de insolúveis em HCl conforme a equa o abaixo:

$$TI = \frac{\frac{Mi - TARA}{MS} \times 100}{10.000} \quad (4.3)$$

Em que:

TI: teor de insolúveis em HCl (mg/kg);

Mi: massa residual + tara da cápsula (g);

TARA: tara da cápsula utilizada (g);

Ms: massa seca da amostra utilizada no ensaio (g).

### Determinação dos teores de cálcio e ferro

Os teores de cálcio e ferro foram determinados nas amostras através de espectrofotometria de absorção atômica (PerkinElmer AAnalyst 400). Para todas estas análises foram utilizadas as cinzas resultantes da análise do teor de cinzas. Foram adicionados 5 mL de ácido clorídrico 6M na cápsula com as cinzas. Após isso, as cápsulas foram colocadas em chapas de aquecimento até a evaporação total. Outros 5 mL de ácido clorídrico 6M foram adicionados ao resíduo, sendo as cápsulas colocadas em chapa aquecida até o início da fervura. Na sequência, a mistura foi diluída com 20 mL de água destilada e filtrada em papel de filtro quantitativo tarja preta tarado, sendo o filtrado recuperado em balão volumétrico de 100 mL. Após o filtrado ter esfriado, o volume do balão foi completado com água destilada. Para a leitura no espectrofotômetro, foi utilizado o software WinLab32 for AA, acoplado ao equipamento. A altura do queimador foi ajustada de acordo com o metal analisado e o equipamento calibrado conforme padrões solicitados pelo software, considerando os padrões específicos para cada elemento. Na sequência foi realizada a leitura, sendo os teores de cálcio e ferro calculados conforme a equação abaixo:

$$T_m = \frac{L \times V_b}{M_s} \quad (4.4)$$

Em que:

T<sub>m</sub>: Teor de cálcio ou ferro (mg/kg);

L: Leitura do metal no espectrofotômetro (mg/kg);

V<sub>b</sub>: Volume do balão volumétrico (mL);

M<sub>s</sub>: Massa seca da amostra (g).

### Determinação dos teores de sódio e potássio

A determinação dos teores de sódio e potássio foi realizada através de fotometria de chama (Micronal B642), tendo sido utilizadas as cinzas resultantes da análise do teor de cinzas. Foram adicionados 5 mL de ácido clorídrico 6M na cápsula com as cinzas. Após isso, as cápsulas foram colocadas em chapas de aquecimento até a evaporação total. Outros 5 mL de ácido clorídrico 6M foram adicionados ao resíduo, sendo as cápsulas colocadas em chapa aquecida até o início da fervura. Na sequência, a mistura foi diluída com 20 mL de água destilada e filtrada em papel de filtro quantitativo tarja preta tarado, sendo o filtrado recuperado em balão volumétrico de 100 mL. Após o filtrado ter esfriado, o volume do balão foi completado com água destilada. Para a leitura no fotômetro, procedeu-se a calibração do equipamento considerando os padrões específicos para

cada elemento. Na sequência foi realizada a leitura, sendo os teores de sódio e potássio calculados conforme a equação abaixo:

$$T_m = \frac{L \times V_b}{M_s} \quad (4.5)$$

Em que:

T<sub>m</sub>: Teor de sódio e potássio (mg/kg);

L: Leitura do metal no fotômetro (mg/kg);

V<sub>b</sub>: Volume do balão volumétrico (mL);

M<sub>s</sub>: Massa seca da amostra (g).

### **Determinação dos teores de cloretos e sulfatos**

A determinação dos teores de cloretos e sulfatos foi realizada através de cromatografia iônica (Metrohm 863). Para tal, as amostras foram moídas em moinhos de facas e classificadas em conjunto de peneiras, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 20 mesh e ficou retida na peneira de 40 mesh. Desta fração foram pesados cerca de 0,5 g de serragem em béquer de 100 mL. A serragem foi diluída com água ultrapura e transferida para um balão de 1.000 mL, que foi avolumado e colocado em banho ultrassônico por 10 minutos. A solução foi mantida em repouso por 24 horas e, após esse tempo, foi filtrada em conjunto de filtração com membrana de fibra de vidro, sendo o filtrado transferido para o vial de 20 mL, que foi inserido no amostrador automático do cromatógrafo. Os registros das concentrações de sódio, potássio, cloretos e sulfatos foram coletados por um software (Magic Net) acoplado ao cromatógrafo. O cálculo dos teores destes componentes foi realizado de acordo com a equação abaixo:

$$T_c = \frac{L \times V_b}{M_s} \quad (4.6)$$

Em que:

T<sub>c</sub>: Teor de cloretos ou sulfatos (mg/kg);

L: Leitura do cromatógrafo (mg/kg);

V<sub>b</sub>: Volume do balão volumétrico (mL);

M<sub>s</sub>: Massa seca da amostra (g).



## Análise Estatística

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado e todas as análises foram feitas com 5 repetições. Para análise dos dados foram realizadas análises de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas através do programa Minitab 17 Statistical Software.

## Resultados e Discussão

Os resultados da análise visual das amostras avaliadas são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Análise visual dos componentes de cada material analisado – CAV A

<b>Material</b>	<b>Madeira sólida (%)</b>	<b>Casca (%)</b>	<b>Compensado (%)</b>	<b>MDF (%)</b>	<b>Aglomerado (%)</b>	<b>Total (%)</b>
CAV A1	34,6	-	12,2	18,8	34,4	100
CAV A2	44,8	11,1	15,2	17,4	11,5	100
CAV A3	93,8	-	2,2	2,3	1,7	100
CAV B1	51,1	-	11,7	26,5	10,7	100
CAV B2	66,1	-	13,2	6,9	13,9	100
CAV B3	46,6	-	31,4	13,3	8,7	100
Euca	77,2	22,8	-	-	-	100

É possível observar que as amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados apresentam grande variação em suas composições. Porém, todos esses materiais possuem a madeira sólida como principal componente, sendo possível encontrar também diversos materiais, como compensado, MDF e aglomerado. A casca está presente em apenas uma das seis amostras de cavacos de resíduos madeireiros reprocessados.

O material CAV A3 destaca-se por apresentar a maior proporção de madeira sólida (93,8%) dentre todas as amostras avaliadas. Já a amostra de eucalipto apresenta em sua composição apenas madeira sólida e casca.

Os resultados das análises de teor de cinzas totais, cinzas do material, cinzas contaminantes e taxa de contaminação externa são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Teor de cinzas totais, cinzas do material, cinzas contaminantes e taxa de contaminação externa

Material	Valores médios (%)							
	TCzt		TCzm		TCzcont		Txcont	
CAV A1	0,97 b	(0,08)	0,53 b	(0,27)	0,43 b	(0,19)	45,99 abc	(23,25)
CAV A2	0,80 b	(0,17)	0,55 b	(0,32)	0,25 b	(0,21)	33,63 bcd	(27,66)
CAV A3	0,33 b	(0,09)	0,25 b	(0,07)	0,08 b	(0,02)	23,31 bcd	(2,95)
CAV B1	1,59 ab	(0,47)	1,45 a	(0,52)	0,15 b	(0,06)	10,22 cd	(5,53)
CAV B2	1,06 b	(0,06)	1,03 ab	(0,05)	0,03 b	(0,01)	3,23 d	(0,98)
CAV B3	4,15 a	(2,40)	0,66 ab	(0,38)	3,49 a	(2,03)	84,19 a	(0,47)
Euca	0,77 b	(0,13)	0,36 b	(0,03)	0,41 b	(0,14)	51,79 ab	(9,94)

TCzt: Teor de cinzas total. TCzm: Teor de cinzas do material sem contaminante. TCzcont: teor de cinzas contaminantes. Txcont: Taxa de contaminação externa. Valores entre parênteses ( ) correspondem ao desvio padrão da análise. As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Os resultados apresentados na tabela 4.3 mostram que há grande variação nas taxas de contaminação externa dos diferentes materiais avaliados. De acordo com Andrade (2016), esses resultados refletem a proporção dos minerais presentes nos materiais que são provenientes de fontes externas. O mesmo autor cita que altos valores de contaminação externa podem estar relacionados à utilização dos materiais em serviço, como por exemplo em construção civil, sendo que, dentre os possíveis contaminantes, podem estar cimentos, argamassas e terra. Os cavacos reprocessados apresentaram taxa de contaminação externa variável entre 3,23 e 84,19%. A grande variação nestes resultados confirma a grande heterogeneidade destes materiais entre si que, apesar de serem comercializados como um mesmo material, podem ser provenientes de materiais utilizados para diferentes fins e, além disso, ser compostos por diferentes proporções de madeira, casca, compensado, MDF e aglomerado.

De acordo com McKendry (2002), o teor de cinzas da biomassa influencia tanto no manuseio quanto nos custos de processamento da conversão global de biomassa em energia, dessa forma, a energia disponível no combustível é reduzida proporcionalmente à magnitude do teor de cinzas. Pode-se dizer então que é desejável um material com baixo teor de cinzas, ou seja, com o mínimo de impurezas para uso como combustível. Dentre os materiais avaliados, CAV B3 é o que apresenta o maior teor de cinzas totais, o que é explicado pela alta taxa de contaminação externa. Ou seja, mais de 84% dos minerais presentes nesta amostra são provenientes de fontes externas.

A única amostra de eucalipto avaliada destaca-se por apresentar o menor teor de cinzas sem contaminantes (0,36%). Estes valores estão próximos aos encontrados na literatura para a

madeira de eucalipto. Considerando a madeira de *E. grandis* x *E. urophylla*, Segura (2015) encontrou um teor de 0,24% de cinzas, enquanto Vivivan (2015) reporta um valor de 0,21% para este parâmetro. Avaliando resíduos de colheita de *E. grandis*, Santos (2012) encontrou um valor de 0,5% para cinzas neste material.

Apesar do mais baixo teor de cinzas, a amostra de eucalipto apresentou alta taxa de contaminação externa (51,79%). Essa contaminação pode estar relacionada a resíduos da colheita, como areia, terra, e também à presença de casca, que traz consigo esse tipo contaminação do campo.

Dentre os cavacos reprocessados avaliados, observa-se que aqueles coletados na empresa B apresentam maiores teores de cinzas em comparação aos materiais comercializados pela empresa A. A mesma tendência foi observada para os teores totais de cinzas.

Avaliando diferentes resíduos sólidos urbanos para uso energético, Andrade (2016) encontrou os maiores teores de cinzas totais para compensado (2,09%), MDF (1,77%) e chapa (1,76%), e os menores teores de cinzas para madeira maciça (0,89). As maiores taxas de contaminação externa foram encontradas para aglomerado (25,1%) e compensado (22,96%), enquanto os menores valores para este parâmetro foram observados para MDF (10,12%) e OSB (11,84%).

A figura 4.2 apresenta os resultados de insolúveis em HCl nas amostras avaliadas.

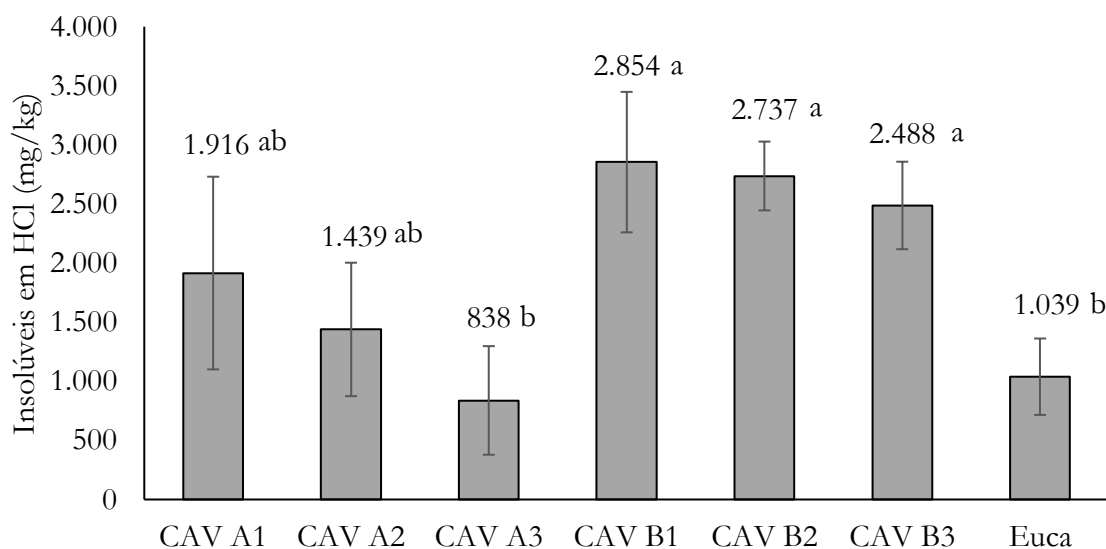


Figura 4.2 – Insolúveis em HCl nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

De acordo com Cardoso (2014), a análise do teor de insolúveis em ácido clorídrico (HCl) nas cinzas tem o objetivo de determinar a quantidade de sílica e impurezas presentes nos materiais

estudados. No presente estudo, dentre os materiais reprocessados, os maiores teores de compostos insolúveis em ácido clorídrico foram encontrados para a empresa B em comparação aos materiais da empresa A, seguindo a tendência observada para os teores de cinzas.

A única amostra de eucalipto avaliada apresentou 1.039 mg/kg de insolúveis em HCl, valor acima apenas daquele observado para a amostra CAV A3, que se destaca como o material com menor teor de insolúveis em HCl. Essa característica pode estar relacionada ao fato deste material apresentar grande proporção de madeira sólida em sua composição, conforme discutido anteriormente.

O teor de cálcio nos materiais analisados é apresentado na figura 4.3.

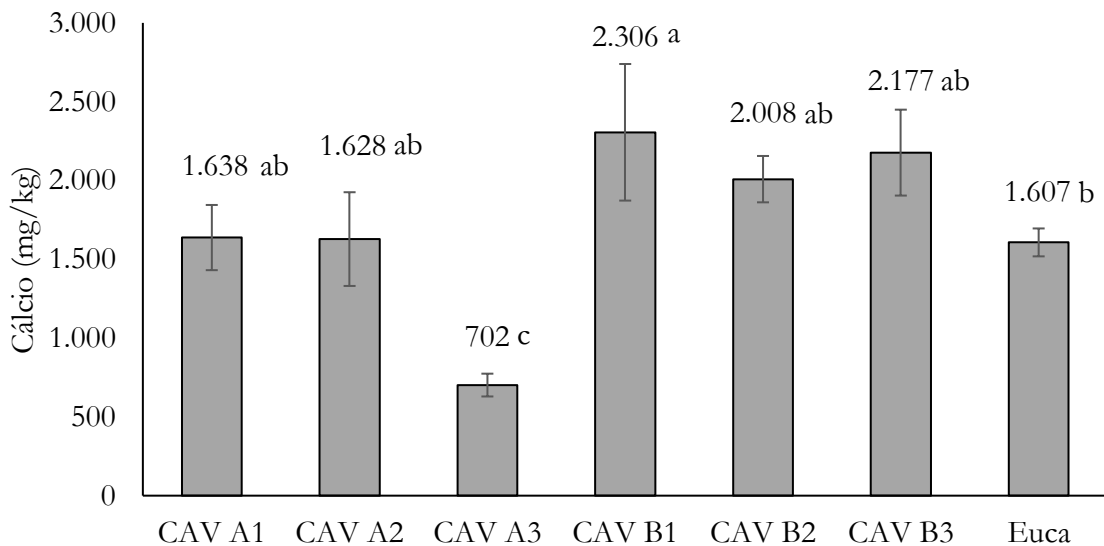


Figura 4.3 – Concentração de cálcio nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Os cavacos reprocessados da empresa B são os materiais que apresentaram os maiores teores de cálcio. Já os materiais CAV A1 e CAV A2 apresentaram concentrações de cálcio muito similares à concentração nos cavacos de eucalipto, enquanto o material CAV A3, que apresenta o maior teor de madeira sólida dentre todas as amostras avaliadas, foi o que apresentou a menor quantidade deste mineral. De acordo com Foelkel (2005), a madeira de eucalipto apresenta de 400 a 2.000 mg/kg de cálcio. Já Andrade et al. (2011), avaliando a madeira e a casca de dez espécies e clones de eucalipto, encontraram valores de cálcio variando de 133 a 567 mg/kg na madeira e de 13.917 a 34.433 mg/kg na casca, comprovando que a maior concentração deste nutriente está na casca das árvores.

Segundo Simonete et al. (2013), o cálcio é o segundo nutriente mais absorvido pela maioria das espécies florestais. De acordo com Santana et al. (2008), cerca de 75% do cálcio é exportado do sítio no momento da colheita o que ocasiona, além da alta concentração deste componente na madeira, potencial deficiência deste nutriente no solo.

De acordo com Sampaio (2014), a presença de altas concentrações de cálcio na biomassa pode causar deposições e corrosões no interior do equipamento de combustão, sendo assim fundamental seu monitoramento rigoroso nos combustíveis empregados.

De acordo com Pinto (2011), o cálcio está entre os principais elementos inorgânicos responsáveis pela formação de aglomerados em caldeiras de leito fluidizado, sendo que a presença deste composto nas cinzas contribui para o aumento da temperatura de fusão das mesmas.

Os teores de ferro presentes nas biomassas avaliadas são apresentados na figura 4.4.

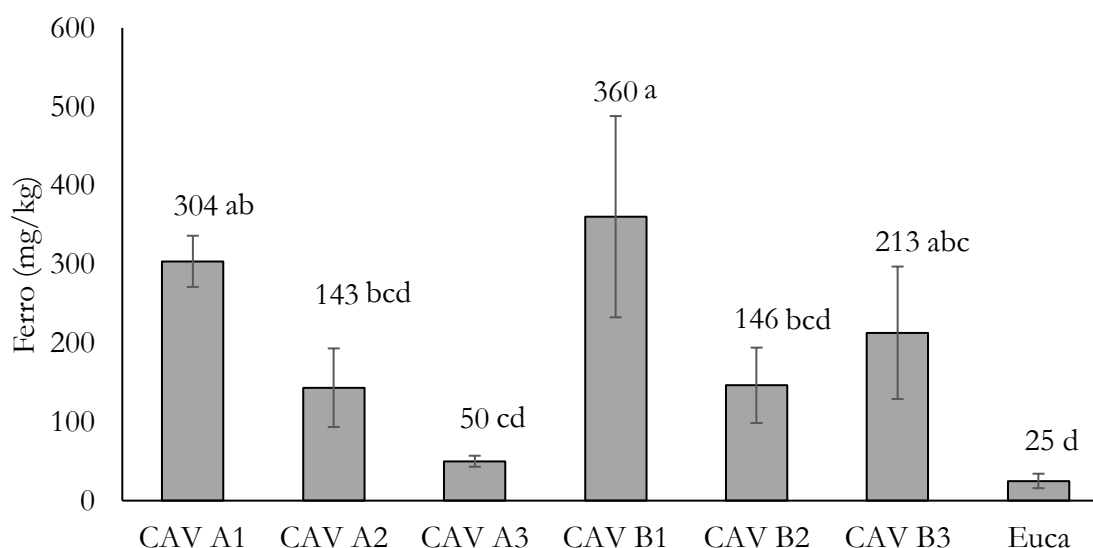


Figura 4.4 – Concentração de ferro nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

É possível observar grande variabilidade no teor e ferro dos materiais avaliados, com variação de 25 a 360 mg/kg. O material CAV B1 destaca-se por apresentar o maior teor de ferro, enquanto o eucalipto é o material com menor teor deste metal. Dentre os cavacos reprocessados, CAV A3 é o que apresenta o menor teor de ferro. Este fato pode relacionado à composição deste material, com alto teor de madeira sólida.

O teor de ferro observado para a amostra de eucalipto avaliada neste trabalho está de acordo com o que é descrito na literatura. De acordo com Foelkel (2005), a madeira de eucalipto apresenta de 5 a 90 mg/kg de ferro em sua composição, Andrade et al. (2011) relatam valores de 20 a 57 mg/kg em madeiras desta espécie.

Dentre os materiais reprocessados, CAV A3, com maior proporção de madeira sólida, apresenta o menor teor de ferro (50 mg/kg), enquanto CAV B1 apresenta o maior teor deste metal (360 mg/kg). A presença de ferro nos materiais reprocessados pode estar relacionada também a contaminantes externos metálicos, como pregos, parafusos e grampos, conforme reportado por Andrade (2016) que, avaliando diversos resíduos sólidos urbanos, identificou a presença destes materiais em madeira maciça, aglomerado, chapa, compensado, MDF e OSB. No presente trabalho estes contaminantes não foram identificados visualmente, porém vale ressaltar que a avaliação foi realizada em materiais já reprocessados, ou seja, materiais metálicos fragmentados pela ação mecânica do reprocessamento e picagem podem estar presentes nas amostras coletadas.

Os teores de sódio são apresentados na figura 4.5.

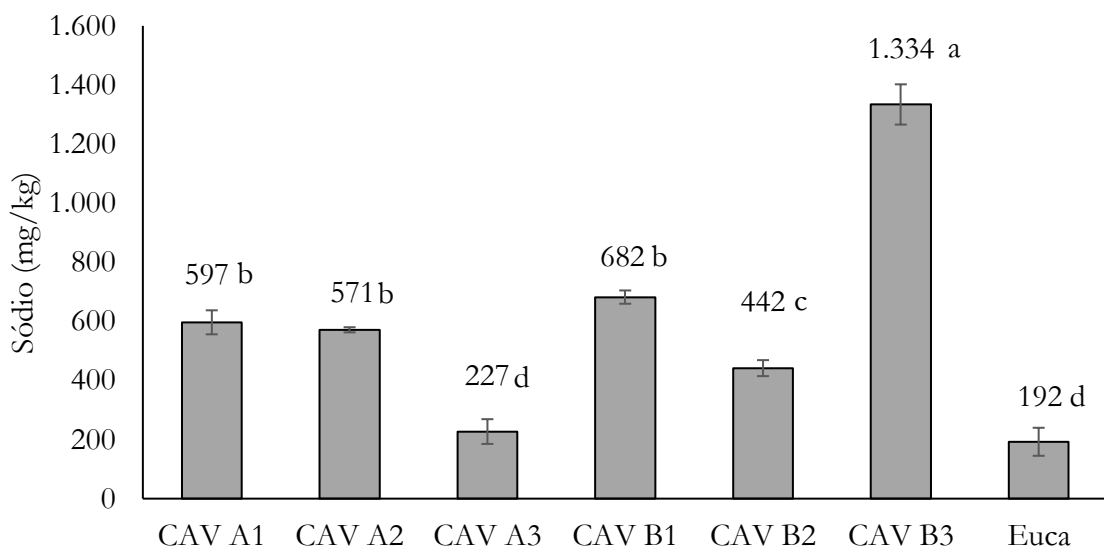


Figura 4.5 – Concentração de sódio nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

O maior teor de sódio foi encontrado para CAV B3 (1.334 mg/kg), enquanto os demais materiais reprocessados apresentaram teores entre 192 a 682 mg/kg. Esse material apresenta em sua composição o maior teor de compensado dentre todos os materiais avaliados. Assim como ocorreu com outros compostos, o material CAV A3, que apresenta alto teor de madeira sólida, é o material reprocessado que apresentou o menor teor de sódio. Já a madeira de eucalipto, utilizada como base de comparação, apresentou 192 mg/kg deste composto, de acordo com o que é citado na literatura. De acordo com Foelkel (2005), a madeira de eucalipto apresenta de 80 a 600 mg/kg de sódio, enquanto Andrade et al. (2011) relatam valores de 137 a 393 mg/kg deste metal para este tipo de madeira.

A salinidade é definida como a situação de excesso de sais solúveis e/ou sódio no solo, afetando negativamente o desenvolvimento vegetal por reduzir a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas (SCHOSSLER, 2012). De acordo com Pedrotti et al. (2015), a salinidade relaciona-se com a formação dos solos, produto da intemperização das rochas, mas também pode estar relacionada à ação humana, sobretudo em ambientes de elevada evapotranspiração e baixa precipitação pluviométrica, manifestando-se de forma mais acentuada nessas áreas em decorrência do manejo inadequado da irrigação. Segundo os autores, a salinidade é um problema que atinge 19,5% dos 230 milhões de hectares da área irrigada em todo o mundo.

De acordo com Sampaio (2014), a presença de sódio em um material a ser queimado para a geração de energia potencializa a preocupação com as emissões de poluentes e a integridade do equipamento devido à formação de compostos corrosivos. O autor também cita que a presença de óxidos de sódio e potássio nas cinzas torna o ambiente do leito de uma caldeira alcalino, o que reduz as temperaturas de fusibilidades e aumenta o risco de aglomeração.

A figura 4.6 apresenta os teores de potássio nos materiais avaliados.

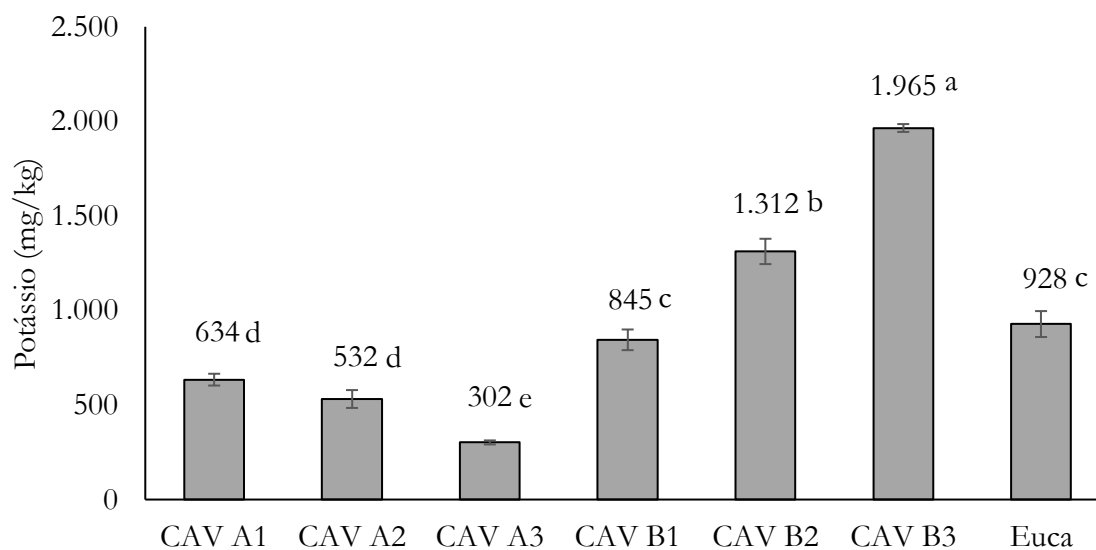


Figura 4.6 – Concentração de potássio nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

O material CAV B3, material que possui a maior proporção de compensados em sua composição, apresenta o maior teor de potássio dentre os materiais avaliados, tendo sido uma tendência um maior teor deste componente nas amostras da empresa B (845 a 1.965 mg/kg) em comparação à empresa A (302 a 634 mg/kg). Já os cavacos de eucalipto apresentaram 928 mg/kg de potássio em sua composição, valor relativamente alto se comparado aos materiais reprocessados.

Porém, esse valor está de acordo com o que é descrito por Foelkel (2005), que indica que a madeira de eucalipto apresenta de 600 a 2.000 mg/kg de potássio em sua composição.

Assim como no caso do sódio, a queima de biomassa com a presença de potássio gera um ambiente muito corrosivo, podendo causar sérios problemas para os materiais dos tubos da caldeira. De acordo com Jacome (2014), o potássio é um dos mais influentes elementos no estudo das incrustações e fusibilidade de cinzas. De acordo com Tortosa Masiá et al. (2007), esse elemento é vaporizado e se decompõe durante a combustão, permitindo a formação de óxidos, hidróxidos, sulfatos e cloretos. Esses compostos formados se caracterizam pela baixa temperatura de fusão, ou seja, seu impacto nas incrustações dependerá da pressão de vapor e temperatura de condensação.

De acordo com Foelkel (2011), os depósitos mais comuns que ocorrem no interior das caldeiras e são de sais de potássio e de cloretos, que formam misturas com outros sais e entopem a caldeira devido ao menor ponto de fusão das cinzas depositadas. Essas cinzas se fundem e depois se solidificam, formando pedras que prejudicam os fluxos de gases no interior do equipamento.

Sampaio (2014) cita que o potássio geralmente faz parte da composição de biomassas como consequência da utilização de fertilizantes em plantios. Ao reagir durante a combustão da biomassa, o potássio pode se depositar sobre a superfície da caldeira, interferindo na troca térmica e na eficiência global do equipamento.

Os teores de cloretos nas biomassas avaliadas são apresentados na figura 4.7, enquanto os teores de sulfatos podem ser observados na figura 4.8.

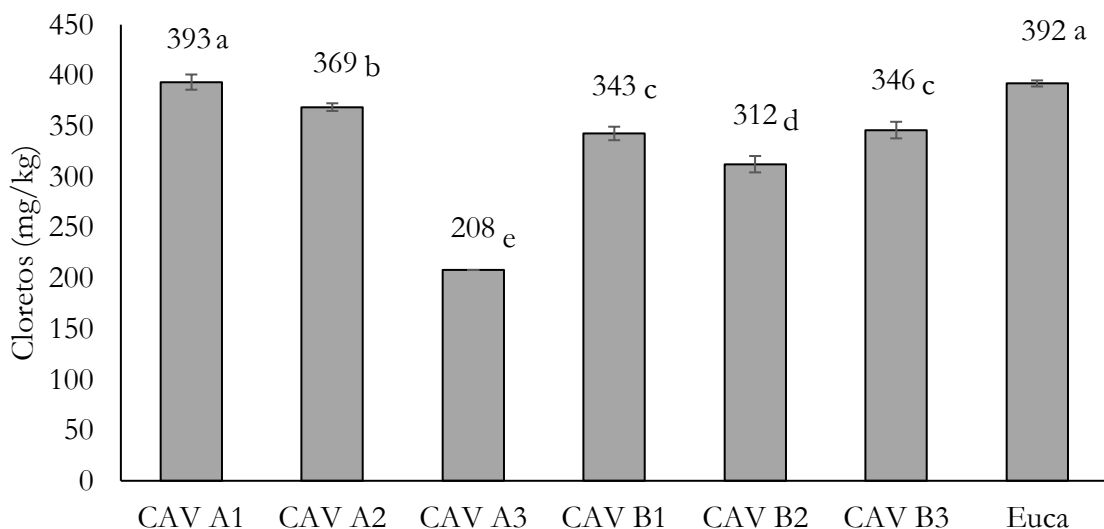


Figura 4.7 – Concentração de cloretos nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )



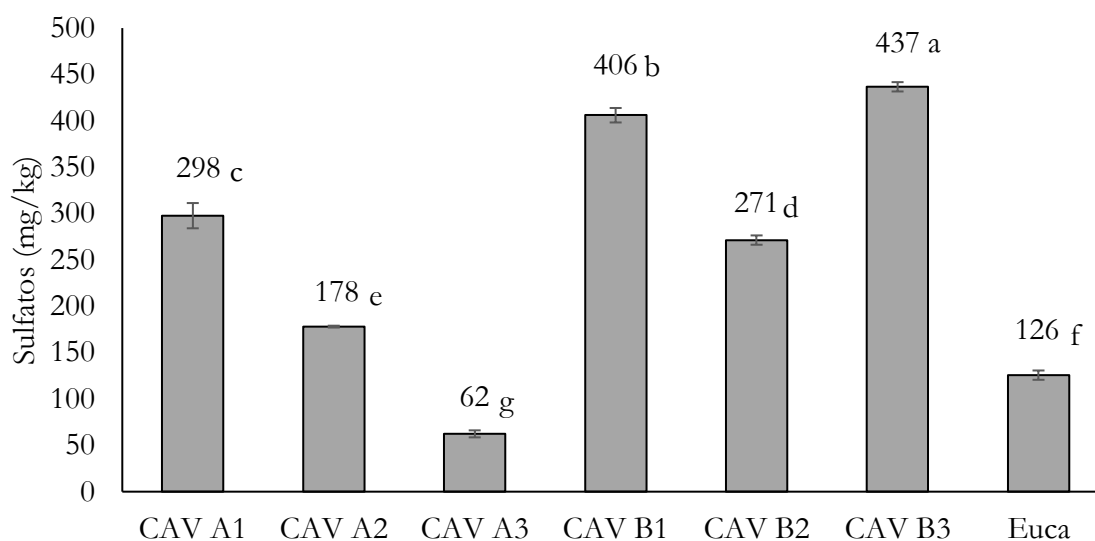


Figura 4.8 – Concentração de sulfatos nos materiais analisados

As médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, de acordo com o Teste de Tukey ( $\alpha=0,05$ )

Os resultados apresentados nas figuras 4.7 e 4.8 representam os teores dos cloretos e sulfatos de diversos metais presentes nas biomassas avaliadas, respectivamente. Segundo Foelkel (2011), o íon cloreto apresenta reconhecido papel corrosivo, desgastando equipamentos e reduzindo a vida útil de caldeiras. O mesmo autor cita que cinzas contendo os sais de cloreto de potássio e sódio possuem temperaturas de fusão entre 520 a 625°C. Quando as cinzas se fundem devido a essas temperaturas mais baixas de fusão, passa a ocorrer a pegajosidade, criando condições para a maior deposição de cinzas sólidas e formação de pedras no interior da caldeira.

Dentre os materiais avaliados, CAV A3 destaca-se por apresentar os menores teores de cloretos (208 mg/kg) e sulfatos (62 mg/kg) dentre todos os materiais. As demais amostras de cavacos reprocessados atingiram níveis de cloretos muito próximos à madeira de eucalipto (312 a 393 mg/kg). Com relação aos sulfatos, o eucalipto apresentou taxas menores deste componente em comparação aos materiais reprocessados (126 mg/kg), exceção feita ao material CAV A3. Os demais materiais reprocessados avaliados apresentaram de 178 a 437 mg/kg de sulfatos.

As temperaturas de fusão de diversos sais formados em caldeiras são apresentadas na tabela 4.9.

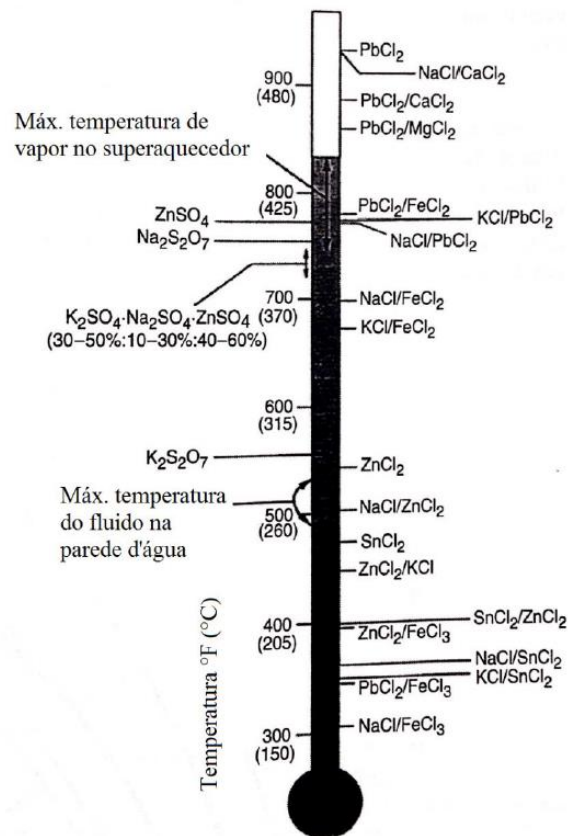


Figura 4.9 – Temperaturas de fusão de diversos sais formados em caldeiras  
Fonte: Sampaio (2014)

A figura 4.9, extraída do trabalho de Sampaio (2014), demonstra que muitos sais, sobretudo cloretos metálicos, podem se fundir em temperaturas típicas de operação das caldeiras de biomassa, com destaque para a faixa entre 370 e 480°C, quando haverá mais sais de cloreto que se tornarão fundidos, resultando em mais ataques corrosivos. Alguns sais de sulfatos apresentam temperaturas de fusão superiores àquelas observadas para sais de cloretos, porém ainda dentro da faixa de atuação das caldeiras, o que torna a presença destes compostos crítica para o correto funcionamento dos equipamentos.

## Conclusões

Os resultados apresentados neste capítulo permitem concluir que há grande variação na concentração de contaminantes nas biomassas reprocessadas avaliadas. As coletas foram realizadas em duas empresas, denominadas A e B, sendo clara a tendência de menor contaminação nos materiais comercializados pela empresa A.

As biomassas reprocessadas e comercializadas pela empresa B apresentam maior potencial corrosivo em equipamentos dedicados à queima destes materiais, se comparados aos

materiais comercializados pela empresa A e à madeira de eucalipto, utilizada como referência tecnológica neste trabalho. Comparando os materiais da empresa A ao eucalipto, há grande similaridade, com alguns parâmetros sendo mais críticos nos materiais reprocessados e outros na madeira de eucalipto.

Dentre todos os materiais reprocessados avaliados, aquele denominado de CAV A3 apresenta o menor potencial corrosivo, com baixos teores de cinzas, cálcio, ferro, sódio, potássio, cloretos e sulfatos em sua composição. Este material destaca-se por apresentar o maior teor de madeira sólida dentre todos os materiais avaliados, o que pode explicar sua característica de menor corrosividade.

Pôde-se observar que biomassas comercializadas como um único produto por uma mesma empresa podem apresentar variações significativas de contaminação com agentes externos ou da composição destes materiais. Tais contaminações podem ser prejudiciais à integridade dos equipamentos envolvidos no processo de queima da biomassa, sobretudo as caldeiras, e, desta forma, recomenda-se criteriosa seleção e controle de qualidade das biomassas utilizadas, buscando minimizar os possíveis impactos negativos causados por suas utilizações.

## Referências

- ANDRADE, C. R. Tratamento térmico da madeira contida nos resíduos sólidos urbanos visando sua adequação para uso energético. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016. 88 p.
- ANDRADE, R. V.; LORA, E. S. L.; MELO, B. A.; SALES, C. S. V. B., GOMEZ, E. O. Gaseificação de biomassa em leito fluidizado: avaliação de um reator operando com casca de arroz como combustível. In: Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, 8., 2007, Cusco. Anais... Cusco: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2007. 8p.
- ANDRADE, M. C. N.; MINHONI, M. T. A.; SANSÍGOLO, C. A.; ZIED, D. C.; SALES-CAMPOS, C. Estudo comparativo da constituição nutricional da madeira e casca de espécies e clones de eucalipto visando o cultivo de shitake em toras. Revista *Árvore*, Viçosa, v. 35, n. 2, p.183-192, 2011.
- ARAÚJO, E. F.; SANTANA, M. A. M.; SOUZA, A. J. Determinação da demanda nutricional de genótipos de *Eucalyptus* em áreas da Bahia Sul Celulose. Relatório Final, COTEC – 087/01, 19p, 2001.
- ARVELAKIS, S.; GEHRMANN, H.; BECKMAN, M.; KOUKIOS, E. Studying the ash behaviour of agricultural residues using thermal analysis. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, v.72, p. 1019-1030, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112: análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986. 5p.

- \_\_\_\_\_. NBR 10.007: 2004: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 25p.
- BRITO, J. O.; CERIBELLI, U. L. Determinação de contaminantes sólidos não combustíveis em biomassa: Procedimento de Avaliação. 2. Piracicaba: USP/ESALQ. 2012.
- CACURO, T. A.; WALDMAN, W. R. Cinzas da queima de biomassa: aplicações e potencialidades. Rev. Virtual Quim., Niterói, v.7, n.6, p. 2154 – 2165, 2015.
- CARDOSO, M. F. Utilização de resíduos da queima de biomassa para a produção de argamassa. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2014.
- DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. Progress in Energy and Combustion Science, Oxford, v. 31, n. 2, p. 171-192. 2005
- FOELKEL, C. E. B. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2005. 133 p. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em: 12/08/2019.
- \_\_\_\_\_. Os eucaliptos e os elementos não processuais na fabricação de celulose kraft. Eucalyptus Online Book and Newsletter, 2011. 122 p. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em 14/03/2017.
- \_\_\_\_\_. Utilização da Biomassa do Eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. Eucalyptus Online Book and Newsletter, capítulo 43, 2016. Disponível em: <<http://www.eucalyptus.com.br>>. Acesso em 05/03/2017.
- FÜZESI, I.; HEIL, B.; KOVÁCS, G. Effects of wood ash on the chemical properties of soil and crop vitality in small plot experiments. Acta Silv. Lign. Hung., v. 11, n. 1, p. 55-64, 2015.
- GONÇALVES, J. L. M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. Documentos Florestais, Piracicaba, n.15, p. 1-23, 1995.
- GONZALEZ, A. D. Caracterização e análise comparativa de cinzas provenientes da queima de biomassa. 2014. 70 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- JACOME, D. L. F. Caracterização físico-química das cinzas de palha de cana-de-açúcar através de análises térmicas simultâneas (STA). 2014. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.
- KARAYILDIRIM, T.; SINAG, A.; KRUSE, A. Cahr and coke formation as unwanted side reaction of the hydrothermal biomass gasification. Chemical Engineering Technology, Weinheim, v. 31, n.11, p. 1-9, 2008.
- LOPES, F. P.; PEREIRA, P. M.; HAMAYA, R. M. Análise da contaminação em resíduos de madeira na construção civil. 2013. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

- McKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.
- NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. In: BARRETO, E. J. F. *Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.
- OLIVEIRA, S.A.; MORAES, M.L.T.; BUZETTI, S. Efeito da aplicação de NPK e micronutrientes no desenvolvimento de *Eucalyptus citriodora* Hook. *Floresta (UFPR. Impresso)*, Curitiba, v. 29, n.1/2, p. 27-36, 2000.
- PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A. T.; SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1308-1324, 2015.
- PINTO, J. C. F. Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Aveiro. Aveiro, 2011. 109 p.
- SAMPAIO, R.P. Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014. 162p.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. *R. Brasl. Ci. Solo*, Viçosa, v. 32, n. esp., p. 2723-2733, 2008.
- SANTOS, J. R. S. Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2012. 85 p.
- SCHOSSLER, T. R.; MACHADO, D. M.; ZUFFO, A. M.; ANDRADE, F. R.; PIAUILINO, A. C. Salinidade: Efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 1563-1578, 2012.
- SEGURA, T. E. S. - Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose Kraft branqueada. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2015. 198 p.
- SILVEIRA, R.L.V.A. Características da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden cultivadas em solução nutritiva. 2000. 169 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.
- SIMONETE, M. A.; CHAVES, D. M.; TEIXEIRA, C. F. A.; MORO, L.; NEVES, C. U. Fornecimento de cálcio para plantas de *Eucalyptus saligna* por meio de aplicação de resíduo industrial de lama de cal. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1343-1351, 2013.
- STAHL, J. Resposta inicial de *Eucalyptus* spp. Á adubação fosfatada e potássica no planalto sul catarinense. 2009. 69 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade do estado de Santa Catarina, Lages, 2009.

- TOLMASQUIM, M. T. Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 515 p.
- TORTOSA MASIÁ, A. T.; BUHRE, B.; GUPTA, R.; WALL, T. Characterising ash of biomass and waste. *Fuel Processing Technology*, v.88, n. 11/12, pp.1071-1081, 2007.
- VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Londres: Earthscan, 2008. 442 p.
- VIVIAN, M. A. Aumento da eficiência do processo kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto. 2015. 125 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.



## CONSIDERAÇÕES GERAIS

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, é possível concluir que a utilização de materiais recuperados como biomassa representa uma alternativa ambientalmente adequada para empresas ou municípios que necessitem descartar resíduos madeireiros. Tais materiais, alternativos às biomassas provenientes de florestas plantadas de eucalipto, notadamente cavacos reprocessados e cavacos de palete, apresentam potencial para uso energético. Apesar disso, algumas características destes materiais demandam especial atenção visando ao seu melhor aproveitamento.

Os materiais provenientes de resíduos madeireiros apresentam grande heterogeneidade em algumas de suas principais características tecnológicas, com variações muitas vezes significativas ao longo do tempo. Além disso, a presença de contaminantes nocivos aos processos de conversão destas biomassas e também aos equipamentos utilizados, é mais pronunciada nos materiais reprocessados em comparação aos cavacos de eucalipto.

Com isso, é recomendada uma criteriosa seleção e controle de qualidade das biomassas utilizadas para geração de energia, com o objetivo de minimizar os possíveis impactos negativos causados pela utilização destes materiais, aproveitando ao máximo o grande potencial tecnológico desses materiais recuperados.

De acordo com o estudo realizado, algumas recomendações podem ser oferecidas, no sentido de contribuição para o aprimoramento da qualidade do material final, como por exemplo: o melhor controle na afiação das facas dos picadores, a classificação do material mediante peneiramento e melhorias estruturais nos depósitos de armazenamento dos produtos para redução da contaminação.