



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**HECTOR JESUS PEGORETTI LEITE DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE EUCALIPTO E RESÍDUOS DA  
DESPOLPA DO CAFÉ**

**ORIENTADORA Prof<sup>a</sup>. D. Sc. MARINA DONÁRIA CHAVES ARANTES  
COORIENTADORA Prof<sup>a</sup>. D. Sc. GRAZIELA BAPTISTA VIDAURRE**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES  
JULHO - 2016

**HECTOR JESUS PEGORETTI LEITE DE SOUZA**

**CARACTERIZAÇÃO DE *PELLETS* DE EUCALIPTO E RESÍDUOS DA  
DESPOLPA DO CAFÉ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

JULHO - 2016

Dedico este trabalho à minha família, à minha esposa Maricarmen Maola, aos meus pais, João e Diva, e aos meus irmãos, Mariana e Daniel. Também a mi otra familia, mis padres, Mariela y Luis, mis hermanos, Luis Miguel, Fernando Miguel, Luisa Mariela (Luis Fernando, Gabriel e Isidro Jesus, que Dios los tenga en su Santa Gloria isto é por vocês, pelo apoio, pela educação, pelo carinho, pelo incentivo em todos os momentos para seguir em frente e pela fortuna de ter duas famílias maravilhosas.

“Aprendi que a coragem não é a ausência do medo, mas o triunfo sobre ele. O homem corajoso não é aquele que não sente medo, mas o que conquista esse medo”

Nelson Mandela.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, pois sem ele eu não chegaria neste ponto, já que ele é um pilar fundamental.

À Universidade Federal do Espírito Santo e ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Universidade Federal de Goiás, pelo suporte na fabricação dos *pellets*.

À Universidade Federal de Viçosa, pelo suporte nas análises dos *pellets*.

À Fibria Celulose S.A., pela bolsa concedida e pelo material de pesquisa.

À minha querida orientadora, Marina Donária Chaves Arantes, pela dedicação, paciência, amizade, dentro e fora da parte acadêmica, e também pela atenção e por sempre acreditar que eu seria capaz.

À minha coorientadora, Graziela Baptista Vidaurre, pela amizade, pela disponibilidade, pela colaboração e pelo valioso apoio.

Ao professor e amigo, Thiago de Paulo Protásio, pela ajuda, pela disponibilidade e pelos conselhos.

À professora e amiga, Cassia Carneiro, por sempre estar disposta a ajudar, com seu otimismo e aquela alegria que transmite.

Ao professor Laércio Couto, por não ter medido esforços para me ajudar, pela amizade, pelo apoio, pela troca de informações, por ter participado da banca examinadora e por contribuir positivamente para a realização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (UFES), pelos ensinamentos, e aos funcionários dos laboratórios (Química e biomassa da madeira), que me auxiliaram no preparo do material, Elecy, Gilson, Luciano, José Geraldo (SÉ).

Aos colegas e amigos Carlos Dambroz, Alexandre Arantes, Dercilio Verly, Victor Brocco, Brunella Rodrigues, Suellen Martins, Vinicius Tinti, Saulo Boldrini, Flavio Carmo, Sandra Bezerra, Ana Paula Câmara, Grabielly Bobadilha Jaily Keller e João Missia.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

DE SOUZA, Hector Pegoretti. **CARACTERIZAÇÃO DE PELLETS DE EUCALIPTO E RESÍDUOS DA DESPOLPA DO CAFÉ**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Orientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes. Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre.

A matriz energética mundial fundamenta-se na utilização de combustíveis fósseis, principais causadores do efeito estufa. Na tentativa de amenizar esse problema, o petróleo vem sendo substituído por outras fontes de energia (biomassas) que possuem grande potencial para suprir as necessidades atuais e com menor impacto ambiental. A peletização obtida de resíduos agroflorestais torna-se uma das alternativas tecnológicas para fins energéticos. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de biomassas florestais (eucalipto) e resíduos da despolpa do café para produção de *pellets* com fins energéticos. Foram utilizados três clones de eucalipto e três resíduos da despolpa do café (pergaminho, película prateada e casca externa) para fazer as seis composições (**EPC<sub>E</sub>** e **EPP<sub>P</sub>**), como também três resíduos da despolpa peletizados puros. A cor dos *pellets* foi avaliada com base no sistema CIE-L\*a\*b\* e concluiu-se que altos teores de cinza produzem *pellets* mais escuros. Os *pellets* de película prateada (**PP**) e casca externa (**CE**) com um  $\Delta E$  de 31,14 e 29,34, respectivamente, foram os mais escuros. Dentre os *pellets* com incorporação de madeira de eucalipto, a composição eucalipto-pergaminho-casca externa (**E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>**) foi a que teve a maior durabilidade, dureza e densidade energética líquida, com 98,17%; 37,12 kg; e 11,60 MJ m<sup>-3</sup>, respectivamente, e atendeu à norma alemã, podendo, conseqüentemente, ser comercializada dentro do País e exportada. Os *pellets* produzidos (100% puros) com resíduos da despolpa do café (**PP** e **CE**) atenderam a todos os parâmetros estabelecidos pela norma alemã para *pellets* não madeireiros, podendo também ser comercializados e exportados. Constatou-se que as biomassas avaliadas neste estudo apresentaram propriedades favoráveis para produção de *pellets* com fins energéticos.

**Palavras-chave:** Florestas energéticas, Energia renovável, Compactação da biomassa, Sistema de cor CIE-L\*a\*b\*.

## ABSTRACT

DE SOUZA, Hector Pegoretti. **PHYSICOCHEMICAL AND MECHANICAL PERFORMANCE OF PELLETS OF EUCALYPTUS SPP. CLONES AND RESIDUES OF COFFEE FOR PELLET PRODUCTION.** 2016. Dissertation (Master of Forest Science) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro – ES, Advisor: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Marina Donária Chaves Arantes. Co Advisor: Prof<sup>a</sup>. D.Sc. Graziela Baptista Vidaurre.

The current Worldwide and Brazil's energy matrix is based in the use of fossil fuels, main reason for the greenhouse effect, for this reason the oil has been replaced by other energy sources (biomass), which have great potential to meet current energy needs and with less environmental impact. Thus, pelletization becomes one of alternative technologies for energy, taking advantage of agroforestry waste. This study aimed to evaluate the potential of forest biomass (eucalyptus) and waste from the coffee pulping to production of pellets for energy purposes. We used three Eucalyptus clones and three residues of the coffee pulping (parchment, silver film and outer shell) to do the six compositions (EPCE and EPPP), also the three residues of the pulping were pure pelleted. The color of the pellets were correlated by the CIE-L \*a\*b\* system and it was observed that high gray levels produce darker pellets, which were ranked the silver foil pellets (PP) and outer shell (EC) with a  $\Delta E$  of 31.14 and 29.34 respectively, were darker. Among the pellets with eucalyptus wood incorporation, foreign eucalyptus parchment-shell composition (ECPCE) had the highest durability, hardness and liquid energy density with 98.17%; 37.12 kg and 11.60 MJ m<sup>-3</sup>, respectively, and met the German standard may be sold and exported. The pellets produced (100% pure) with the waste coffee pulping (PP and CE), meet all the parameters established by the German standard for non-wood pellets also can be marketed and exported. Among the biomass present favorable properties for production of pellets for energy purposes.

Keywords: Energy Forests, Renewable energy, Biomass Compacting, cor system CIE-L \*a\*b \*

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	9
2	<b>OBJETIVOS</b>	11
2.1	Objetivo geral	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	12
3.1	MADEIRA DE EUCALIPTO COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i>	12
3.2	RESÍDUOS DA CAFEICULTURA DO BENEFICIAMENTO DE GRÃOS DE CAFÉ	14
3.3	PELETIZAÇÃO DA BIOMASSA	16
3.4	PARÂMETROS DE QUALIDADE DE <i>PELLETS</i>	19
4	<b>METODOLOGIA</b>	23
4.1	BIOMASSAS UTILIZADAS, PROCEDÊNCIA E AMOSTRAGEM	23
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS	25
4.3	PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	25
5	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA</b>	29
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	29
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	30
6.1.1	<b>Umidade, densidade a granel e poder calorífico líquido</b>	30
6.1.2	<b>Características químicas das biomassas e dos <i>pellets</i></b>	32
6.2	CARACTERIZAÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	36
6.2.1	<b>Umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica, teor de finos e taxa de compactação</b>	36
6.2.2	<b>Dimensões, dureza e compressão diametral dos <i>pellets</i></b>	38
6.2.3	<b>Valores energéticos dos <i>pellets</i></b>	40
6.2.4	<b>Colorimetria pelo sistema de cor CIE L*a*b*</b>	43
6.2.5	<b>Classificação dos <i>pellets</i> acordo com a norma de qualidade europeia (DIM, 2012)</b>	46
7	<b>CONCLUSÕES</b>	49
8	<b>SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	50
9	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	51

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Fluxograma da matéria-prima para ser transportada em *pellets*.
- Figura.** Estrutura do fruto do café.
- Figura 3.** Peletizadora.
- Figura 4.** Ligno–Tester.
- Figura 5.** Relação entre dureza, durabilidade e densidade a granel dos *pellets*.
- Figura 6.** Classificação dos *pellets* de acordo com o sistema CIE L\*a\*b\*.
- Figura 7.** Correlação teor de cinzas e luminosidade

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Características gerais dos *pellets* (da peletizadora).
- Tabela 2.** Composição das biomassas utilizadas para produção dos *pellets*.
- Tabela 3.** Valores médios dos clones de eucalipto.
- Tabela 4.** Valores médios de umidade, densidade a granel e poder calorífico líquido das biomassas.
- Tabela 5.** Valores médios dos teores de extrativos totais, lignina total, cinzas e materiais voláteis para biomassas *in natura* e *pellets*.
- Tabela 6.** Valores médios de umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica, teor de finos e taxa de compactação dos *pellets*.
- Tabela 7.** Dimensões, dureza e compressão diametral dos *pellets*.
- Tabela 8.** Valores energéticos dos *pellets*.
- Tabela 9.** Comparação de densidades energéticas dos *pellets* com outros biocombustíveis.
- Tabela 10.** Valores das coordenadas colorimétricas e alterações dos *pellets* em relação às amostras-controle de cada amostra.
- Tabela 11.** Classificação dos *pellets* com base nas normas de qualidade.

## LISTA DE EQUAÇÕES

- Equação 1.** Cálculo do poder calorífico líquido (PCL).
- Equação 2.** Cálculo da compressão diametral.
- Equação 3.** Variação total da cor dos *pellets*.

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de energia mais utilizada no mundo é por meio da queima de combustíveis fósseis, que, no entanto, é a mais poluente por emitir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principal causador do efeito estufa, além de outros gases como óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e metano (CH<sub>4</sub>). A procura por novas fontes de energia está cada vez mais em evidência, principalmente devido ao crescimento da população mundial e à elevação progressiva do nível de vida nos países emergentes (COUTO *et al.*, 2012). Dentre as alternativas de energia renováveis estão as plantações florestais e a utilização dos resíduos agrícolas.

O crescimento da atividade florestal no Brasil disponibiliza cada vez mais quantidade de madeira, o que leva ao aumento da quantidade de resíduos. Na parte agrícola, no caso do café, o País é o primeiro produtor em nível mundial, conseqüentemente gera grande quantidade de resíduos que poderiam ser aproveitados de forma mais eficiente. No passado, quando os resíduos não eram bem utilizados ou não tinham valor comercial, muitas vezes eles eram queimados para limpar a área ou eram deixados na área do plantio para serem utilizados como adubo orgânico, o que pode ser classificado como um latente desperdício energético (RASGA, 2013).

No entanto, os resíduos de madeiras e os resíduos agrícolas originários de processos industriais passaram da condição de empecilho nas fábricas para a de uma interessante fonte adicional de renda dentro da atividade industrial (OLIVEIRA, 2015). Nos últimos cinco anos a disputa por esses resíduos tornou-se acirrada, pois eles estão sendo muito utilizados para gerar valor agregado, por exemplo, na produção de carvão ou mesmos de *pellets* para gerar energia.

Uma das alternativas para esses resíduos, tanto florestais como agrícola, é sua transformação em um produto densificado que seja fácil de manusear, armazenar, transportar e utilizar, como no caso dos *pellets*. Os *pellets* são combustíveis sólidos produzidos por meio da compactação de partículas da biomassa, que pode ser com ou sem aglutinantes, que têm forma cilíndrica e diâmetro e comprimento variáveis (COUTO *et al.*, 2004).

Os *pellets* são produzidos e utilizados em escala global, principalmente em países desenvolvidos. Esse tipo de produto é uma grande alternativa de fonte

de energia em substituição aos combustíveis fósseis para geração de energia e calor, o que contribui para uma matriz energética mais limpa e renovável.

A utilização da biomassa vegetal como fonte de energia renovável é promissora nos cenários atual e futuro (BLANDY, 2016). Por ser viável economicamente, ser abundante e apresentar vantagens ambientais como a fixação de carbono durante o crescimento vegetal, reduz a dependência energética de combustíveis fósseis (gás e petróleo) e, o mais importante, tem origem em fontes renováveis (florestas plantadas).

A produção e o consumo de *pellets* encontram-se concentrados principalmente na Europa e também na América do Norte. O uso de *pellets* pelo setor industrial destaca-se em países cuja produção de energia elétrica é fundamentada na queima de biomassa, como é o caso da Suécia, da Dinamarca, da Holanda, da Bélgica e do Reino Unido (FLACH *et al.*, 2013). Em outros países como Alemanha, a Áustria, a Itália e países de América do Norte, os *pellets* são utilizados para aquecimento residencial.

No Brasil, o setor de biomassa compactada tem sido o modo mais eficiente de viabilizar economicamente os resíduos, por ser considerada um combustível limpo e atraente para o consumidor e poder substituir completamente o papel dos combustíveis fósseis na produção e geração de energia. Várias regiões do País possuem alto potencial para disponibilizar grandes volumes de resíduos florestais e agrícolas para serem utilizados como matéria-prima para produção de *pellets*. Pelo fato de as empresas terem necessidade de abastecimento estável da matéria-prima, já existem hoje plantios com ciclos curtos de dois e três anos destinados para fins energéticos.

O abastecimento é uma questão de logística e organização, já que o Brasil tem condições favoráveis para chegar a ser um grande produtor de *pellets*, por ter grandes extensões de terra, localização geográfica favorável e condições climáticas que permitem plantações florestais e agrícolas para produzir matéria-prima para esse fim. Apesar disso, existem poucos estudos referentes a *pellets* no País (SOUZA, 2014). A hipótese levantada neste estudo é que *pellets* de diferentes clones de eucalipto e resíduo do despulpamento do café resultam em material energético de qualidade.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo produzir e avaliar *pellets* com distintos materiais genéticos de *Eucalyptus spp.*, em composições com diferentes resíduos do despulpamento do grão de café.

### 2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

Verificar a influência de diferentes composições de biomassas de *Eucalyptus* e resíduos do despulpamento do grão de café nos *pellets* produzidos.

Avaliar a influência dos extrativos e do teor de cinzas nos padrões colorimétricos dos *pellets*.

Verificar se os *pellets* produzidos atendem às normas europeias, devido à inexistência de normas nacionais regulamentadoras específicas para materiais lignocelulósicos compactados.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 MADEIRA DE EUCALIPTO COMO FONTE DE MATÉRIA-PRIMA PARA PRODUÇÃO DE *PELLETS*

A área florestal brasileira atingiu 7,8 milhões de hectares em 2016, um aumento de 0,8% em relação a 2015. Os plantios de eucalipto representaram 71,9% desse total e os de *Pinus* 20,7%, nos últimos cinco anos. No entanto, a área plantada com este gênero vem caindo a uma taxa de 2,1% ao ano, pois segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2016) o *pinus* vem sendo substituído principalmente pelo eucalipto.

Com o aumento da área plantada têm-se, conseqüentemente, maior utilização e/ou processamento da madeira, o que gera maior quantidade de resíduos. Uma maneira de utilizar esses resíduos é por meio do processo de compactação, seja na forma de briquetes ou para produzir *pellets*.

Nos Estados Unidos e no Canadá predomina o processamento de coníferas, que apresentam maior eficiência na produção de energia do que as folhosas, por ter maior teor de lignina, segundo a *Energy Information Administration* (EIA, 2006).

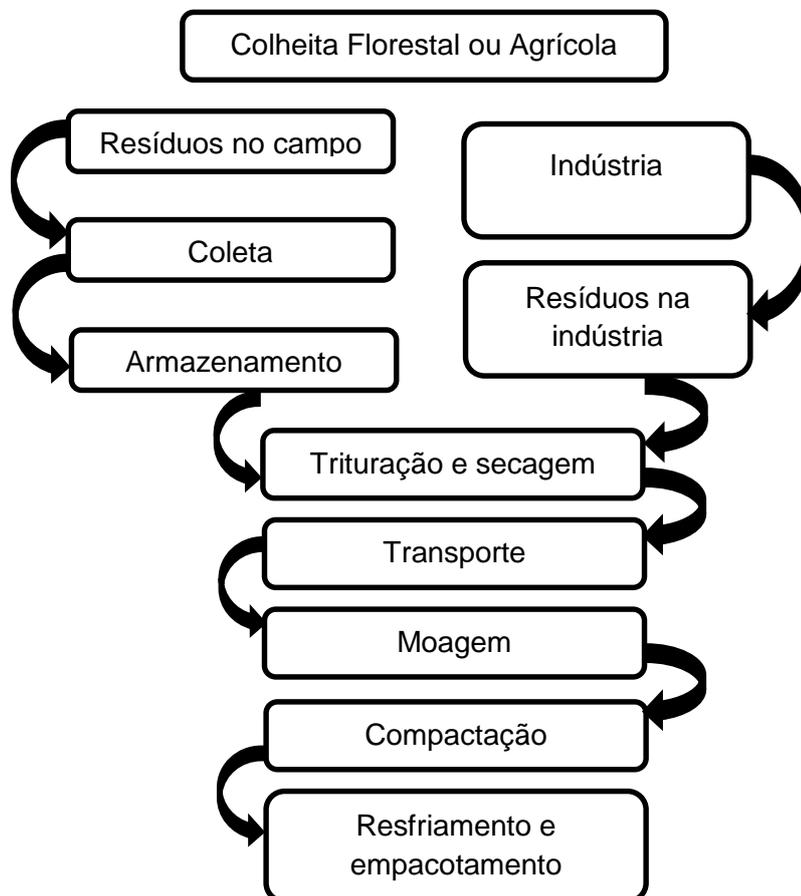
O Brasil detém as melhores tecnologias na silvicultura de *Eucalyptus* do mundo, atingindo até 60 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano de produtividade em rotações de sete anos. Segundo o Sistema de Informações Florestais (SNIF, 2016), o País tem potencial de aumentar rapidamente a produção de plantações de eucalipto de rotação curta, ou seja, de dois a três anos, o que resolveria a questão do fornecimento de matéria-prima e diminuiria a dependência só de resíduos.

Segundo dados da Associação Brasileira de Indústrias de *Pellets* (ABIPEL, 2016), a partir de 2016 serão produzidas 2 milhões de toneladas de *pellets* provenientes de resíduos madeireiros, com uma expectativa de 80 milhões de toneladas para o ano de 2020.

Para alcançar essa produção, os *pellets* têm de ser produzidos a partir de diferentes biomassas residuais das cadeias produtivas florestal e agrícola, por exemplo, o eucalipto e o café. Nesse sentido, a boa qualidade dos resíduos utilizados como matéria-prima no processo de compactação é essencial para que o produto final seja adequado e aceito no mercado.

Desde a coleta dos resíduos nos locais de produção (campo ou indústria), até a entrada no processo de fabricação dos *pellets*, o material passa por várias etapas para garantir boa qualidade (Figura 1).

Figura 1 - Fluxograma da matéria-prima para ser transformada em *pellets*



Fonte: Modelo recomendado por Nilson *et al.* (2011), citados por Dias *et al.* (2012).

Os resíduos podem ser gerados no campo, logo depois da colheita, ou na indústria, imediatamente após o beneficiamento ou produto final, onde os resíduos aproveitados para produzir *pellets* são descartados (NONES, 2014).

Esse material (resíduos) pode permanecer no campo, pois tem funções notáveis na proteção e conservação do ecossistema, devido à sua biologia, riqueza mineral, umidade e contenção dos processos erosivos.

Algumas empresas florestais costumam retirar o máximo possível desses resíduos (galhos, ponteiros, raízes e até casca) de colheita, inclusive toda a copa, para uso como biomassa combustível (FOELKEL, 2007). Ainda segundo o autor, as principais características dos galhos e das ponteiros estão

ligadas à presença de casca, além de serem partes aéreas das árvores muito ativas na utilização de minerais. As análises de composição química desses materiais têm revelado maiores teores de minerais e menores teores de pentosanas e de holocelulose. Já a madeira de ponteiros, pela grande quantidade de nós, possui maior teor de lignina e extrativos, e também maior densidade básica. Apesar de esse material ser mais difícil de triturar, as alterações são apenas relacionadas à conformação física da matéria-prima, e não à sua composição química, que é dependente da biomassa de origem. Portanto ele tem boa aptidão para lenha energética e densificação para *pellets*.

Dentre as possíveis formas de aproveitamento dos resíduos para produção energética, a recente Política Nacional de Resíduos Sólidos (MMA, 2010) obriga as indústrias e os pequenos produtores a darem melhor destino a seus resíduos. No entanto, devido à sua heterogeneidade (forma, umidade e granulometria), eles não são bem utilizados, o que obriga a padronização do material e a obtenção de um produto (*pellets*) final mais homogêneo e de boa qualidade.

### 3.2 RESÍDUOS DA CAFEICULTURA DO BENEFICIAMENTO DE GRÃOS DE CAFÉ

O Brasil é maior produtor de café no mundo, com uma área plantada de 2.248.565,8 hectares (arábica e conilon). Deste total, 271.047,5 hectares (12,1%) estão em formação e 1.977.518,3 hectares (87,9%) estão em produção, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016).

Segundo a CONAB (2016), a área plantada com café arábica no País soma 1.780.344,7 hectares, o que corresponde a 79,2% da área existente com lavouras de café, sendo estimado um acréscimo de 0,8% (13.425 hectares) para a nova safra em 2016.

Minas Gerais tem a maior produção nacional do café arábica, que corresponde a 67,8% dessa espécie, vindo em seguida o Espírito Santo. A primeira estimativa para a safra cafeeira de 2016 no Espírito Santo indica uma produção entre 10.828 e 11.498 mil sacas, o que representa um aumento de 18% em relação à produção de 2015, que foi de 2,94 milhões de sacas (CONAB, 2016).

A despolpa do grão do café pode ocorrer de duas maneiras, após a colheita: via seca ou via úmida. Na via seca, o fruto do café é seco integralmente após a abanação, lavagem e separação das fracções (cereja, verde e boia), e então ele é encaminhado para secagem em terreiros ou secadores artificiais. Já na via úmida o café é despulpado por meio do processo de fermentação rápida ou desmucilagem. Segundo Viela *et al.* (2001), no Brasil a despolpa mais comum é por via seca, por ser mais econômica e prática.

Em 2015 foram beneficiadas 2.718.000 toneladas de café, o que gerou 3.397.500 toneladas de resíduos, incluindo casca externa, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada e borra de café. Sabe-se que para cada tonelada de café beneficiado é gerada 1 tonelada de casca, e dessa tonelada também é obtida 0,25 tonelada de pergaminho (CONAB, 2016).

O pergaminho, considerado um subproduto do café com alto potencial energético, 4.442 kcal kg<sup>-1</sup> (PROTÁSIO *et al.*, 2012), é muito mais barato do que a madeira. Portanto, seu uso juntamente com a madeira ou outros resíduos também ajuda a diminuir a poluição causada pela alta quantidade de resíduos que não são utilizados e são jogados na natureza, além de ser um aliado contra o desmatamento.

O armazenamento da polpa do café e seus resíduos é geralmente feito na forma de pilhas, para permitir sua secagem e, assim, possibilitar seu uso como adubo orgânico. O empilhamento contribui para o aumento de sua umidade, por isto a decomposição e a fermentação geram odores desagradáveis, proliferação de mosquitos, além de dificultar sua manipulação. Com a finalidade de diminuir esses problemas, algumas alternativas para o uso dos resíduos da cafeicultura têm sido estudadas, como: compostagem, alimentação animal, produção de ácidos orgânicos, pectinas, processos de ensilagem e seu uso como fonte de energia, mediante a compactação dessas biomassas (PANDEY *et al.*, 2000).

Desta maneira, esses resíduos podem ser utilizados como fonte de energia na indústria para fabricação de *pellets*, o que ajudaria a diminuir os custos das empresas, inibiria o aumento do efeito estufa e da poluição ambiental e, o mais importante, agregaria valor a esse produto que não é utilizado de forma racional ou eficiente. Além dessas vantagens, a utilização desse resíduo contribuiria para a matriz energética, uma vez que ele pode ser usado junto com

a madeira para aumentar a eficiência econômica, ambiental e energética e principalmente por ser uma fonte renovável, que gera renda não só para os produtores de café do estado do Espírito Santo, mas de todo o Brasil.

### 3.3 PELETIZAÇÃO DA BIOMASSA

A tecnologia de peletização consiste em transformar a biomassa em pequenos blocos cilíndricos, compactos, prontos para a queima em fornos, caldeiras, lareiras ou fogões.

Segundo Couto *et al.*, (2004), a prensa de peletização (“peletizadora” ou “peletizadeira” ou granulador ou simplesmente extrusora) consiste de um rolo e uma matriz. A pressão exercida entre os componentes resulta em uma força de fricção que aquece e compacta o material por meio de uma das perfurações da matriz. Há dois tipos de equipamentos para produção de *pellets*: prensa de peletização com matriz de discos e prensa de peletização com matriz de anel.

Entre os equipamentos para densificar biomassa encontram-se as peletizadoras, as briquetadeiras, a prensa extrusora, a prensa extrusora com rosca sem fim e a prensa hidráulica. A peletizadora é uma das mais utilizadas para densificação de biomassa para fins energéticos.

A compactação utilizando a peletizadora ocorre por meio da extrusão da biomassa em uma matriz perfurada de aço. A peletização da biomassa emprega uma matriz com orifícios de 6,0 a 12 mm de diâmetro que gira, e a pressão interna dos cilindros força a passagem da madeira por esses orifícios com pressão em torno de 300 Mpa e temperatura aproximada de 100°C (NIELSEN *et al.*, 2009).

De acordo com Tumuluru (2011), a conversão de resíduos florestais e agrícolas em formas densificadas possui as seguintes vantagens: aumento da densidade a granel, aumento do poder calorífico líquido por unidade de volume; melhoria das condições de transporte e estocagem do produto; o processo minimiza problemas de disposição de resíduos; e o material combustível produzido é uniforme em tamanho e qualidade. O processo também ajuda a minimizar a utilização de florestas naturais e o produto é um possível substituto para a lenha.

O uso mais eficiente dos resíduos, que teriam um destino inadequado,

também contribui para a menor dependência de combustíveis fósseis, responsáveis pelo efeito estufa, e, o mais importante, gera renda tanto para as indústrias como para os pequenos produtores.

Esse procedimento de compactação visa melhorar a homogeneidade do produto final e, conseqüentemente, sua utilização. O fato de tornar o transporte mais fácil e econômico e de facilitar o manuseio e a estocagem do produto contribui para que maiores investimentos sejam feitos nessa área de biomassa.

Segundo Tumuluru *et al.* (2010), os mecanismos mais comuns de densificação de biomassa têm sido adaptados a partir de outras tecnologias de processamento de alta eficiência, como as indústrias de alimentos, tanto para humanos quanto para animais e produtos farmacêuticos.

Segundo Dias (2002), a combustão de material lenhoso densificado não é um processo novo, simplesmente é pouco utilizado e sua caracterização ainda não está completamente desenvolvida. Algumas das principais vantagens da biomassa densificada são a combustão mais uniforme e a redução da emissão de partículas durante a sua queima. Podem ser citadas algumas vantagens importantes dos *pellets* (Tabela 1), como dimensões, compactação, maior energia por unidade de volume e fácil armazenamento.

Tabela 1 - Características gerais dos *pellets* (da peletizadora)

<b>Características</b>	<b><i>Pellets</i></b>
<b>Umidade da biomassa de origem</b>	5 a 10 %
<b>Capacidade máxima de produção</b>	4 a 6 ton h <sup>-1</sup>
<b>Consumo energético (corte e prensagem)</b>	80 a 90 kwh ton <sup>-1</sup>
<b>Preparação da biomassa</b>	Trituração em pequenas partículas (3 - 25mm)
<b>Dimensões do produto final</b>	Diâmetro 6 a 10mm Comprimento 10 a 30mm
<b>Sistemas de combustão</b>	Automatizados
<b>Matéria-prima</b>	Serragem, resíduos madeireiros e agrícolas

Fonte: Adaptado de Werther *et al.* (2000).

A produção de *pellets* de origem de biomassa florestal começou na América do Norte, na segunda metade da década dos anos de 1970, e

posteriormente difundiu-se pelos países da Europa e para outras partes do mundo (VINTERBÄCK, 2004).

Hoje milhões de pessoas utilizam biomassa como fonte de energia, principalmente a de origem florestal e a proveniente da agricultura, sobretudo nos países em desenvolvimento, que estão à procura de fontes alternativas de energia.

A Europa destaca-se como o maior produtor e consumidor de *pellets* de madeira em escala doméstica e industrial, com 18 milhões de t ano<sup>-1</sup>; a perspectiva é que a demanda aumente nos próximos anos. Vários países estão seguindo essa tendência de consumir e produzir *pellets* como fonte de energia limpa, como a América do Norte, com 23%. Já as outras regiões, América do Sul, África e Ásia, somam 12% da produção, com 3% para cada uma (OLIVEIRA, 2014).

Segundo Garcia (2014), o consumo de *pellets* vem crescendo rapidamente nas duas últimas décadas. Os *wood pellets* são biocombustíveis renováveis produzidos a partir de biomassa florestal ou agrícola, com qualidade consistente de baixa umidade, forma homogênea e alta densidade energética.

Como consequência do aumento do uso dos resíduos florestais e agrícolas, as empresas se viram obrigadas a ter um fornecimento mais estável e seguro da matéria-prima, para suprir a demanda, o que gerou o interesse das fábricas ou dos pequenos produtores de assegurar o fornecimento da matéria-prima para garantir o produto final de qualidade.

Segundo Oliveira (2015), em 2013 a estimativa era de que o mercado global de *pellets* chegaria a US\$ 9 bilhões em 2020, sendo a Europa o maior consumidor. Três anos depois as expectativas são ainda mais otimistas: a União Europeia planeja produzir, até 2020, aproximadamente 20% de toda a energia da matriz energética, com recursos de fontes renováveis, e os *pellets* fazem parte desta conta.

Estudos preveem um consumo de 50 milhões de toneladas de *pellets* para 2024, o que representa mais de três vezes o consumo atual. Esse combustível já é considerado um dos maiores produtos de biomassa sólida comercializados internacionalmente, segundo a Associação Europeia de Biomassa (AEBIOM, 2015).

Oliveira (2014) ressalta que ainda falta incentivo fiscal específico para a produção de biomassa para fins energéticos e que há carência de informação sobre o uso dos *pellets* como biomassa moderna. Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável (ABIB, 2015), em 2015 existia no Brasil um contingente de 21 fábricas produtoras de *pellets*, que juntas somaram uma produção de 3.564.800 t ano<sup>-1</sup>, utilizando os resíduos de *Pinus* ou de *Eucalyptus* como matéria-prima. Essas empresas ainda não utilizam o total da capacidade instalada, conseqüentemente esses números poderiam ser maiores.

A maioria das empresas produtoras de *pellets* do Brasil está localizada na Região Sul, em virtude da existência de grandes áreas de reflorestamento e de empresas florestais. Portanto, o acesso a resíduos é mais fácil nessa região, sendo a maioria resíduos de pós-colheita (galhos, folhas e casca), que podem ser aproveitados no processo de compactação. Há também geração de resíduos de indústrias e agrícolas, que são utilizados como matéria-prima para produzir *pellets*.

### 3.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE PELLETS

As propriedades dos *pellets* podem variar consideravelmente, e fatores como matéria-prima, temperatura e pressão são determinantes para a sua qualidade.

A durabilidade dos *pellets* é de grande importância para o consumidor. Os *pellets* com baixa durabilidade são sensíveis a tensões mecânicas durante o transporte e manuseio, o que resulta na formação de finos e dificulta sua utilização. A durabilidade é influenciada principalmente pelo teor de lignina, uma vez que ajuda na ligação das partículas e na umidade da matéria-prima, pois altos teores de umidade dificultariam a compactação e resultaria em *pellets* friáveis. A umidade nos *pellets* pode variar de 5 a 10%. Esta afeta significativamente o poder calorífico, que é entre 4,7 e 5,0 MWh por tonelada de *pellets* (DIAS, 2002).

Os *pellets* possuem entre 3 e 25 mm de diâmetro e seu comprimento varia de 5 a 40 mm. Quando o diâmetro é maior que 25 mm, o produto é chamado de briquete. Para utilização de biomassa densificada em sistemas domésticos

automáticos (estufas para calefação) é necessário obter altos padrões de qualidade, como encontrados em alguns países europeus. Nesses lugares algumas normas que regulamentam a produção desse tipo de combustível já estão em vigor, enquanto em outros ainda se encontram em preparação, como é o caso do Brasil, que ainda não possui normas para regulamentar esse tipo de combustível, o que leva a seguir as normas europeias.

Em alguns países europeus, onde a utilização de biomassa densificada em aplicações domésticas está mais divulgada, já estão em vigor normas que regulamentam os critérios de qualidade desse combustível. As normas vigentes mais relevantes são: *Osterreichs Normungs Institut* ÖNORM M 7135 (Áustria), DIN (*Deutsches Institut Für Normung*) 51731 (Alemanha), *Standard Normas* SN 166000 (Suíça), *Standard* Suécia SS 18 71 20 (Suécia) e Normas da *Austrian Pellets Association* (APA).

A DINplus combina os requisitos da DIN-51731 e da ÖNorm-M-7135, e oferece um dos mais rigorosos padrões de qualidade para *pellets* na Europa. A ENplus diferencia os *pellets* de madeira em três grupos: primeiro grupo (A1): *pellets* produzidos com madeira do fuste e resíduos da indústria de processamento sem nenhum tratamento químico; segundo grupo (A2): *pellets* produzidos a partir de árvores inteiras sem raízes, madeira do fuste, resíduos do aproveitamento florestal e casca; e terceiro grupo (B): *pellets* produzidos a partir de plantios florestais, plantações e outras madeiras sem tratamento químico e madeira reciclada, derivados de indústrias moveleiras o produtos dos quais se possa reutilizar a madeira, por exemplo, peças de móveis velhos.

Segundo Rasga (2013), deve-se tomar cuidado com a procedência dos resíduos, pois eles podem conter cola, verniz, tinta e outras impurezas como parafusos, e essa combinação é capaz de resultar em *pellets* extremamente tóxicos, que não podem ser utilizados para aquecimento doméstico, mas que, no entanto, poderiam ser utilizados na indústria, que obriga o fabricante a seguir um sistema de industrialização adequado, com forte controle na seleção da matéria-prima, como também os fornecedores, para garantir qualidade e padronização dos produtos a serem disponibilizados no mercado.

Na Suécia, os *pellets* de 6 mm de diâmetro são utilizados para calefação de residências e possuem uma ótima condição de combustão. Além de terem uma forte vantagem ambiental, esses materiais possuem características

relevantes para os processos de combustão, por exemplo: produzem em torno de  $4.000 \text{ kcal kg}^{-1}$ , dependendo da matéria-prima, e têm densidade de aproximadamente  $650 \text{ kg m}^{-3}$ , valores de umidade em torno de 8 a 13% e teores de cinzas inferiores a 0,5%, quando não constituídos por materiais como cascas de árvores. São adequados para caldeiras de suprimento automático, e podem ser utilizados tanto em pequena, quanto em larga escala (PELLETCLUB, 2009).

Dias (2002) estudou o comportamento de *pellets* produzidos na Europa (resíduos de indústrias moveleiras), no Canadá (resíduos florestais de pinos), na Espanha (casca de pinos) e na Suécia (resíduos de serrarias) e destacou que todos possuem uma composição muito semelhante, com teores de enxofre muito baixos. A principal diferença encontrada foi na composição química, com relação ao teor de nitrogênio, que é mais elevado nos *pellets* produzidos com resíduos de madeira da indústria do mobiliário, e nos *pellets* produzidos na Suécia, que têm maior facilidade para a quebra, devido à heterogeneidade da matéria-prima, pois ela é proveniente de resíduos de serrarias, que são heterogêneos. Quando são provenientes de indústrias moveleiras, a matéria-prima pode conter colas ou vernizes, o que é indesejável na produção dos *pellets*, pois eles têm poliuretanos derivados do petróleo, que são contaminantes na hora da queima dos *pellets*.

Revola *et al.* (2009) relataram que algumas variáveis são importantes para o processo de peletização e que elas dependem principalmente da matéria-prima utilizada, da umidade, das dimensões das partículas, bem como de outros aspectos relacionados com o processo de manufatura, por exemplo, a pressão aplicada e a temperatura atingida durante a compactação.

Mani *et al.* (2006) mencionaram que a densidade é uma das melhores características para indicar a qualidade dos *pellets*, embora os autores tenham também ressaltado que o aumento da densidade pode resultar em aumento da friabilidade do material, pois dificulta o processo de compactação e os *pellets* não são bem formados.

Outra questão importante e de grande necessidade de estudo é a relação entre os *pellets* e a umidade ambiente, visto que o material estocado deve manter suas melhores características para ser utilizado. Hartley e Wood (2008) estudaram o comportamento de *pellets* de madeira sob condições diferentes de umidade em uma câmara climática e constataram que houve relação entre a umidade de equilíbrio e a do ambiente, com valores variando de

11 a 80%. A partir de 93 até 100% de umidade os *pellets* se desintegraram, por isso a importância de mantê-los em ambientes secos, com baixa umidade e fora do contato direto com água, para preservar sua qualidade.

A qualidade dos *pellets* e seus parâmetros de energia podem ser avaliados por meio de sua cor (SGARBOSSA *et al.*, 2014), que tende a alterar-se com o passar do tempo e escurecer, devido à oxidação causada principalmente pela luz, que reage com os componentes químicos da madeira/biomassa, como a lignina e a oxidação de determinados extrativos (MORI *et al.*, 2005). A colorimetria vem sendo utilizada para avaliar a qualidade da madeira, se ela foi atacada por agentes xilófagos, se teve mudança por tratamentos silviculturais, ou para saber a porcentagem de cerne-alburno presente na madeira. Ela também vem sendo utilizada para conferir a qualidade dos *pellets* e seus parâmetros de energia (SGARBOSSA *et al.*, 2014), portanto esse critério pode ser usado como suporte visual de qualidade para o consumidor final.

A classificação visual da cor de qualquer objeto está sujeita à percepção individual, podendo resultar em uma classificação subjetiva. Fatores como diferenças na fonte de luz onde o material é observado, sensibilidade do olho do observador, tamanho das amostras em que se avalia a cor e diferenças de fundo criam condições que afetam a aparência da cor (KONICA MINOLTA, 1998).

Para proporcionar maior uniformidade na leitura das cores dos materiais em relação às interpretações visuais, a Comission International de L'Eclairage (CIE) desenvolveu, em 1976, o espaço de cores  $L^*a^*b^*$ . O método consiste na expressão numérica da cor, em que os valores de luminosidade ( $L^*$ ), a tonalidade (coordenadas cromáticas  $a^*$  e  $b^*$ ) e a saturação (C) são medidos com a utilização de espectrofotômetros de forma simples e precisa (KONICA MINOLTA, 1998; CAMARGOS, 1999).

A coordenada  $L^*$  representa a luminosidade, que varia de zero (preto) à 100 (branco), enquanto as coordenadas cromáticas  $a^*$  e  $b^*$  variam entre -60 e +60. Os sinais positivos e negativos significam:  $+a^*$  aumento na cor vermelha,  $-a^*$  aumento na cor verde,  $+b^*$  aumento na amarela e  $-b^*$  aumento na cor azul (KONICA MINOLTA, 1998).

Em virtude de sua facilidade de aplicação e da informação precisa, o sistema CIE- $L^*a^*b^*$  vem sendo utilizado em pesquisas para avaliar a alteração

da cor da madeira sob influência de diversos fatores, como qualidade do sítio, espaçamento, tratamentos silviculturais, ataque de organismos xilófagos, degradação por fatores abióticos, composição química e influência de tratamentos térmicos (LOPES *et al.*, 2014a).

A colorimetria vem sendo utilizada também nos *pellets* com o objetivo de detectar se a qualidade dos parâmetros está efetivamente relacionada com os valores colorimétricos e também para ajudar o consumidor a fazer sua escolha com base na avaliação visual.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

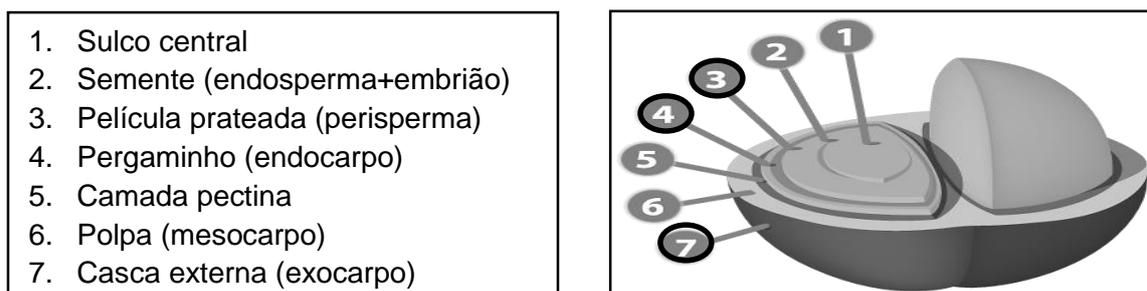
### 4.1 BIOMASSAS UTILIZADAS, PROCEDÊNCIA E AMOSTRAGEM

A madeira (biomassa florestal) utilizada neste estudo foi proveniente de três clones do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, com 6,5 anos de idade, oriundos de plantios localizados em Nova Viçosa, estado da Bahia (coordenadas 17° 53' 44" latitude sul e 39° 34' 2" longitude oeste). Foram também utilizados três resíduos do beneficiamento do grão do café, sendo eles pergaminho, película prateada e casca externa do café, originários do distrito de Oriente, pertencente ao município de Jerônimo Monteiro (coordenadas 20° 47' 25" latitude sul e 41° 23' 48" longitude oeste), Espírito Santo.

Utilizou-se uma amostra composta, ou seja, um mix de dois discos retirados de cada uma das cinco posições longitudinais da árvore: a 0, 25, 50, 75, 100% da altura comercial, considerada até 8 cm de diâmetro, como também dois discos na região do diâmetro à altura do peito (DAP = 1,30 m do solo). Para cada um dos três clones o material foi triturado e homogeneizado, para determinação de suas propriedades e para produção dos *pellets*. Para determinar a densidade básica da madeira, foram retiradas duas cunhas opostas dos discos do DAP.

Os resíduos provenientes do beneficiamento da despolpa do grão de café, ou seja, a película prateada, o pergaminho e a casca externa (Figura 2), foram triturados e avaliados individualmente. Para produção dos *pellets*, a granulometria desses resíduos não foi alterada, pois eles já estavam com tamanho inferior a 6 mm de diâmetro.

Figura 2 - Estrutura do fruto do café.



Fonte: <http://www.aromapolti.pt/>- Estrutura do fruto e do grão de café.

Diferentes composições de biomassa florestal com os resíduos da despolpa do grão de café foram obtidas, avaliadas e utilizadas para produção dos *pellets* (Tabela 2). A base das composições foi eucalipto e pergaminho, devido ao seu maior volume.

Tabela 2 - Composição das biomassas utilizadas para produção dos *pellets*

Identificação	Clone	<i>Eucalyptus</i> (%)	Pergaminho (%)	Película Prateada (%)	Casca Externa (%)
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	A	40	30	30	-
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	B	40	30	30	-
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	C	40	30	30	-
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	A	40	30	-	30
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	B	40	30	-	30
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	C	40	30	-	30
<b>P</b>	-	-	100	-	-
<b>P<sub>P</sub></b>	-	-	-	100	-
<b>C<sub>E</sub></b>	-	-	-	-	100
<b>E<sub>D</sub></b>	Comercial	100	-	-	-

E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = EucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = EucaliptoC+pergaminho+casca externa. P = pergaminho. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. E<sub>D</sub> = *pellets* comercial.

#### 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

A umidade das biomassas, tanto florestal quanto dos resíduos da despolpa do café, foi determinada por meio dos procedimentos descritos na DIN EN 14774-1 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010a).

A densidade básica da madeira seguiu os procedimentos das Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR 11941) da Associação Brasileira de Normas

Técnicas (ABNT, 2003) e a densidade a granel das biomassas foi determinada conforme a norma DIN EN 15103 (*DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG*, 2010c).

Para determinar a composição química das biomassas, foram feitas as seguintes análises: teor de extrativos em acetona (*TECHNOLOGICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY T204*), teor de lignina insolúvel, com base no método Klason, alterado segundo o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 224 om-88, e teor de lignina solúvel, determinada por espectrofotômetro UV, conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total consistiu na soma das frações solúvel e insolúvel e o teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma EN 14775 (*DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG*, 2009). O poder calorífico superior das biomassas foi determinado por meio de um calorímetro adiabático, seguindo os procedimentos descritos na DIN EN 14918 (*DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG*, 2010b).

#### 4.3 PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DOS *PELLETS*

Na produção dos *pellets* foi utilizada a mesma composição descrita na Tabela 2. Os *pellets* foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial com matriz circular horizontal. O equipamento possui capacidade de produção de 110 kg h<sup>-1</sup>, com matriz plana de 6,0 mm. O material utilizado dos clones possuía granulometria de 3 mm e umidade com 12%. Além dos *pellets* produzidos em laboratório, também foi avaliada uma amostra comercial nacional (**E<sub>D</sub>**) produzida com madeira 100% de eucalipto, que foi utilizada como um parâmetro de comparação, pelo fato de não ter sido possível peletizar 100% do eucalipto.

Figura 3. Peletizadora.



A densidade real dos *pellets* foi obtida pela norma ABNT NBR 6922. A umidade dos *pellets* seguiu a metodologia descrita na norma DIN EN 14774-1 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010a), e para calcular a densidade a granel foi utilizada a metodologia estabelecida pela norma DIN EN 15103 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010c). O diâmetro (mm) e o comprimento (mm) dos *pellets* foram obtidos de acordo com a norma DIN EN 16127 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2012b), fazendo as medições com um paquímetro digital. Foram medidos, aleatoriamente, 100 *pellets* de cada composição.

A composição química dos *pellets* é: teor de extrativos em acetona (TECHNOLOGICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY T204), teor de lignina insolúvel, segundo o método Klason, alterado com base no procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 224 om-88, e teor de lignina solúvel, determinado por espectrometria, conforme Goldschimid (1971). O teor de lignina total consistiu na soma das frações solúvel e insolúvel e a holocelulose foi determinada pela diferença entre a massa inicial e a quantidade de extrativos e lignina total. Para os teores de cinzas e materiais voláteis foi utilizada a metodologia da norma EN 14775 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2009), o poder calorífico superior (PCS) foi obtido de acordo com a norma da DIN EN 14918 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2010b). Para isto, utilizou-se calorímetro

adiabático. Para a estimativa do poder calorífico líquido (útil) utilizou-se a equação 1, com base na mesma norma.

$$PCL = \frac{PCI (100 - U_{bu})}{100} - 6 * U_{bu} \quad (1)$$

em que

PCL: poder calorífico líquido em pressão constante, em J g<sup>-1</sup>;

PCI: poder calorífico inferior, em J g<sup>-1</sup>; e

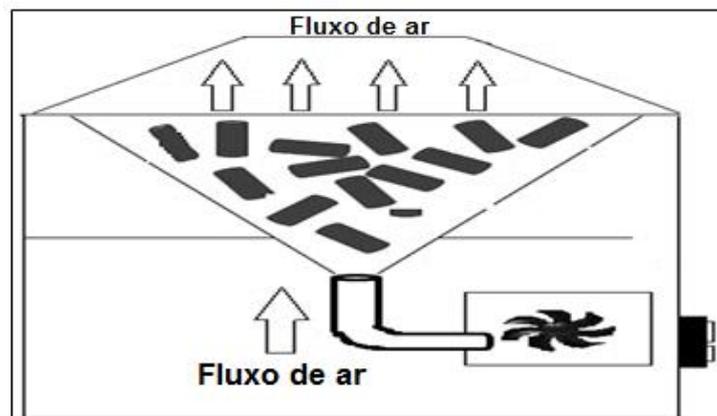
U<sub>bu</sub>: umidade base úmida.

A taxa de compactação foi calculada conforme sugerido por Obernberger e Thek (2010). No ensaio de compressão, utilizou-se a velocidade de carga de 1mm min<sup>-1</sup>, que foi aplicada na parte axial dos *pellets* com uma célula de carga de 500 kg, conforme Aarseth e Prestlokken (2003), sendo a compressão calculada em relação à deformação e à tensão máxima (equação 2).

$$Compressão = \frac{2 * carga\ maxima\ (kg)}{\pi * Diâmetro(cm) * Comprimento(cm)} \quad (2)$$

Para determinar a durabilidade mecânica dos *pellets*, eles foram agitados por meio de um jato de ar que simula a destruição natural durante o transporte e o manuseio até o seu destino final, em uma câmara com formato de pirâmide quadrangular invertida. Para determinar a porcentagem de finos, foram colocados 300 g de *pellets* com um fluxo de ar de 30 mbar de pressão, com uma duração de 30 segundos. Em seguida as amostras de 100 g de *pellets* sem finos foram submetidas a outro fluxo de ar controlado, 70 mbar, durante 60 segundos (Figura 4). Essa análise foi realizada no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

Figura 4 – Ligno-Tester



Fonte: o autor.

A dureza foi determinada em kg, pelo ensaio de compressão diametral do *pellet*, em um durômetro manual com escala de 0 a 100 kg. Foi inserido um *pellet* por vez no durômetro e aplicada uma carga crescente, até o rompimento da amostra. Em seguida, fez-se a leitura da carga máxima suportada, análise também realizada no LAPEM.

Para a análise da cor dos *pellets* utilizou-se a metodologia do sistema CIE-L\*a\*b\* (CIE,1976). A cor foi determinada com o auxílio de um espectrofotômetro portátil, tendo sido realizada a leitura de 15 *pellets* escolhidos aleatoriamente para cada tratamento ao longo da face radial-longitudinal de cada *pellet*, sendo obtidos os valores das coordenadas L\* (claridade ou luminosidade), a\* (matizes do eixo vermelho – verde) e b\* (matizes do eixo amarelo – azul) para cada *pellet*.

O diâmetro de abertura utilizado para a área de iluminação do aparelho foi de 3 mm (SAV – *Small Area View*). Utilizou-se o “iluminante” padrão D65, ângulo de observação de 10° e luz especular incluída. Para as leituras, o aparelho foi calibrado com o padrão preto e branco, e para a calibração do padrão branco, utilizou-se uma placa de calibração do próprio aparelho.

Foram utilizados quicé *pellets* de cada tratamento, escolhidos aleatoriamente, mas com características boas, ou seja, *pellets* bem plastificados e sem fissuras. A leitura foi feita na parte lateral do *pellet*, para obtenção de melhor resultado.

As três coordenadas de cor dos *pellets* foram comparadas com as amostras-controle (*pellet* comercial), e então foram calculadas as variações de

cada coordenada, sendo elas:  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ . A variação total da cor dos *pellets* foi determinada com o emprego da equação 3, conforme Konica Minolta (1998).

$$\Delta E^*: \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3)$$

em que

$\Delta E^*$ : variação total da cor dos *pellets*; e

$\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ : variação das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , respectivamente.

## 5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi analisado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com nove tratamentos para as biomassas *in natura* e dez tratamentos de *pellets*, com cinco repetições para as variáveis físicas e mecânicas. Para as variáveis energéticas e químicas foram realizadas duas repetições, em função da quantidade de material necessário para as análises.

A análise de variância foi processada pelo teste F ( $p \leq 0,05$ ), em um *software* estatístico Statística (StatSoft, 10), a fim de verificar a existência de diferenças significativas entre pelo menos duas médias dentre os tratamentos avaliados. Desta maneira, uma vez confirmada a existência de diferenças significativas pelo teste F, os dados foram analisados por meio do teste Scott Knott.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em virtude das características da peletizadora, não foi possível peletizar a biomassa com 100% de madeira de eucalipto, uma vez que o equipamento era apropriado para peletização de madeiras menos densas, como a madeira de *pinus*.

As informações dos clones que foram utilizados para fazer as composições dos *pellets* encontram-se na Tabela 3. Constata-se que o clone C tem lignina total e densidade maior que os outros dois clones, o que ajudou na hora da peletização e contribuiu positivamente no parâmetro de durabilidade dos *pellets* produzidos com esse clone.

Tabela 3 - Valores médios dos clones de eucaliptos

Clone	Local	DBmP	S:G	EXT	LT
A	BA	0,53	3,32	2,05	30,20
B	BA	0,53	2,96	2,34	30,14
C	BA	0,55	2,83	2,90	31,44

DBmP = densidade básica média ponderada ( $\text{g cm}^{-3}$ ). S:G = lignina siringil:guaiacil. EXT = extrativos (%). LT = lignina total (%).

## 6.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

### 6.1.1 Umidade, densidade a granel e poder calorífico líquido

A umidade das biomassas é um parâmetro importante quando se avaliam diferentes tipos de biocombustíveis como fonte de energia, pois ela afeta o balanço energético da peletização. Portanto, quando o material possui menor umidade, maior será a produção de calor por unidade de massa. A umidade (base úmida) das matérias-primas utilizadas variou de 9,29 a 12,43% (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores médios de umidade, densidade a granel e poder calorífico líquido das biomassas

Biomassa	Umidade $_{bu}$ (%)	Densidade a Granel ( $\text{kg m}^{-3}$ )	PCL ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )	DEL ( $\text{GJ m}^{-3}$ )
E <sub>A</sub> PP <sub>P</sub>	9,90 c <sup>(0,019)</sup>	175,07 e <sup>(1,500)</sup>	16,08 a <sup>(0,105)</sup>	2,82 b <sup>(0,043)</sup>
E <sub>B</sub> PP <sub>P</sub>	9,85 c <sup>(0,082)</sup>	194,81 d <sup>(3,601)</sup>	16,15 a <sup>(0,026)</sup>	3,15 a <sup>(0,063)</sup>
E <sub>C</sub> PP <sub>P</sub>	9,90 c <sup>(0,055)</sup>	211,78 b <sup>(1,200)</sup>	16,18 a <sup>(0,129)</sup>	3,43 a <sup>(0,047)</sup>
E <sub>A</sub> PC <sub>E</sub>	10,55 b <sup>(0,026)</sup>	207,33 c <sup>(3,901)</sup>	15,72 b <sup>(0,053)</sup>	3,26 a <sup>(0,050)</sup>
E <sub>B</sub> PC <sub>E</sub>	10,56 b <sup>(0,182)</sup>	215,82 b <sup>(1,500)</sup>	15,72 b <sup>(0,013)</sup>	3,39 a <sup>(0,027)</sup>
E <sub>C</sub> PC <sub>E</sub>	10,49 b <sup>(0,076)</sup>	227,70 a <sup>(3,301)</sup>	15,71 b <sup>(0,134)</sup>	3,58 a <sup>(0,083)</sup>
P	10,35 b <sup>(0,043)</sup>	118,62 f <sup>(1,500)</sup>	16,03 a <sup>(0,002)</sup>	1,90 c <sup>(0,024)</sup>
P <sub>P</sub>	9,29 d <sup>(0,031)</sup>	113,95 f <sup>(2,100)</sup>	15,96 a <sup>(0,016)</sup>	1,82 c <sup>(0,032)</sup>
C <sub>E</sub>	12,43 a <sup>(0,015)</sup>	171,46 e <sup>(1,200)</sup>	15,43 c <sup>(0,134)</sup>	2,65b <sup>(0,005)</sup>

U<sub>bu</sub> = umidade base úmida. E<sub>A</sub> = eucalipto A. E<sub>B</sub> = eucalipto B. E<sub>C</sub> = eucalipto C. E<sub>D</sub> = *pellets* comercial P = pergaminho. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+pélcula prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+pélcula prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+pélcula prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. PCL = poder calorífico líquido. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

A densidade a granel (Tabela 4) de todas as biomassas avaliadas foi inferior a  $250 \text{ kg m}^{-3}$ . Segundo Tumuluru *et al.* (2011), normalmente a densidade a granel de resíduos agrícolas varia entre  $80$  e  $150 \text{ kg m}^{-3}$  e a densidade a granel de madeira (cavacos ou serragem) varia entre  $150$  e  $250 \text{ kg m}^{-3}$ .

Protásio *et al.* (2016) trabalharam com resíduos florestal e agrícola (madeira e café), em diferentes proporções, e encontram valores de  $171,6 \text{ kg m}^{-3}$  densidade a granel para casca de café e  $118,0 \text{ kg m}^{-3}$  para película prateada. Valores similares foram obtidos neste estudo,  $171,46 \text{ kg m}^{-3}$  e  $113,95 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente.

Segundo Gillespie *et al.* (2013), o poder calorífico líquido (PCL) ou útil e a densidade energética líquida (DEL) são parâmetros importantes para poder caracterizar um material como combustível, pois otimiza a quantidade de biomassa (resíduos) na produção de energia e ainda ajuda a logística e a dimensionar as instalações onde o material será armazenado, pois quanto maior o PCL menor espaço será ocupado, o que define a quantidade necessária para atender a uma determinada demanda de energia que se deve produzir.

As composições (eucalipto, pergaminho e película prateada) resultaram nos maiores valores de PCL (Tabela 4), que foi de  $16,18 \text{ MJ kg}^{-1}$  para **EcPP**, tendo **Ce**  $15,43 \text{ MJ kg}^{-1}$  apresentado o menor valor. Esse resultado foi devido a seu alto teor de umidade em relação à composição de maior valor, que teve os menores valores de umidade.

Alguns países, como os Estados Unidos, recomendam umidade abaixo de  $6\%$  para *pellets* de classe Super Premium (SP) e abaixo de  $8\%$  para Premium. Garcia (2010) recomenda trabalhar com um teor de umidade dos *pellets* abaixo de  $10\%$  para obtenção de maior quantidade de energia útil disponível. Além disso, os teores de umidade abaixo de  $10\%$  prolongam o tempo de estocagem do produto, minimizando a propagação de fungos e a deterioração dos *pellets*. Autores como Obernberger e Thek (2010) questionam o valor de umidade abaixo de  $6\%$ , pois, segundo estudos, pode causar problemas no momento da compactação das biomassas, por exemplo, as elevadas forças de atrito das partículas no canal de compressão dificultam a compactação, portanto recomendam trabalhar com umidade entre  $6$  e  $10\%$ . Nas composições de eucalipto e resíduos da despolpa do grão de café, a umidade entre  $4$  e  $6\%$  dificultou a compactação das biomassas, e os *pellets* produzidos tornaram-se

friáveis. Segundo Rabaçal (2010), a matéria-prima deve ter umidade entre 8 e 10%, para ser compactada; apenas a umidade da casca externa (**C<sub>E</sub>**) não se encontra nesse intervalo. Entretanto, em vários estudos sobre a densificação de diferentes biomassas florestais, resíduos de serrarias e resíduos agrícolas, foi utilizada matéria-prima com umidade (base úmida) variando de 5 a 23% (NIELSEN *et al.*, 2009; SERRANO *et al.*, 2011), o que demonstra que a umidade ideal pode variar de acordo com o material (resíduos) para produção dos *pellets*.

### 6.1.2 Características químicas das biomassas e dos *pellets*

Os maiores valores de teor de extrativos dentre todas as biomassas avaliadas foram para a película prateada (**P<sub>P</sub>**), 9,44%, e para a casca externa (**C<sub>E</sub>**). O alto teor de extrativos nessas biomassas interferiu nas composições, por isso sua alta porcentagem de extrativos. De acordo com Vargas-Moreno *et al.* (2012), os extrativos desempenham papel importante na utilização das biomassas como fonte de energia e contribuem para a elevação do poder calorífico dos resíduos, por influenciar suas propriedades físicas e energéticas.

O maior valor de teor de lignina (Tabela 5) foi encontrado para a casca externa do grão de café (**C<sub>E</sub>**), pela composição de eucalipto com pergaminho e para casca externa (**E<sub>C</sub>P<sub>C</sub>E**). Na compactação de biomassas são desejados maiores valores de teores de lignina, pois eles contribuem para a ligação natural entre as partículas de biomassa, aumentando, conseqüentemente, o poder calorífico do biocombustível (DEMIRBAS, 2002). Diante disso, as porcentagens de lignina só para casca externa foram altas em comparação com as obtidas em um estudo realizado por Pereira (2014), com resíduos de eucalipto e *pinus* com 29,74 e 30,35%, respectivamente, o que ajudou na ligação das partículas na formação dos *pellets*.

O teor de cinzas das composições (Tabela 5) foi significativamente alto, principalmente para a casca externa (**CE**). Altos teores de cinzas são indesejáveis nos processos industriais e no uso doméstico da biomassa (aquecimento residencial), pois reduz o poder calorífico do combustível. Obernberger e Thek (2010) ressaltam que o teor de cinzas da matéria-prima não influencia o processo de peletização, quando o seu valor for abaixo de 3,0% para madeiras e 10% para outras biomassas. Por outro lado, valores superiores a esses podem causar desgaste dos roletes e da matriz de peletização, diminuindo a vida útil do equipamento. Desta forma, considerando apenas os valores médios de teor de cinzas, a vida útil do equipamento de compactação, em longo prazo, seria prejudicada com a utilização das biomassas com as misturas dos resíduos da despolpa do café.

Os maiores valores de teores de voláteis (Tabela 5) estão presentes no pergaminho (**P**), na biomassa *in natura* com 84,61%. O teor de voláteis é um parâmetro que está relacionado com o comportamento do combustível na decomposição térmica em forma de gases, principalmente CO e CO<sub>2</sub> (PARK *et al.*, 2013). Segundo Brito e Barrichello (1982), os teores de materiais voláteis, em termos gerais, variam entre 75 e 85%. Garcia (2010), trabalhando com resíduos de eucalipto (serragem), encontrou teores de voláteis de 84%.

Tabela 5 - Valores médios dos teores de extrativos totais, lignina total, holocelulose, cinzas e materiais voláteis, para biomassas *in natura* e *pellets*

ID	Biomassas	Extrativos Totais (%)	Lignina Total (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
<b><i>In natura</i></b>	E <sub>A</sub> PP <sub>P</sub>	4,06 c <sup>(0,183)</sup>	27,76 e <sup>(0,001)</sup>	4,71 g <sup>(0,084)</sup>	82,25 a <sup>(0,380)</sup>
	E <sub>B</sub> PP <sub>P</sub>	4,05 c <sup>(0,056)</sup>	27,63 e <sup>(0,579)</sup>	5,24 e <sup>(0,127)</sup>	84,24 b <sup>(0,122)</sup>
	E <sub>C</sub> PP <sub>P</sub>	3,99 c <sup>(0,001)</sup>	28,07 e <sup>(0,417)</sup>	4,31 h <sup>(0,058)</sup>	82,96 c <sup>(0,084)</sup>
	E <sub>A</sub> PC <sub>E</sub>	2,37 d <sup>(0,509)</sup>	32,95 c <sup>(1,562)</sup>	5,37 e <sup>(0,129)</sup>	81,26 c <sup>(0,235)</sup>
	E <sub>B</sub> PC <sub>E</sub>	2,28 d <sup>(0,070)</sup>	31,29 d <sup>(0,374)</sup>	4,97 f <sup>(0,124)</sup>	82,91 c <sup>(1,123)</sup>
	E <sub>C</sub> PC <sub>E</sub>	2,14 d <sup>(0,035)</sup>	35,19 b <sup>(0,061)</sup>	6,51 d <sup>(0,085)</sup>	82,40 c <sup>(0,534)</sup>
	P	2,72 d <sup>(0,014)</sup>	27,69 e <sup>(0,487)</sup>	7,42 c <sup>(0,009)</sup>	84,61 b <sup>(0,383)</sup>
	P <sub>P</sub>	9,44 a <sup>(0,155)</sup>	28,59 e <sup>(0,127)</sup>	8,70 b <sup>(0,083)</sup>	84,28 b <sup>(0,926)</sup>
	C <sub>E</sub>	7,27 b <sup>(0,014)</sup>	40,58 a <sup>(0,671)</sup>	14,96 a <sup>(0,102)</sup>	76,12 d <sup>(1,199)</sup>
<b><i>Pellets</i></b>	E <sub>A</sub> PP <sub>P</sub>	4,63 b <sup>(0,001)</sup>	35,86 a <sup>(0,001)</sup>	4,70 d <sup>(0,130)</sup>	84,48 b <sup>(0,504)</sup>
	E <sub>B</sub> PP <sub>P</sub>	4,33 b <sup>(0,063)</sup>	29,89 c <sup>(0,954)</sup>	4,00 e <sup>(0,107)</sup>	84,38 b <sup>(0,201)</sup>
	E <sub>C</sub> PP <sub>P</sub>	4,72 b <sup>(0,388)</sup>	29,70 c <sup>(0,212)</sup>	3,57 f <sup>(0,097)</sup>	83,25 c <sup>(0,258)</sup>
	E <sub>A</sub> PC <sub>E</sub>	1,88 e <sup>(0,084)</sup>	31,96 b <sup>(0,438)</sup>	4,17 e <sup>(0,069)</sup>	83,23 c <sup>(0,072)</sup>
	E <sub>B</sub> PC <sub>E</sub>	1,86 e <sup>(0,190)</sup>	29,74 c <sup>(0,247)</sup>	6,28 c <sup>(0,169)</sup>	82,37 c <sup>(0,299)</sup>
	E <sub>C</sub> PC <sub>E</sub>	2,64 d <sup>(0,509)</sup>	32,21 b <sup>(0,106)</sup>	7,01 b <sup>(0,182)</sup>	81,09 d <sup>(0,567)</sup>
	P	1,69 e <sup>(0,205)</sup>	25,97 d <sup>(0,226)</sup>	2,55 g <sup>(0,025)</sup>	85,24 b <sup>(0,524)</sup>
	P <sub>P</sub>	7,77 a <sup>(0,176)</sup>	32,30 b <sup>(0,438)</sup>	9,90 a <sup>(0,034)</sup>	75,95 e <sup>(0,613)</sup>
	C <sub>E</sub>	2,85 d <sup>(0,120)</sup>	36,74 a <sup>(0,777)</sup>	9,69 a <sup>(0,030)</sup>	73,15 f <sup>(0,191)</sup>
E <sub>D</sub>	3,41 c <sup>(0,035)</sup>	29,77 c <sup>(0,390)</sup>	1,28 h <sup>(0,021)</sup>	87,63 a <sup>(1,715)</sup>	

E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+Pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. P = pergaminho. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

Na Tabela 5 estão os valores médios de teores de extrativos, lignina, cinzas e materiais voláteis referentes aos *pellets*. Observa-se que os valores médios de teor de extrativos dos *pellets* mantiveram-se similares ao do material *in natura*. O *pellet* que teve diminuição no valor do teor de extrativos foi a C<sub>E</sub> antes de ser compactada, que possuía 7,27%, e após peletizada ficou com 2,85%. Isso também ocorreu com as composições de E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub>, porém a diminuição não foi tão notável. A redução no teor de extrativos diminui o poder colorífico dos *pellets*, o que influencia negativamente a escolha para sua utilização.

O teor de lignina (Tabela 5) é outro parâmetro importante na produção dos *pellets*, por atuar como aglutinante natural das partículas. Além disso, maiores teores de lignina são desejados na peletização, pois contribuem para aumentar o poder calorífico do combustível produzido. Os maiores percentuais de lignina foram encontrados na **C<sub>E</sub>** e **E<sub>APPp</sub>**. Valores similares foram encontrados por Protásio *et al.* (2014), para eucalipto e madeiras de *Coffea arabica*.

Os *pellets* com os maiores valores de materiais voláteis (Tabela 5) foram os **E<sub>D</sub>** e **P**, e os valores mais baixos foram para **C<sub>E</sub>**. Nota-se similaridade desses valores com os de outros estudos com resíduos provenientes da despolpa do grão de café, como os de Gil *et al.* (2010), que encontraram 79,4%; Leite *et al.* (2015a), que encontraram 80,39% para teores de voláteis em *pellets* de casca de café (**C<sub>E</sub>**); e Protásio *et al.* (2016), que encontraram 77,14% de materiais voláteis em casca de café, 72,07% em película prateada e 77,44% na composição de casca com madeira de eucalipto. Valores altos de materiais voláteis são favoráveis, pois contribuem decisivamente para ajudar na ignição dos combustível (PODDAR *et al.*, 2014), uma vez que na hora da combustão os componentes de CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub> são emitidos, o que facilita a ignição dos *pellets*.

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS

### 6.2.1 Umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica, teor de finos e taxa de compactação

Tabela 6 - Valores médios de umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica, teor de finos e taxa de compactação dos *pellets*

<i>Pellets</i>	Umidade <sub>bu</sub> (%)	D. Granel (kg m <sup>-3</sup> )	Durabilidade M. (%)	T. Finos (%)	Taxa Compactação
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	9,71 a <sup>(0,395)</sup>	644,11 c <sup>(4,596)</sup>	93,96 b <sup>(0,492)</sup>	0,21 c <sup>(0,034)</sup>	3,58 d <sup>(0,111)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	9,78 a <sup>(0,296)</sup>	634,26 d <sup>(4,973)</sup>	93,28 b <sup>(1,571)</sup>	0,22 c <sup>(0,069)</sup>	3,21 e <sup>(0,061)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	9,84 a <sup>(0,063)</sup>	633,41 d <sup>(3,621)</sup>	94,85 b <sup>(0,712)</sup>	0,16 c <sup>(0,028)</sup>	2,99 f <sup>(0,021)</sup>
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	9,24 a <sup>(0,007)</sup>	676,53 b <sup>(8,387)</sup>	91,56 b <sup>(3,778)</sup>	0,23 c <sup>(0,105)</sup>	3,21 e <sup>(0,059)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	8,88 b <sup>(0,070)</sup>	690,79 a <sup>(5,473)</sup>	94,53 b <sup>(1,194)</sup>	0,19 c <sup>(0,050)</sup>	3,22 e <sup>(0,047)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	8,35 b <sup>(0,381)</sup>	684,43 a <sup>(7,194)</sup>	98,17 a <sup>(0,371)</sup>	0,11 d <sup>(0,017)</sup>	2,98 f <sup>(0,057)</sup>
<b>P</b>	8,64 b <sup>(0,183)</sup>	632,56 d <sup>(10,727)</sup>	91,77 b <sup>(2,960)</sup>	0,46 a <sup>(0,158)</sup>	5,21 b <sup>(0,185)</sup>
<b>P<sub>P</sub></b>	8,84 b <sup>(0,205)</sup>	644,36 c <sup>(6,693)</sup>	97,10 b <sup>(2,160)</sup>	0,10 b <sup>(0,213)</sup>	5,42 a <sup>(0,206)</sup>
<b>C<sub>E</sub></b>	9,50 a <sup>(0,261)</sup>	687,48 a <sup>(4,162)</sup>	97,09 a <sup>(0,303)</sup>	0,17 c <sup>(0,069)</sup>	3,96 c <sup>(0,051)</sup>
<b>E<sub>D</sub></b>	7,98 b <sup>(0,650)</sup>	612,24e <sup>(5,084)</sup>	92,56 b <sup>(0,308)</sup>	0,02 d <sup>(0,015)</sup>	3,19 e <sup>(0,054)</sup>

E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. P = pergaminho. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. E<sub>D</sub> = *Pellets* comercial. U<sub>bu</sub> = umidade base úmida. D. granel = densidade a granel. T. finos = teor de finos. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

Os valores médios de umidade dos *pellets* estão entre 7,98 e 9,84%, ou seja, estão dentro dos valores exigidos pelas normas europeias, que é de ≤ 11 e ≤ 12% para *pellets* de madeira e não madeireiros, respectivamente. Segundo Tumuluru *et al.* (2011), a umidade é um fator muito importante na produção, na armazenagem e no transporte dos *pellets*, uma vez que umidade alta dificulta a ignição desse combustível, devido à perda de parte do calor liberado durante a combustão para evaporar a água existente no material.

De acordo com os autores, valores inferiores a 5% de umidade podem propiciar maior geração de finos durante o armazenamento e transporte dos *pellets*, mas, por outro lado, valores superiores a 20% de umidade podem contribuir para a deterioração por decomposição microbiana, ocorrendo perda

de massa dos *pellets*. Stahl *et al.* (2004) relatam que *pellets* abaixo de 10% prolongam o tempo de estocagem do produto, minimizando a proliferação de fungos (desenvolvem acima de 23% de umidade) e a deterioração dos *pellets*. Os valores de umidade obtidos neste estudo estão dentro dos parâmetros mencionados, e ajudam a melhorar suas qualidades.

Para a densidade a granel (Tabela 6), o maior valor médio foi observado para a composição **E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub>**, com 690,79 kg m<sup>-3</sup>, o que faz com que os *pellets* tenham densidade energética e maior volume de energia, que será transportada (caminhão) ou armazenada (silo), estando de acordo com o descrito por Carroll e Finnan, (2012). A densidade a granel fornece o grau ou a taxa de compactação de um material em relação a outro. Por exemplo, os *pellets* da composição **E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub>** são 1,12 vez mais compactados do que os *pellets* de **E<sub>D</sub>** ( $690,79/612,24 = 1,12$ ), o que evidencia a vantagem dos *pellets* de madeira ou as composições com ela como combustível compactado com maior quantidade de energia por unidade de volume.

Quanto à durabilidade (Tabela 6), apenas os *pellets* produzidos de **P<sub>P</sub>**, **C<sub>E</sub>** e a composição **E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>**, com valores 97,10; 97,09; e 98,17%, respectivamente, atenderam à norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), que exige valor de durabilidade superior ou igual a 96%. Uma das razões da composição **E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>** ter atingido o parâmetro foi devido ao eucalipto **E<sub>C</sub>**, que aumentou o valor, por possuir densidade maior. Os outros *pellets* não atingiram os valores estabelecidos pela norma; as demais composições podem ter influenciado os eucaliptos **E<sub>A</sub>** e **E<sub>B</sub>**, que são menos densos. Os *pellets* com baixa durabilidade mecânica tendem a se desintegrar com facilidade durante seu manuseio, armazenamento ou transporte, e a porcentagem de finos será maior, o que terá consequências na hora de seu uso, como causar problema nas esteiras transportadoras e na câmara de combustão (CARROLL; FINNAN, 2012). Segundo Kaliyan e Morey (2009), a durabilidade mecânica é influenciada pelo tamanho das partículas, pela umidade da biomassa, pela composição química e também pela temperatura e pressão do processo de peletização.

Os valores de teores de finos variaram de 0,02 a 0,46 %, estando eles dentro do parâmetro exigido pelas normas europeias, que são de  $\leq 1$  e  $\leq 2$  para *pellets* de madeira e não madeireiros, respectivamente. Observa-se que as biomassas e suas composições estão em condições favoráveis para a

compactação, como alto teor de lignina e baixa umidade, e que os parâmetros de compactação também foram adequados. Segundo Tumuluru *et al.* (2011), *pellets* produzidos em condições desfavoráveis, como teor de lignina baixo, umidade do material inadequado, baixa pressão ou baixa velocidade dos roletes, resultam em quantidade maior de finos.

### 6.2.2 Dimensões, dureza e compressão diametral dos *pellets*

O diâmetro e o comprimento dos *pellets* produzidos (Tabela 7) atendem às exigências estabelecidas pela norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), que é diâmetro até ou entre  $6 \pm 1$  e comprimento até ou entre  $\leq 3,15 \leq 40$  mm. Segundo Liu *et al.* (2013), *pellets* com menores diâmetros (similares aos da norma de 4 a 6 mm) permitem uma combustão mais homogênea, em comparação com a dos *pellets* de diâmetros maiores (10 a 12 mm), principalmente em fornos pequenos.

Tabela 7 - Dimensões, dureza e compressão diametral dos *pellets*

<i>Pellets</i>	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Dureza (kg)	Compressão Diametral (MPa)
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	6,17 b <sup>(0,020)</sup>	16,95 c <sup>(0,524)</sup>	18,24 e <sup>(2,712)</sup>	2,21 d <sup>(0,545)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	6,17 b <sup>(0,022)</sup>	13,85 d <sup>(0,830)</sup>	20,28 d <sup>(4,208)</sup>	2,38 d <sup>(0,664)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	6,19 b <sup>(0,021)</sup>	14,02 d <sup>(1,009)</sup>	20,52 d <sup>(3,885)</sup>	2,17 d <sup>(0,472)</sup>
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	6,15 c <sup>(0,017)</sup>	14,48 d <sup>(0,993)</sup>	21,64 d <sup>(3,627)</sup>	3,93 c <sup>(0,628)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	6,13 d <sup>(0,076)</sup>	14,43 d <sup>(0,989)</sup>	29,56 b <sup>(8,010)</sup>	3,37 c <sup>(1,128)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	6,17 b <sup>(0,020)</sup>	13,79 d <sup>(1,078)</sup>	37,12 a <sup>(6,814)</sup>	3,16 c <sup>(0,997)</sup>
<b>P</b>	6,15 c <sup>(0,018)</sup>	14,01 d <sup>(0,734)</sup>	26,84 c <sup>(4,209)</sup>	6,34 a <sup>(2,940)</sup>
<b>P<sub>P</sub></b>	6,11 d <sup>(0,027)</sup>	21,02 a <sup>(2,853)</sup>	18,32 e <sup>(2,672)</sup>	3,09 c <sup>(1,004)</sup>
<b>C<sub>E</sub></b>	6,12 d <sup>(0,022)</sup>	18,43 b <sup>(1,169)</sup>	29,76 b <sup>(3,112)</sup>	5,32 b <sup>(1,028)</sup>
<b>E<sub>D</sub></b>	6,40 a <sup>(0,047)</sup>	21,05 a <sup>(1,019)</sup>	21,76 d <sup>(1,422)</sup>	0,78 e <sup>(0,055)</sup>

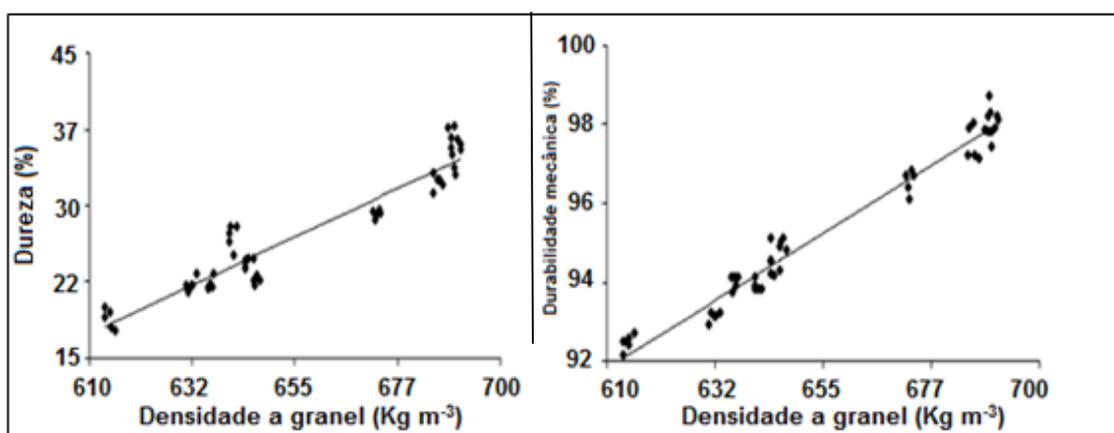
E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. P = pergaminho. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. E<sub>D</sub> = *pellets* comercial. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

Ao comparar a densidade a granel com a dureza, constata-se que a dureza dos *pellets* da composição **EcPC<sub>E</sub>** foi superior à dureza dos demais; o contrário foi observado para a composição de **E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub>**, o que pode estar relacionado com o tipo de composição (mistura) e também pode ter influenciado o clone, devido à diferença de densidade entre eles.

A dureza está diretamente relacionada com a densidade a granel dos *pellets*. Este parâmetro ainda não é normatizado, pois o ensaio de dureza fornece uma leitura rápida de resistência mecânica, sendo um auxílio para ajustar a produção dos *pellets*, com a intenção de melhorar a qualidade do produto final (ZAMORANO *et al.*, 2011).

Valores próximos aos do presente estudo foram encontrados por Cubero-Abarca *et al.* (2014), ao avaliarem resíduos de polpa de café para produzir *pellets*, 3,28 MPa para resistência à compressão diametral, utilizando características similares no processamento dos resíduos. Segundo os autores, a provável explicação para as diferenças nas propriedades mecânicas dos *pellets* é a agregação das diferentes partículas durante o processo de compactação. Nota-se a relação entre os parâmetros de dureza, durabilidade mecânica e densidade a granel dos *pellets* (Figura 5): à medida que a densidade a granel aumenta, a dureza e a durabilidade também aumentam gradualmente, parâmetros importantes na hora de manuseio e transporte. Esse fato pode ser explicado devido à resistência mecânica estar relacionada com as forças de adesão entre as partículas que compõem os *pellets* (ZAMORANO *et al.*, 2011).

Figura 5 - Relação entre dureza, durabilidade e densidade a granel dos *pellets*.



Quando ocorre maior compactação do material, a área de contato entre as partículas das biomassas é maior, conseqüentemente a massa por unidade de volume aumenta e, em geral, os *pellets* terão maior a resistência mecânica (ZAMBRANO *et al.*, 2011; PEREIRA, 2014).

Segundo Pereira (2014), a dureza simula a compressão dos *pellets*, devido ao peso dos próprios durante o armazenamento, transporte ou esmagamento em uma rosca transportadora.

### 6.2.3 Valores energéticos dos *pellets*

Os valores energéticos das biomassas indicam o potencial de energia por unidade de volume. De acordo com os resultados obtidos (Tabela 8), os maiores valores médios do poder calorífico líquido (PCL) foram os das composições **E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub>**, **P** e **E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>**, o que pode ser explicado por seus altos valores de PCS e PCI da mistura, pois o pergaminho tem alto poder calorífico, o que contribui para o aumento. Valores similares foram encontrados em um estudo realizado por Pereira (2014), em diferentes tipos de biomassas, entre elas madeira de eucalipto, com 15,64 MJ kg<sup>-1</sup>. A umidade influencia diretamente o PCL. Os valores energéticos dos *pellets* com alta porcentagem de umidade são menores, o que pode ser visualizado nas composições de eucalipto+pergaminho +película prateada (**EPP<sub>P</sub>**), que possuem as maiores umidades e os menores valores energéticos.

Os maiores valores de DEL foram encontrados na composição de eucalipto+pergaminho+café (**EPC<sub>E</sub>**), com uma média de 11,37 GJ m<sup>-3</sup> (Tabela 8). Após a densificação das biomassas (Figura 5), os *pellets* produzidos **E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub>**, **E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub>**, **E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>**, **P**, **P<sub>P</sub>**, **C<sub>E</sub>**, **E<sub>D</sub>** tiveram aumento, em relação à biomassa *in natura* (Tabela 4), de: 388, 375, 349, 343, 300, 304, 341, 347, 331, 335, 318, 331, 580, 555, 580, 562, 410 e 406%, respectivamente, em densidade energética líquida. Protásio *et al.* (2016), avaliando *pellets* de resíduos de cafeicultura (película prateada e casca externa) de diferentes proporções, encontraram valores de 15,84, 15,89 e 16,74 MJ kg<sup>-1</sup> para casca de café, película, prateada+eucalipto e casca de café+eucalipto, respectivamente, valores esses similares aos obtidos neste estudo.

De acordo com os valores energéticos obtidos, os resíduos da despolpa do café influenciaram os valores energéticos, aumentando-os positivamente, uma vez que o pergaminho (**P**) tem potencial e estava presente em todas as composições.

Tabela 8 - Valores energéticos dos *pellets*

<i>Pellets</i>	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )	PCI (MJ kg <sup>-1</sup> )	PCL (MJ kg <sup>-1</sup> )	DEL (GJ m <sup>-3</sup> )
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	19,97 a <sup>(0,035)</sup>	18,61 a <sup>(0,035)</sup>	16,74 a <sup>(0,032)</sup>	10,73 c <sup>(0,101)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	20,34 a <sup>(0,153)</sup>	18,99 a <sup>(0,153)</sup>	17,08 a <sup>(0,139)</sup>	10,88 c <sup>(0,093)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	19,45 b <sup>(0,186)</sup>	18,09 b <sup>(0,186)</sup>	16,57 b <sup>(0,168)</sup>	10,35 d <sup>(0,048)</sup>
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	19,86 a <sup>(0,044)</sup>	18,50 a <sup>(0,044)</sup>	16,64 a <sup>(0,038)</sup>	11,22 b <sup>(0,019)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	19,60 b <sup>(0,230)</sup>	18,24 b <sup>(0,230)</sup>	16,51 b <sup>(0,210)</sup>	11,29 b <sup>(0,007)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	20,08 a <sup>(0,165)</sup>	18,72 a <sup>(0,165)</sup>	16,84 a <sup>(0,150)</sup>	11,60 a <sup>(0,048)</sup>
<b>P</b>	20,21 a <sup>(0,094)</sup>	18,85 a <sup>(0,094)</sup>	16,96 a <sup>(0,085)</sup>	10,78 c <sup>(0,197)</sup>
<b>P<sub>P</sub></b>	19,44 b <sup>(0,050)</sup>	18,08 b <sup>(0,050)</sup>	16,26 b <sup>(0,044)</sup>	10,38 d <sup>(0,059)</sup>
<b>C<sub>E</sub></b>	18,89 c <sup>(0,213)</sup>	17,53 c <sup>(0,213)</sup>	15,76 c <sup>(0,192)</sup>	10,79 c <sup>(0,093)</sup>
<b>E<sub>D</sub></b>	19,71 b <sup>(0,260)</sup>	18,35 b <sup>(0,260)</sup>	16,51 b <sup>(0,235)</sup>	10,17 d <sup>(0,073)</sup>

E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergamino+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergamino+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergamino+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergamino+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergamino+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergamino+casca externa. P = pergamino. P<sub>P</sub> = película prateada. C<sub>E</sub> = casca externa. E<sub>D</sub> = *pellets* comercial. PCS = poder calorífico superior. PCI = poder calorífico inferior. PCL = poder calorífico líquido. DEL = densidade energética líquida. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

Foi feita uma comparação considerando um caminhão basculante, normalmente utilizado para transportar combustível e materiais lignocelulósicos, com capacidade de 40 m<sup>3</sup>, e a quantidade de energia que será liberada após a combustão completa. Quando são utilizados diferentes tipos de biomassas compactadas (Tabela 9), é possível calcular a quantidade de viagens a serem realizadas para transportar uma mesma quantidade de energia.

Tabela 9 - Comparação de densidades energéticas dos *pellets* com outros biocombustíveis

<i>Pellets</i>	DG (kg m <sup>-3</sup> )	Massa Transportada 40 m <sup>3</sup> (kg)	PCI (MJ kg <sup>-1</sup> )	DE (MJ m <sup>-3</sup> )	Qt. Viagens= Energia ( <i>pellets</i> )
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	644,11	25,764	18,61	479.468,0	1,0
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	634,26	25,370	18,99	481.776,3	1,0
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	633,41	25,336	18,09	458.328,2	1,0
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	676,53	27,061	18,50	500.628,5	1,3
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	690,79	27,631	18,25	504.265,7	1,0
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	684,43	27,377	18,72	512.497,4	1,0
<b>P</b>	632,56	25,302	18,85	476.942,7	1,0
<b>P<sub>P</sub></b>	644,36	25,774	18,09	466.251,6	1,0
<b>C<sub>E</sub></b>	687,48	27,499	17,54	482.332,4	1,0
<b>E<sub>D</sub></b>	612,24	24,489	18,36	456.227,6	1,0
<b>Cavacos<sup>a</sup></b>	210,00	8,400	16,11	135.324,0	3,5
<b>Serragem<sup>a</sup></b>	175,50	7,020	15,26	107.125,2	4,4
<b>R. milho<sup>b</sup></b>	83,00	3,320	17,55	58.266,0	8,2

DG = densidade a granel. PCI = poder calorífico inferior. DE = densidade energética. E<sub>D</sub> = *pellets* comercial. P = *pellets* pergaminho. P<sub>P</sub> = *pellets* película prateada. C<sub>E</sub> = *pellets* casca externa de café. E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. Dados retirados s R. milho = resíduos de milho. <sup>a</sup>Dados retirados de Garcia *et al.* (2012). <sup>b</sup> Dados retirados de Protásio *et al.* (2015).

Nota-se que quanto menor a densidade a granel, maior será a quantidade de viagens a serem realizadas para transportar a mesma quantidade de energia transportada em um caminhão de 40 m<sup>3</sup>, sendo necessário até oito viagens, considerando transportar os resíduos de milho, por exemplo. Este fato também implica que quando esses biocombustíveis são comparados, o que interessa para a empresa, o produtor ou o fabricante é a quantidade de energia que o combustível pode gerar, e não o seu volume. Portanto, para a armazenagem desses biocombustíveis, sem o processo de compactação, é necessária uma área de 3,50 vezes maior para cavacos, 4,50 vezes maior para serragem e 8,20 vezes maior para os resíduos de milho, em relação aos *pellets* produzidos com resíduos da despolpa do grão de café e madeira de eucalipto. Observa-se também (Tabela 9) que uma viagem de cavacos, serragem e resíduos de milho

subutiliza a capacidade do caminhão de carga, que pode chegar a carregar até 40 toneladas.

Os *pellets* diferem no armazenamento quando comparados com a estocagem das matérias-primas *in natura*, como a serragem ou os cavacos de madeiras, tendo como diferença significativa a baixa umidade, fator que limita o ataque de micro-organismos e bolores. Segundo Carvalho (2001), o armazenamento de *pellets* é mais seguro de vazamentos ou incêndios que o gás ou o óleo. Além das características energéticas já destacadas, Soffioni (2012) acrescentou que *pellets* de madeiras possuem outra importante vantagem ambiental, por ser um biocombustível neutro em CO<sub>2</sub>, ou seja, todo gás carbônico liberado na combustão dos *pellets* será adsorvido no crescimento de árvores.

#### 6.2.4 Colorimetria pelo sistema de cor CIE-L\*a\*b\*

Para verificar a existência de diferenças nas cores entre todos os *pellets*, as quais são imperceptíveis ao olho humano, foram calculados os valores de  $\Delta E$ . Todos os *pellets* (Tabela 10) tiveram uma variação de  $\Delta E$  de 9,22 a 31,14, portanto são perceptíveis ao olho humano, pois este percebe claramente as diferenças de cor para  $\Delta E$  em valores superiores a 3 (DIRCKX O *et al.*, 1992).

Os valores de  $\Delta E$  estão altamente correlacionados com os teores de cinzas, o que demonstra que altas concentrações de cinzas tenham relação com cores mais escuras, como foi o caso dos *pellets* de **P<sub>P</sub>** e **C<sub>E</sub>** com  $\Delta E$  de 31,14 e 29,34, respectivamente (Figura 6).

Tabela 10 - Valores das coordenadas colorimétricas e alterações dos *pellets* em relação às amostras-controle de cada amostra

<i>Pellets</i>	L*	$\Delta L^*$	a*	$\Delta a^*$	b*	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
<b>E<sub>D</sub></b>	58,69 a <sup>(2,864)</sup>	---	7,72 a <sup>(0,847)</sup>	---	17,91 b <sup>(1,066)</sup>	---	---
<b>E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub></b>	44,32 c <sup>(2,660)</sup>	-14,37	7,32 b <sup>(0,772)</sup>	-0,40	16,59 c <sup>(1,890)</sup>	-1,33	14,63 c <sup>(4,443)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub></b>	51,68 b <sup>(3,349)</sup>	-7,00	8,08 a <sup>(0,996)</sup>	0,36	22,42 a <sup>(1,543)</sup>	4,51	9,22 d <sup>(3,536)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub></b>	42,44 d <sup>(2,659)</sup>	-16,24	7,37 b <sup>(0,302)</sup>	-0,35	15,86 c <sup>(1,585)</sup>	-2,05	16,53 c <sup>(4,697)</sup>
<b>E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub></b>	41,75 d <sup>(1,925)</sup>	-16,93	7,16 b <sup>(0,392)</sup>	-0,56	14,90 d <sup>(1,080)</sup>	-3,01	17,29 c <sup>(4,044)</sup>
<b>E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub></b>	44,83 c <sup>(3,460)</sup>	-13,86	7,13 b <sup>(0,570)</sup>	-0,59	14,56 d <sup>(1,381)</sup>	-3,36	14,40 c <sup>(4,322)</sup>
<b>E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub></b>	43,69 c <sup>(2,626)</sup>	-15,00	7,21 b <sup>(0,540)</sup>	-0,51	14,11 d <sup>(1,273)</sup>	-3,80	15,59 c <sup>(3,884)</sup>
<b>P</b>	67,83 e <sup>(2,468)</sup>	-20,86	6,50 c <sup>(1,058)</sup>	-1,22	10,97 e <sup>(2,305)</sup>	-6,94	22,08 b <sup>(5,068)</sup>
<b>P<sub>P</sub></b>	30,87 f <sup>(1,286)</sup>	-27,82	2,19 e <sup>(0,368)</sup>	-5,53	5,19 f <sup>(1,364)</sup>	-12,73	31,14 a <sup>(3,448)</sup>
<b>C<sub>E</sub></b>	32,00 f <sup>(1,090)</sup>	-26,69	4,58 d <sup>(0,712)</sup>	-3,14	6,26 f <sup>(1,318)</sup>	-11,66	29,34 a <sup>(3,080)</sup>

E<sub>D</sub> = *pellets* comercial. P = *pellets* pergaminho. P<sub>P</sub> = *pellets* película prateada. C<sub>E</sub> = *Pellets* Casca externa. E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoC+pergaminho+casca externa. L\* (luminosidade), a\* (coordenada do eixo vermelho-verde), b\* (coordenada do eixo azul-amarelo),  $\Delta E^*_{ab}$  - termo: variação total da cor após o tratamento térmico. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste Scott Knott. (---) Desvio-padrão.

Vários fatores afetam as características e a qualidade dos *pellets*, como: a umidade, a matéria-prima e o modo como o biocombustível foi compactado. Os *pellets* podem variar de cor, ocorrendo uns mais escuros que outros, mas essa variação não necessariamente deve ser vinculada aos componentes da matéria-prima. A temperatura utilizada no momento da peletização geralmente altera a cor do *pellet* para mais escuro e com menor brilho, altos valores de luminosidade (L\*) e diferente higroscopicidade (LAM *et al.*, 2011). Isso ocorre por causa do contato dos roletes na matriz e da fricção durante a extrusão, que ocasiona o escurecimento maior na parte externa que o interior do *pellet*.

O procedimento de colorimetria é mais confiante quando os *pellets* são produzidos com a mesma temperatura, pois facilita a detecção de diferenças de cor. Contudo, a capacidade do consumidor para poder definir a qualidade dos *pellets* por meio a cor ainda gera muita incerteza.

Os melhores *pellets* são aqueles capazes de se submeterem a esforços mecânicos e liberam toda a energia quando são queimados. Para isso, os *pellets* devem ter umidade baixa, densidades altas e altos valores energéticos. Por outro

lado, devem-se evitar as cinzas, pois elas reduzem o conteúdo energético dos *pellets* e podem afetar negativamente sua combustão. Segundo Sgarbossa *et al.* (2014), a correlação entre a cor pelo sistema CIE L\*a\*b\* e os valores de teores de cinzas foi considerada um indicador apropriado, já que existe maior preocupação entre os consumidores finais que utilizam o produto para aquecimento doméstico. Os autores também afirmam que altos teores de cinzas influenciam a cor dos *pellets*.

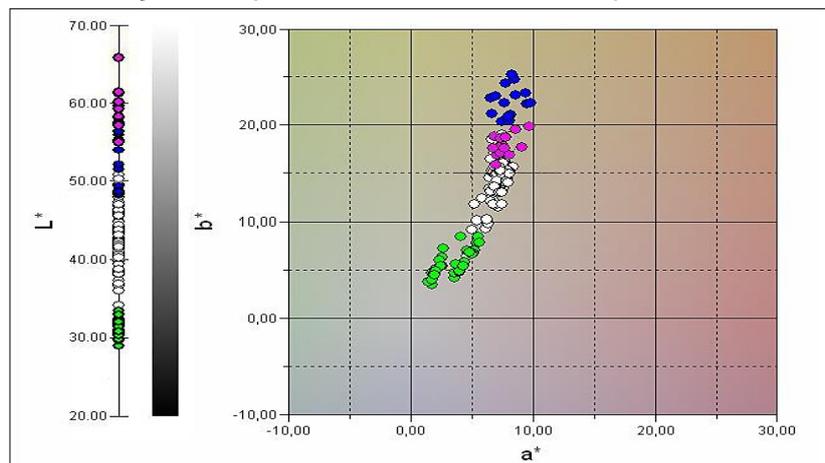
Na Figura 6 estão agrupados os *pellets* de acordo a grau de luminosidade. Os *pellets* identificados com a cor verde possuem alto teor de cinzas e umidade, sendo agrupados perto do valor zero, o que significa que são os mais escuros com base na escala do sistema. As composições de **EPP<sub>P</sub>** e **EPC<sub>E</sub>** estão classificadas com valores médios de 44,78 de L\*. Os *pellets* mais claros foram os de pergaminho (P), com valores médios de 37,83 de L\*, e os maiores teores de cinzas foram para os *pellets* de **PP** e **CE**, com valores médios de 9,90 e 9,69, respectivamente, classificados pelo sistema como os mais escuros, por estarem mais próximos de zero (Figura 6).

Os resultados obtidos neste estudo são similares aos de Sgarbossa *et al.* (2014), que avaliaram os padrões colorimétricos de *pellets* de madeira relacionando-os com a qualidade e os parâmetros energéticos e também constataram que altos teores de cinzas produzem *pellets* mais escuros.

Existe a tendência de consumir *pellets* mais claros, pelo fato de eles terem menor quantidade de cinzas, que são indesejáveis no uso desse combustível granulado. Outra razão para usar esse método é que o Brasil vem crescendo e instalando plantas produtoras de *pellets*, a maioria deles exportada para Europa, e por questão cultural se o País quer entrar no mercado tem de produzir *pellets* mais claros e que se ajustem às normas europeias.

Rosilho (2014) fez um levantamento de produção de *pellets* de madeira de *pinus* para exportar desde São Paulo até Europa, com valor posto em fábrica de 28 R\$ m<sup>-3</sup>, e constatou que ainda são poucos os dados de custo e produção dos *pellets* de eucalipto. Os *pellets* de *pinus* são exportados por serem usados para aquecimento residencial na Europa e por sua cor mais clara satisfazer a preferência dos europeus.

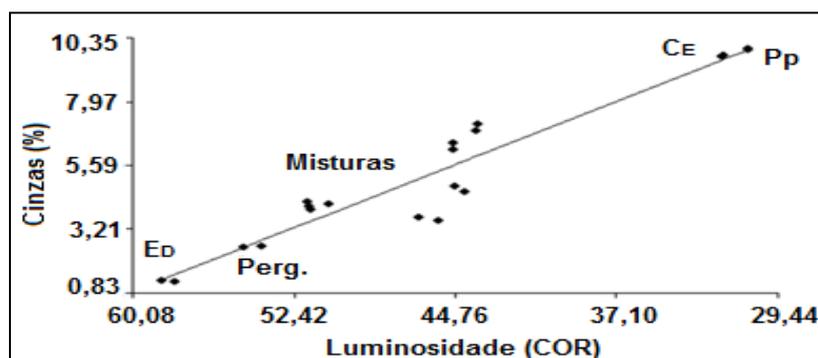
Figura 6 - Classificação dos *pellets* de acordo com os parâmetros colorimétricos.



● Pellets de pergaminho (P). ● Pellets de clone comercial (ED). ○ Pellets das misturas (EPP - EPE). ● Pellets de película prateada (PP) e Pellets casca externa (CE)

Constatou-se que o teor de cinzas influenciou a cor dos *pellets* (Figura 7) e que os pellets **CE** e **PP** possuem os maiores teores de cinzas, que são catalogados como os mais escuros, e os *pellets* **ED** possuem o menor teor de cinzas, sendo assim os claros junto com os *pellets* de pergaminho (**P**). Portanto, é possível afirmar que *pellets* mais escuros contêm altos teores de cinzas e baixa luminosidade, o que indica que eles são mais escuros, sendo considerada indesejada a produção desse tipo de biocombustível.

Figura 7 - Correlação teor de cinzas e luminosidade.



A colorimetria é um método que pode ser aplicado aos *pellets* de forma rápida, além de ser de baixo custo para poder estimar a quantidade de cinzas presente nos *pellets*. Esse ainda não é um método normatizado, mais devido à sua facilidade de aplicação e à sua importância ele pode ser utilizado como parâmetro de qualidade.

### 6.2.5 Classificação dos *pellets* de acordo com a norma de qualidade europeia (DIM, 2012)

Na Tabela 11 está o resumo da classificação dos *pellets* produzidos com as dez biomassas avaliadas neste estudo, de acordo com os parâmetros exigidos pelas normas internacionais.

Tabela 11 - Classificação dos *pellets* com base na norma alemã de qualidade

Propriedades dos <i>Pellets</i>										
Normas	Classes	Biomassas (matéria-prima)	Densidade a granel (kg m <sup>-3</sup> )	Umidade <sup>bu</sup>	PCL (MJ mKg <sup>-1</sup> )	Teor e cinzas (%)	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)	Durabilidade mecânica	Finos (%)
<b><i>Pellets</i> de Madeiras EM 1496-2 (DIN, 2012)</b>	A2	E <sub>D</sub>	A	A	A	B	A	A	X	A
	A-B	E <sub>A</sub> PP <sub>P</sub>	A	A	A	A,B	A	A	X	A
	A-B	E <sub>B</sub> PP <sub>P</sub>	A	A	A	A,B	A	A	X	A
<b><i>Pellets</i> de Madeiras EM 1496-6 (DIN, 2012)</b>	A-B	E <sub>C</sub> PP <sub>P</sub>	A	A	A	A,B	A	A	X	A
	A-B	E <sub>A</sub> PC <sub>E</sub>	A	A	A	A,B	A	A	X	A
	A-B	E <sub>B</sub> PC <sub>E</sub>	A	A	A	B	A	A	X	A
	A-B	E <sub>C</sub> PC <sub>E</sub>	A	A	A	B	A	A	A,B	A
	A-B	P	A	A	A	A,B	A	A	X	A
	A-B	P <sub>P</sub>	A	A	A	B	A	A	A,B	A
	A-B	C <sub>E</sub>	A	A	A	B	A	A	A,B	A

E<sub>D</sub> = *pellets* eucalipto comercial P = *pellets* pergaminho. P<sub>P</sub> = *pellets* película prateada. C<sub>E</sub> = *pellets* casca externa de café. E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoA+pergaminho+película prateada. E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoB+pergaminho+película prateada. E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub> = eucaliptoC+pergaminho+película prateada. E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoA+pergaminho+casca externa. E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub> = eucaliptoB+pergaminho+casca externa. E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub> = EucaliptoC+pergaminho+casca externa. A e B = classificação de acordo com a norma específica. X = parâmetro fora dos valores da norma.

Os *pellets* produzidos (Tabela 11) atenderam a quase todos os parâmetros das normas utilizadas, porém algumas análises não foram realizadas neste estudo, por exemplo, a composição elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (CHNS) e cloro. Os parâmetros que foram atendidos são densidade a granel, umidade, PCL, teor de cinzas, diâmetro, comprimento e finos. O único parâmetro que não foi atendido foi durabilidade. Os *pellets* de **E<sub>c</sub>PC<sub>E</sub>**, **P<sub>P</sub>** e **C<sub>E</sub>** atenderam à especificação de durabilidade mecânicas.

A quantidade de cinzas das matérias-primas de **P<sub>P</sub>** e **C<sub>E</sub>** atenderam aos valores máximos para classificar os *pellets* na classe B ( $B \leq 10$ ) pelas normas alemãs para *pellets* não madeireiros. Portanto, essas biomassas também influenciaram as composições **E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub>** e **E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub>**, devido ao seu alto teor de cinzas, ficando os valores no limite exigido pelas normas. Uma das opções para reduzir o teor de cinzas é trabalhar com porcentagens (**P<sub>P</sub>** e **C<sub>E</sub>**) menores ou misturar com biomassas com baixo teor de cinzas para equilibrar a porcentagem final e atender aos valores exigidos pelas normas.

A existência de altos teores de cinzas é um parâmetro que pode gerar a exclusão de uma matéria-prima para produção de *pellets* (PEREIRA, 2014), pois alto teor de cinzas faz com que os equipamentos necessitem de manutenção periódica, reduzindo também sua vida útil. O teor de cinzas (material inorgânico) presentes na biomassa vem de sua constituição química, devendo ser ressaltado que não é possível eliminá-lo, mas os minerais oriundos da contaminação da biomassa devem ser evitados. A durabilidade mecânica é o principal parâmetro utilizado para descrever a qualidade física de biocombustível sólido compactado, como os *pellets* (CARROLL; FINNAN, 2012). A maioria dos *pellets* produzidos não atendeu aos valores especificados pelas normas. Aqueles que atenderam a esse parâmetro foram **E<sub>c</sub>PC<sub>E</sub>**, **P<sub>P</sub>** e **C<sub>E</sub>**, com valores 98,17; 97,10 e 97,07%, respectivamente. Quando esse parâmetro não é atendido, recomenda-se ajustar a umidade da matéria-prima e as condições de compactação, principalmente a temperatura, pois são parâmetros primordiais para se ter peletização e ligação entre os materiais (PEREIRA, 2014).

## 7 CONCLUSÕES

Os *pellets* de pergaminho (**P**), os *pellets* comerciais (**E<sub>D</sub>**) e as composições (**E<sub>A</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>B</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>C</sub>PP<sub>P</sub>**, **E<sub>A</sub>PC<sub>E</sub>**, **E<sub>B</sub>PC<sub>E</sub>**) não atenderam às exigências de durabilidade mecânica da norma alemã.

Os *pellets* **E<sub>C</sub>PC<sub>E</sub>**, **P** e **C<sub>E</sub>** atenderam a todas as especificações da norma europeia (alemã) de comercialização. Apesar disso, não foi possível concluir que os *pellets* produzidos com essas biomassas são os melhores dentre os avaliados, pois os parâmetros estabelecidos pela norma utilizada (não madeireiros) são menos exigentes que a norma para *pellets* de madeiras.

Foi encontrado um alto grau de correlação entre as características colorimétricas (CIE L\*a\*b\*) dos *pellets* com fins energéticos e os valores de teor de cinzas, que tem sido considerado para um bom indicador, uma vez que há preocupação dentre os consumidores finais por seu uso em estufas domésticas. A correlação foi constante e os *pellets* mais escuros são propensos a ter maior teor de cinzas, o que seria um problema, confirmando as diferentes cores que podem ser visualmente apreciáveis, cuja qualidade seria menor.

Portanto, a hipótese do estudo é aceita. A geração de *pellets* de clones de eucaliptos e resíduos da despolpa do café resulta em um material energético de qualidade.

## 8 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

A maioria das composições não atendeu ao parâmetro de durabilidade, mais apresentou potencial energético. Portanto, recomenda-se ajustar a umidade ou a temperatura no processo para aumentar o parâmetro de durabilidade mecânica. Outra opção seria trabalhar com temperatura acima de 100°C.

Deve-se fazer o ajuste da granulometria (<5mm) dos resíduos da despolpa do café, para obter melhor adesão nas partículas e aumentar a durabilidade.

O método de torrefação também poderia ser utilizado para ajudar a melhorar a qualidade dos *pellets* e, assim, aumentar os valores que foram atendidos da norma alemã.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARSETH, K.A., PRESTLOKKEN, E. Mechanical properties of peat *pellets*: waybill analysis. **Biosystems Engineering**. v. 84, n3, p. 349-361, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP – M 11/77. **Normas técnicas**. São Paulo: ABTCP, 1977

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6922**. Carvão vegetal - Ensaio físico - Determinação da massa específica - Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 11941**: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL – **ABIB**. 2015. Disponível em: <<http://www.wix.com/abibbrasil/woodpellets>>. Acesso 10 maio 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE PELLETS – **ABIPEL**. 2016. 2p. Disponível em: <<http://www.abipel.com.br/media/5468/ABIPEL-maio-2016.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2016.

BHATTACHARYA, S.C., LEON, M. A.; RAHMAN, M. 2002. **A Study on improved biomass briquetting**. Energy program, School of Environment, Resources and Development. Asian Institute of Technology. Disponível em: <<http://www.retsasia.ait.ac.th/Publications/A%20Study%20on%20Improved%20Biomass%20Briquetting.pdf>> Acesso em: 3 mar. 2015.

BLANDY, R. Ambiente Energia. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2016/01/2016-sera-um-ano-muito-promissor-para-o-sorgo-biomassa/27967>. Acesso em: 02 maio 2016.

BORIN, Geraldo V. PelletBraz S.A. **Comunicação Pessoal com Diretor Industrial**, em 15 de março de 2013.

CAMARGOS, J. A. A. **Colorimetria aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais**. 1999. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

CARVALHO, N.P.R. Implementação do plano de controle, inspeção e ensaio na produção de *pellets* de madeira. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), Instituto Politécnico de Viseu, Portugal, 2011. 43p.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of *pellets* from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Levantamento da safra brasileira: café, primeiro levantamento, janeiro 2016**. Brasília: CONAB, 2016. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_01\\_20\\_17\\_01\\_56\\_boletim\\_cafe\\_-\\_janeiro\\_2016.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_01_20_17_01_56_boletim_cafe_-_janeiro_2016.pdf)>. Acesso em 10 maio 2016.

COUTO, L.; MÜLLER, M.; DE SILVA, A.; CONDE, L. *Produção de Pellets de Madeira – O Caso da Bio-Energy no Espírito Santo*. **Revista Biomassa & Energia**, Viçosa, Minas Gerais, v. 1, n. 1, p. 45-52, 2004.

COUTO, Luiz C.; ABRAHÃO, Christóvão P.; FARIA Emanuel R.; COUTO, Luciano M. F. *Utilizações Energéticas da Biomassa Vegetal*. **Revista Biomassa & Energia**, Viçosa, Minas Gerais, v. 5, n. 1, p. 85-106, 2012.

CUBERO-ABARCA, R.; MOYA, R.; VALARET, J.; TOMAZELLO, M. Use of coffee (*Coffea arabica*) pulp for the production of briquettes and *pellets* for heat generation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 5, p. 461-470, set./out. 2014.

DANON, G. *et al.* Production domestique de briquettes de chauffage de déchets des forêts. Résumés des Mémoires Volontaires. In: CONGRES FORESTIER MONDIAL, 11. 1997, Turquie. **Proceedings...** Turquie: p. 13-22. 1997.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy, Exploration & Exploitation**, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN 51731**: Testing of solid fuels-compressed untreated wood. Requirements and testing. Berlin, 1996.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14775**: **Determination of ash content**. Berlin: CEN, 2009. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14774-1**: **Determination of moisture content – Oven dry method – Part 1: Total moisture – Reference method**. Berlin: CEN, 2010a. 10 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14918**: **Determination of calorific value**. Berlin: CEN, 2010b. 63 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 15103**: **Determination of bulk density**. Berlin: CEN, 2010c. 14 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14961- 2**: **Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: Wood pellets for non-industrial use**. Berlin: CEN, 2011b. 15 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 15104**: **Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods**. Berlin: CEN, 2011c. 15 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14961-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use**. Berlim: CEN, 2012a. 16 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 16127 Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets**. Alemanha, 2012b.

DIAS, J. J. M. **Utilização da biomassa**: avaliação dos resíduos e utilização de *pellets* em caldeiras domésticas. 2002. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2002.

DIAS, J. M. S. et al. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012.

DIRCKX O, TRIBOULOT-TROUY MC, MERLIN A, DEGLIESE X. Modifications de la couleur du bois d'Abies grandis exposé à la lumière solaire. 1992.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **Global wood pellets markets and industry**. Paris: IEA-international Energy Agency – Bioenergy Task 32 2006. 87p.

EUROPEAN BIOMASS ASSOCIATION - AEBIOM. **The notable little ones**. 2015. Disponível em <<http://www.biomais.com>>. Acesso em: 5 maio 2015.

FOELKEL, C. **Gestão ecoeficiente dos resíduos florestais lenhosos da eucaliptocultura**. In: Eucalyptus online book & newsletter 2007. Disponível em: <[http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07\\_residuoslenhosos.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/PT07_residuoslenhosos.pdf)>. Acesso em 15 Abr. 2015.

FLACH, B.; BENDZ, K.; KRAUTGARTNER, R.; LIEBERZ, S. **EU Biofuels Annual 2013**. USDA Foreign Agricultural Service, 34 p. 2013.

GARCIA, D. P. Pellets: Uma questão de competitividade e preço. Revista da Madeira, v.138, p.32-34, 2014.

GILLESPIE, G. D.; EVERARD, C. D.; FAGAN, C. C.; MCDONNELL, K. P. Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. **Fuel**, v. 111, p. 771-777, 2013.

GOLDSCHIMILD, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUSWIG, C. H. Eds **Lignins**. New York: Wiley Interscience, 1971, p.241-246

GOMIDE, J.L. DEMUNER, B.J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klarson modificado. **O papel**, São Paulo, v.47, n.8, p36-38, 1986.

GIL, M. V. et al. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. **Bioresource Technology**, Essex, v. 101, n. 22, p. 8859-8867, 2010.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

HARTLEY, I.D.; WOOD, L. Hygroscopic properties of densified softwood *pellets*. **Biomass and Bioenergy**. v. 32, p. 90–93, 2008.

INDÚSTRIAS BRASILEIRAS DE ARVORES - IBÁ. **Anuário estatístico da IBÁ 2016**. Ano base 2015. Brasília, 2016. 100p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY BIOENERGY – IEA. **Bioenergy**: global wood pellet industry market and trade study - Task 40 “sustainable bioenergy Trade”. 190p. 2011. Disponível em: <[http://www.bioenergytrade.org/downloads/t40-global-wood-pellet-market-study\\_final.pdf](http://www.bioenergytrade.org/downloads/t40-global-wood-pellet-market-study_final.pdf)>. Acesso em: 17 fev. 2015.

KONICA MINOLTA SENSING Inc. **Comunicação precisa da cor**. 1998. 57 p.

LAM, P.; SOKHANSANJ, S.; Bi X, Lim CJ.; MELIN, S. Energy input and quality of pellets made from steam-exploded Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). **Energy Fuels**, 2011.

LEITE, E. R. S. *et al.* Estudo tecnológico da madeira de *Coffea arabica* L. visando à combustão completa e pirólise. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 158-168, 2015a.

LIU, Z. *et al.* The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, Oxford, v. 55, p. 1-5, 2013.

LOPES, J. O. *et al.* Alteração da cor da madeira de teca por tratamento térmico. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n.4, 2014a.

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. **Biomass and Bioenergy**. Ottawa, p. 1420-1426, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/10) Disponível em: <http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>. Acesso em 08 Ago. 2015.

MORI, C. L. S. DE O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.

NIELSEN, N. P. K.; GARDNER, D. J.; FELBY, C. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of saedust. **FUEL**, Copenhagen, v.89, n.1, p.94-98, 2009.

NIELSEN, N. P. K.; GARDNER, D. J.; POULSEN, T.; FELBY, C. Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of

Wood Residues into Fuel Pellets. **Wood and Fiber Science**, v. 41, n. 4, p. 414-425, 2009.

NILSON, D.; BERNESSON, S.; HANSSON, P.-A. Pellet production from agricultural raw materials – a systems study. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 1, p. 679-689, 2011.

NONES, D. L. Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina. 2011. 124f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade do Estado de Santa Catarina, Paraná. 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The pellet handbook: The production and thermal utilisation of pellets**. London: Earthscan, p.593, 2010.

OLIVEIRA, C. M. Pellets: Energia concentrada. **Biomais**. Curitiba. Ano 1, n. 2, p. 39-43, 2014.

OLIVEIRA, C. M. **Cenário de importação elevada de woodpellets**. Curitiba, 2013. 33p. Disponível em: <<http://www.wix.com/abibbrasil/brasilbiomassa>>. Acesso em: 27 abr. 2015.

OLIVEIRA, C. M. Pellets: Pequenos Notáveis. **Biomais**. Curitiba. Ano 2, n. 10, p. 22-32, 2015.

ÖSTRREICHES NORMUNGS INSTITUT. **ÖNORM M 7135**: compressed wood or compressed bark in natural state - Pellets and briquettes. Requirements and test specifications, Vienna, 2000.

PANDEY, A., SOCCOL, R., NIGAM, P., BRAND, D., MOHAN, R., ROUSSOS, S. Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses. **Biochemical Engineering Journal**. v. 6, n. 2, p. 153-162. 2000

PARK, J.; MENG, J. J.; LIM, K. H.; ROJAS, O. J.; PARK, S. Transformation of lignocellulosic biomass during torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 100, p. 199-206, 2013.

PELLETCLUB. **Pellet club Japan** 2009. Disponível em: <<http://www.pelletclub.jp/en/pellet/index.html>>. Acesso em: 5 fev. 2015.

PEREIRA, B. L. Propriedades de *pellets* de diferentes biomassas para fins energéticos. 2014. 73f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

PODDAR, S. *et al.* Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: higher heating value. **Fuel**, London, v. 131, p. 43-48, 2014.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1252-1258, 2012.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Avaliação da qualidade da madeira de *coffea arábica* L. como fonte de bioenergia. **Cerne**, Lavras, v.20, n. 4, p. 541-549, 2014.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Caracterização energética de pellets in natura e torreficados produzidos com madeira residual de *pinus*. **Brazilian Journal Forestry Research**, Lavras, v. 35, n. 84, p. 435-442, 2015.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em *pellets* para geração de energia térmica. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 137-147, 2016

QUIRINO, W. F. **Características de briquetes de carvão vegetal e seu comportamento na combustão**. 1991. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo, escola superior de agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1991.

RABAÇAL, M. E. R. **Influência das características do combustível no desempenho energético e ambiental de caldeiras domésticas**. 2010. 94f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

RASGA, R. O. S. Pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo BPF-A1 em pequenos e médios consumidores no Estado de São Paulo. 2013. 165f. Dissertação (mestrado em agroenergia) - Escola de economia de São Paulo, 2013.

REVOLA, I., *et al.* Optimisation of the manufacturing variables of sawdust *pellets* from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: particle size, moisture and pressure. **Biomass and Bioenergy**. Ottawa, v. 33, p.1351-1357. 2009.

ROBINSON, A. R., MANSFIELD, S. D. Rapid analysis of poplar lignin monomer composition by a streamlined thioacidolysis procedure and near-infrared reflectance-based prediction modeling. *Plant J.* v. 58, n.4, p. 706-706, 2009.

ROSILHO, J. J. Estudo da Viabilidade de Produção de Pellets de Pinus no Brasil para a Exportação. 2014. 36 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenheiro de Mecânico) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2014.

SGARBOSSA, A. *et al.* Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters. 2014. Disponível em <<http://www.elsevier.com/locate/fuel>>. Acesso em 13 maio 2016.

SERRANO, C., MONEDERO, E., LAPUERTA, M., PORTERO, H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 699-706, 2011.

SIMIONI, F. J. Análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal no planalto sul de Santa Catarina. Tese

(Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 131, 2007.

SILVA, M. A., NEBRA, S. A., MACHADO, M. J.; SANHEZ, C. G. The use of Biomassa Residues in the Brazilian Soluble Coffee Industry. **Biomass and Bioenergy**. Campinas, v. 14, n. 5. 1997.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMACOES FLORESTAIS – SNIF. As florestas plantadas. 2015. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>>. Acesso em 8 maio 2016.

SOFFIONI, E. Jornal Brasileiro das Indústrias de Biomassa. Ano 1, ed. 2. Disponível em:<<http://www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=1245>> Acesso em 13 Maio 2016.

SOUZA, M. M. **Propriedades de briquetes e pellets produzidos com resíduos sólidos urbanos**. 2014. 81f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

STAHL, M.; GRANSTRÖM, K.; BERGHEL, J.; RENSTRÖM, R. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. *Biomass and Bioenergy*, Karlstad, Sweden, v. 27, n. 6, p. 621-628, 2004.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. P. P. I. **T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta: TAPPI, 1997. 4 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. P. P. I. **T 257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis**. Atlanta: TAPPI, 1985. 5 p.

TUMULURU, J. S. *et al.* Effect of process variables on the quality characteristics of pelleted wheat distiller's dried grains with solubles. *Biosystems Engineering*. P.466–475, 2010.

TUMULURU, J. S. *et al.* A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VARGAS-MORENO, J. M. *et al.* A review of the mathematical models for predicting the heating value of biomass materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 16, n. 5, p. 3065-3083, 2012

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

VINTERBÄCK, J. *Pellets 2002: the first world conference on pellets*. **Biomass and Bioenergy**. Ottawa, n. 27 p. 513-520. 2004.

VIOTTO, L. A. Projeto e Avaliação econômica de sistemas de Secagem de Borra de Café. 1991. 85 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas: UNICAMP. 1991.

WERTHER, J. *et al.* **Combustion of agricultural residues**. In: Progress in energy and combustion science. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. A Comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 3133-3140, 2011.