



DIEIMES RIBEIRO RESENDE

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE *PELLETS* PRODUZIDOS A
PARTIR DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E FINOS DE
CARVÃO VEGETAL**

LAVRAS - MG

2017

DIEIMES RIBEIRO RESENDE

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE *PELLETS* PRODUZIDOS A PARTIR DE
RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof^a. Dr^a. Maria Lúcia Bianchi
Orientadora

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Coorientador

LAVRAS – MG

2017

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Resende, Dieimes Ribeiro.

Potencial energético de *pellets* produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos e moinha de carvão vegetal : Resíduos lignocelulósicos para produção de *pellets* / Dieimes Ribeiro
Resende. - 2017.

57 p. : il.

Orientador(a): Maria Lúcia Bianchi.

Coorientador(a): Paulo Fernando Trugilho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Carvão vegetal. 2. Bagaço de cana de açúcar. 3. Café. I. Bianchi, Maria Lúcia. II. Trugilho, Paulo Fernando. III. Título.

DIEIMES RIBEIRO RESENDE

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE *PELLETS* PRODUZIDOS A PARTIR DE
RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS E FINOS DE CARVÃO VEGETAL**

**ENERGY POTENTIAL OF *PELLETS* PRODUCED FROM LIGNOCELLULOSIC
WASTE AND CHARCOAL FINES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 12 de abril de 2017.

Dr. Pedro Castro Neto. UFLA

Dr^a. Vássia Carvalho Soares. IFMG

Prof^a. Dr^a. Maria Lúcia Bianchi
Orientadora

Prof. Dr. Paulo Fernando Trugilho
Coorientador

LAVRAS – MG

2017

Primeiramente aos meus pais, que sem seu apoio e incentivo em todos os momentos e de todas as formas, jamais estaria concluindo mais esta etapa em minha vida.

Aos meus irmãos, Pedro, Paulo, João, Dyéssica, Ana e Lívia.

À minha linda e grande companheira, Kaylla, que sempre me ajudou a superar os meus medos e a enfrentar todas as dificuldades desde o dia em que nos conhecemos até aqui.

E por fim, à todos os meus familiares e amigos que de alguma forma sempre estiveram torcendo pelo meu melhor.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciências Florestais e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos de mestrado, ao CNPQ, à FAPEMIG e a FINEP.

À professora Maria Lúcia Bianchi, pela orientação, paciência e disposição para ajudar.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pela coorientação e disponibilização dos equipamentos e laboratório de Biomateriais.

Ao professor Edson Rubens da Silva Leite, do IFMG de Machado, por fornecer o material utilizado como matéria prima e pelas análises realizadas nos laboratórios do IFMG.

Ao professor Pedro Castro Neto, pela disponibilização da estrutura e dos equipamentos para produção dos *pellets*.

Ao professor José Benedito Guimarães Júnior, pelas ideias e auxílio na análise dos dados.

À Raisa Faetti, secretária do programa, sempre disposta a auxiliar a todos quando solicitada.

Ao Antônio Claret, técnico dos laboratórios do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo grande auxílio sempre que solicitado.

À Unidade Experimental em Painéis de Madeira pela disponibilização de equipamentos.

A todos os colegas do departamento, muitos se tornaram grandes amigos para toda a vida.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O Brasil apresenta grande potencial para a produção de combustíveis renováveis devido à vasta biodiversidade e à existência de terras cultiváveis, além de tecnologia e clima favorável. Dos abundantes resíduos da biomassa lignocelulósica que existem no Brasil, destacam-se, pelas boas características para a peletização e geração de calor, o bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos gerados no processamento do café. Dessa forma, realizou-se o trabalho com o objetivo de caracterizar e avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânicas de pellets produzidos da mistura de: 1) bagaço de cana-de-açúcar (BC) com finos de carvão vegetal (FN) e 2) resíduos do processamento do café (RC) com finos de carvão vegetal (FN), em diferentes proporções (tratamentos). Além disso, averiguar quais misturas (tratamentos) produzem pellets que apresentem características que atendam às exigências de uma das normas europeias de comercialização para pellets de biomassa, DIN EN 14961-6. A quantidade de cinzas dos finos de carvão vegetal (FN) é alta (20,95%), o que causou um aumento da porcentagem de cinzas nos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar (BC) e de resíduo de café (RC) com o aumento da quantidade de FN utilizada na preparação dos mesmos (de 0,55 para 2,62% para BC e de 6,10 a 9,60% para RC). Os valores de poder calorífico dos *pellets* apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com a adição de finos de carvão vegetal. O poder calorífico útil dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar variaram de 19,58 MJ kg⁻¹ (100% BC) a 17,85 MJ kg⁻¹ (80% BC e 20% FN), e os *pellets* de resíduo de café apresentaram valores que foram de 15,3 MJ kg⁻¹ (100% RC) a 16,96 MJ kg⁻¹ (70% RC e 30% FN). Todos os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão vegetal atenderam aos parâmetros para comercialização de acordo com a norma DIN EN 14961-1, com exceção do tratamento BC85 (85% de BC e 15% de FN) que apresentou valor de durabilidade mecânica inferior à exigida. Nenhum dos *pellets* produzidos com resíduos de café se enquadrou nos parâmetros estabelecidos pela norma por não apresentarem durabilidade mecânica mínima exigida. Mesmo assim, parâmetros como densidade a granel, cinzas, poder calorífico útil e produção de finos atenderam a norma. Entre os *pellets* produzidos, o tratamento BC80 destacou-se por apresentar o maior poder calorífico útil em comparação a todos os outros tratamentos realizados, e atendeu a todos os parâmetros da norma europeia para *pellets* de biomassa. Mesmo com alta quantidade de cinzas apresentada pelo resíduo de finos de carvão vegetal, houve uma contribuição positiva que pode ser observada principalmente no aumento do poder calorífico útil dos *pellets* na medida em que foi adicionado finos de carvão nos tratamentos. Para não ocorrer problemas com a alta quantidade de cinzas, recomenda-se utilizar baixas porcentagens de finos de carvão vegetal nas misturas ou por utilizar finos com menos quantidade de cinzas.

Palavras-chave: Carvão vegetal. Bagaço de cana-de-açúcar. Café. Densificação. Taxa de compactação.

ABSTRACT

Brazil has great potential for the production of renewable fuels due to the vast biodiversity and the existence of arable land, as well as favorable technology and climate. Of the abundant residues of the lignocellulosic biomass that exist in Brazil, due to the good characteristics for pelletizing and heat generation, the sugarcane bagasse and the residues generated in the processing of coffee stand out. The objective of this work was to characterize and evaluate the physical, chemical, energetic and mechanical properties of *pellets* produced from the mixture of: 1) sugarcane bagasse (BC) with charcoal fines and 2) residues from coffee processing (RC) with charcoal fines (FN) in different proportions (treatments). In addition, find out which mixtures (treatments) will produce *pellets* which have characteristics that meet the requirements of one of the European marketing standards for biomass *pellets*, DIN EN 14961-6. The amount of ash of the charcoal fines (FN) is high (20,95%), which caused an increase in the percentage of ash in sugarcane bagasse (BC) and coffee residue (RC) *pellets* with increasing the amount of FN used in the preparation of the same (from 0,55 to 2,62% for BC and from 6,10 to 9,60% for RC). The calorific values of the *pellets* presented significant differences between the treatments with the addition of charcoal fines. The useful calorific value of sugarcane bagasse *pellets* ranged from 19,58 MJ kg⁻¹ (100% BC) to 17,85 MJ kg⁻¹ (80% BC and 20% FN), and the coffee residue *pellets* presented values that were 15,3 MJ kg⁻¹ (100% RC) at 16,96 MJ kg⁻¹ (70% RC e 30% FN). All sugarcane bagasse *pellets* and charcoal fines met the parameters for commercialization in accordance with DIN EN 14961-1, except for the treatment BC85 (85% of BC and 15% of FN) that presented value of mechanical durability below that required. None of the *pellets* produced with coffee residues conformed to the parameters established by the standard because they did not present the minimum mechanical durability required. Even so, parameters such as bulk density, ash, useful calorific power and production of fines met the norm. Among the *pellets* produced, the BC80 treatment was noted for having the highest useful calorific value compared to all other treatments performed, and met all the parameters of the European standard for biomass *pellets*. Even with high amount of ash presented by the residue of charcoal fines, there was a positive contribution that can be observed mainly in the increase of the useful calorific value of the *pellets* as coal fines were added to the treatments. In order to avoid problems with the high amount of ash, it is recommended to use low percentages of charcoal fines in the mixtures or to use fines with less ash.

Keywords: Charcoal. Sugarcane bagasse. Coffee. Densification. Compaction rate.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Biomassa como fonte de energia.....	12
2.2	<i>Pellets</i>	13
2.3	Mercado de <i>pellets</i> no Brasil	14
2.4	Normatização dos <i>pellets</i> para comercialização.....	15
2.5	Bagaço de cana-de-açúcar	18
2.6	Resíduo do processamento do café	18
2.7	Finos de carvão vegetal	19
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
3.1	Obtenção e preparo da matéria-prima: bagaço de cana-de-açúcar (BC), resíduos do processamento do café (RC) e finos de carvão vegetal (FN)	21
3.2	Caracterização da matéria-prima.....	22
3.3	Processo de peletização	23
3.4	Propriedades físicas	24
3.5	Propriedades Químicas.....	25
3.6	Propriedades energéticas	25
3.7	Propriedades mecânicas	26
3.8	Análise estatística dos dados	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1	Caracterização dos materiais pré-peletização.....	28
4.2	Propriedades físicas dos <i>pellets</i>	33
4.3	Propriedades químicas.....	39
4.4	Propriedades energéticas	43
4.5	Propriedades mecânicas	47
5	CONCLUSÕES.....	50
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	51

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de produção de energia barata, limpa e eficiente, subordinada à urgência na otimização do uso dos recursos, coloca a biomassa no foco das pesquisas mundiais para a produção de energia renovável, por meio do uso de seus resíduos.

O Brasil apresenta grande produção agrícola e florestal e dessa forma, resíduos lignocelulósicos são gerados em abundância. Logo, a valorização energética desses materiais vegetais residuais é uma alternativa para aumentar a eficiência econômica e ambiental do processo produtivo e contribuir para a consolidação de uma matriz energética limpa e ambientalmente adequada.

No processo de utilização energética os resíduos lignocelulósicos podem ser queimados *in natura*, de forma direta ou processados, densificados na forma de *pellets*. O *pellet* é um biocombustível renovável, com baixa umidade, forma homogênea e alta densidade energética, sendo um produto natural de fácil manuseio e estocagem. Os *pellets* de biomassa lignocelulósica constituem-se de pequenos blocos ou esferas cilíndricas, compactadas e densas, resultantes da aglomeração de materiais lignocelulósicos, que são utilizados na geração de energia na forma de calor ou eletricidade (DIAS et al., 2012; GARCIA et al., 2013).

A principal finalidade em compactar a biomassa volumosa em *pellets* é mudar a densidade do combustível. Com o processo de compactação, ocorre também a melhora das características do material para transporte e armazenamento, que atualmente são alguns dos fatores que restringem a utilização em grande escala da biomassa e seus resíduos como fontes de energia térmica. As pesquisas apontam que aplicações de *pellets* de biomassa apresentam um recente aumento em todo o mundo, e entre os países com rápido crescimento na produção de *pellets* de biomassa, estão Estados Unidos, Canadá e Rússia (SHAN et al., 2017).

No entanto, os *pellets* devem atender a alguns padrões de qualidade para se constituir em um produto homogêneo. Além disso, a normatização deve garantir a quantidade e qualidade da energia requerida nos sistemas de geração para os quais este produto será destinado. A padronização das propriedades físicas, mecânicas e energéticas dos *pellets* é um fator de extrema importância, tanto para emissão de laudos de qualidade nacional, que muitas vezes são requeridos pelos próprios consumidores, quanto para o mercado internacional, que investe cada vez mais na importação de resíduo florestal compactado (SPANHOL et al., 2015).

Dos abundantes resíduos da biomassa lignocelulósica que existem no Brasil, destaca-se pelas boas características para a peletização e geração de calor, o bagaço de cana-de-açúcar e os resíduos gerados no processamento do café. O Brasil está entre os maiores produtores mundiais de açúcar e bioetanol, produzidos a partir da cana-de-açúcar, e café processado para consumo interno e exportação, que geram grandes quantidades desses resíduos (DIAS et al., 2012; CONAB, 2017). Mesmo sendo classificados como resíduos do processamento da cana e do café, apresentam características energéticas consideráveis e têm potencial para serem utilizados na produção de *pellets*.

Outro resíduo produzido com abundância e que se mostra interessante para a produção de *pellets* pelas suas características energéticas é a moinha de carvão vegetal (ou finos de carvão vegetal). Sua mistura na biomassa para a peletização pode contribuir positivamente no potencial energético dos *pellets*. A moinha de carvão vegetal, gerada durante o processamento do mesmo, não atinge uma granulometria mínima para utilização em fornos siderúrgicos ou não atende a uma resistência mecânica mínima para tal. Por se tratar de um resíduo, nenhum cuidado especial é tomado durante o seu descarte ou armazenamento, o que pode causar contaminação desse material. A quantidade e tipo de impurezas encontradas na moinha do carvão vegetal podem influenciar positiva ou negativamente nas propriedades energéticas desse material. Ainda assim, seu uso em misturas com outras biomassas para produção de *pellets* pode contribuir para o aumento da quantidade de carbono no material e, conseqüentemente, aumento da energia gerada.

Apesar da Europa e Estados Unidos já utilizarem os *pellets* de diferentes biomassas para os mais variados fins, no Brasil, ainda hoje, a produção e uso de *pellets* ocorre de forma desestruturada, sem qualquer padronização ou normatização, uma vez que o país não possui máquinas peletizadoras adequadas e nem normas oficiais para a produção de compactados de madeira ou outro material lignocelulósico (NONES, 2014). De acordo com levantamentos realizados em 2017, existem 13 empresas produtoras de *pellets* instaladas no Brasil, todas concentradas na região Centro-sul do país.

Dessa forma, realizou-se o trabalho com o objetivo de caracterizar e avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e mecânicas de *pellets* produzidos da mistura de: 1) bagaço de cana-de-açúcar (BC) com finos de carvão vegetal (FN) e 2) resíduos do processamento do café (RC) com finos de carvão vegetal (FN), em diferentes proporções (tratamentos). Além disso, averiguar quais misturas (tratamentos) produzem *pellets* que apresentem características que atendam às exigências de uma das normas europeias de comercialização para *pellets* de biomassa, DIN EN 14961-6.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Biomassa como fonte de energia

A biomassa tem cada vez mais importância como fonte renovável de energia, atendendo às características desejáveis para um biocombustível alternativo nas políticas de mudanças climáticas, que visam à diminuição das emissões de gases do efeito estufa (GEE) (FALCÃO, 2013).

Os resíduos da produção vegetal que permanecem no campo após a colheita são muitos como a palha de arroz, de feijão, soja, milho e trigo dentre outros. Somam cerca de 180 milhões de toneladas por ano (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2015). Apenas uma pequena fração desse montante seria recuperável, mesmo em condições extremamente mecanizadas. Os demais resíduos são gerados durante o processamento, como a casca do arroz, casca de café, bagaço da cana-de-açúcar e a casca da soja (KUZMINA et al., 2007; CARDOZO et al., 2014).

De acordo com estudos realizados por Couto et al. (2004) e Garcia e Caraschi (2012), a cadeia produtiva no setor florestal brasileiro destaca-se por geração de grande quantidade de resíduos que podem ser convertidos em energia de diferentes formas pelos diferentes processos, como por exemplo, a geração de calor por combustão direta, produção de carvão, combustíveis líquidos, gaseificação, entre outros.

Gautam et al. (2014) afirma que os resíduos vegetais apresentam qualidade e valor calórico variável, dificuldade no controle da taxa de combustão, queima rápida e reabastecimento frequente das caldeiras, dificuldade na mecanização contínua, baixa densidade e problemas de logística. Onde a grande maioria dos pontos negativos está atribuída à baixa densidade do material.

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento futuro, e tanto em mercado nacional quanto internacional é considerada como sendo uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (SHANG et al., 2014; JIN et al., 2014).

Na utilização dos resíduos vegetais para a geração de energia, é importante o conhecimento de suas propriedades por meio de análises químicas e energéticas, uma vez que é de suma importância a caracterização da matéria prima (TRUGILHO et al., 2001). Por meio de análise elementar são determinados o teor de carbono, Hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, onde os componentes elementares de relevância na geração de calor são o hidrogênio

e o carbono. A análise química imediata fornece o teor de material volátil, teor de cinzas e teor de carbono fixo. Considerando a produção de carvão vegetal, o desejável é que o material tenha alto teor de lignina e holocelulose e pequena quantidade de cinzas. Já para o material a ser gaseificado, esperam-se alto teor de materiais voláteis e baixo teor de cinzas (JIN et al., 2014; DOSHI et al., 2014; THEERARATTANANOON et al., 2011).

O poder calorífico é uma propriedade importante na avaliação de um combustível sólido e consiste na quantidade de calor liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível, expressa em cal.g^{-1} ou kcal.kg^{-1} . O poder calorífico superior (PCS) considera a água presente no sistema. A partir do PCS, desconta-se a energia gasta para evaporar o hidrogênio de constituição do combustível na forma de água e obtém-se o poder calorífico inferior (PCI). Já o poder calorífico útil (PCU), considera apenas a energia efetivamente disponível no material combustível, o cálculo pode ser realizado a partir do PCI descontando a umidade do material combustível (AXELSSON et al., 2012; SPANHOL et al., 2015).

2.2 *Pellets*

No processo de combustão, a biomassa pode ser utilizada *in natura* ou densificada pela aglomeração de partículas, e um desses meios é na forma de *pellets*. O *pellet* de biomassa trata-se de pequenos grânulos ou cilindros, compactados e densos, resultantes da aglomeração de material lignocelulósico, que são utilizados na geração de energia térmica que pode ser convertida em eletricidade (GARCIA et al., 2016a).

Segundo Garcia et al. (2016a) os *pellets* são um biocombustível renovável natural e de fácil manuseio e estocagem por ser a granel produzido a partir da biomassa lignocelulósica, com baixa umidade, forma homogênea e alta densidade energética. Uma limitação existente é a utilização industrial de *pellets* com teor de cinzas superior a 0,7%, conforme especificado pela norma europeia ISO 17225-6 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO, 2014), para os *pellets* não madeireiros.

Sua principal aplicação é a geração de energia térmica em indústrias ou residências, mas também podem ser usados como combustível para a geração de eletricidade em indústrias ou usinas. Além disso, os *pellets* também são comercializados de forma alternativa, como granulado sanitário para vasos de pequenos animais, principalmente gatos e cachorros, por apresentar características adsortivas (BASU et al., 2011; GARCIA et al., 2013).

Os *pellets*, geralmente, apresentam diâmetro de 6 a 8 mm e comprimento variando de 10 a 40 mm. A baixa umidade e a uniformidade dos *pellets* lhes conferem um desempenho na

combustão mais eficiente que outros combustíveis renováveis tradicionais, como a lenha (GARCIA-MARAVÉ et al., 2015; MIRANDA et al., 2012).

O processo de produção dos *pellets* compreende a secagem e moagem da matéria-prima, sua peletização, resfriamento e peneiramento (STELTE et al., 2012). Durante o processo, a matéria-prima é pressionada por roletes, através de canais de compressão cilíndricos e é convertida em um material aglomerado devido ao amolecimento térmico da lignina que promove a aglutinação das partículas. O processo reduz o volume da biomassa, promovendo um aumento considerável na densidade do produto final, agregando-o maior valor. A temperatura ótima para compactação está próxima de 100°C, neste ponto a lignina plastifica, atuando assim como aglutinante natural entre as partículas.

Vários fatores interferem na qualidade e dificuldade na produção dos *pellets*, como a utilização ou não de vaporização e pré-aquecimento das partículas e os fatores relacionados à peletizadora, como pressão, velocidade dos roletes, dimensões dos canais de compressão e a matriz de compressão (TUMULURU, 2014). Vale ressaltar que para a produção de *pellets* a biomassa deve ser triturada (formando cavacos) e seca (para diminuição da umidade) até a umidade atingir valores abaixo de 15% e no mínimo 8% (base seca). Deve-se moer os cavacos e por fim prensa-los em peletizadoras.

A pressão de compactação varia de acordo com a prensa peletizadora, prensas com maior pressão consomem mais energia. Assim, a pressão de compactação e a temperatura durante o processo de peletização devem ser suficientes para que haja boa compactação da biomassa e os *pellets* produzidos atendam às exigências do mercado.

2.3 Mercado de *pellets* no Brasil

Uma das principais desvantagens para a consolidação de um mercado de *pellets* no Brasil é o desconhecimento da utilização dos *pellets* como um combustível, podendo substituir sem grandes investimentos opções energéticas já existentes, como a lenha por exemplo, conseqüentemente, enraizadas na decisão dos consumidores.

Como o mercado de *pellets* de madeira, com fins energéticos, ainda é novo no Brasil, carece de uma padronização desse combustível e de normas, que poderiam, a princípio, seguir o que já foi desenvolvido na Europa e nos Estados Unidos.

A distribuição da produção de *pellets* por região é desigual. Atualmente, a maior parte da produção das indústrias brasileiras, em torno de 81,4%, estão concentrados no Sul, distribuídos pelos estados do Paraná (PR), Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS).

Cerca de 18,6% estão presentes no estado de São Paulo (SP), região Sudeste do Brasil (GARCIA et al., 2016b).

A falta de políticas públicas mais abrangentes de incentivo, envolvendo as biomassas como um todo, não tem contribuído na divulgação, nem no encorajamento dos potenciais consumidores a promoverem a troca de seus sistemas de geração de calor. Este incentivo poderia vir desde a isenção ou redução de impostos sobre os equipamentos para a queima dessas biomassas, até sobre o próprio combustível (RASGA, 2013).

Por ser um produto novo em muitos países, ainda há uma pequena ou quase inexistente concorrência de mercado, o que causa a incômoda incerteza nos potenciais consumidores em relação ao fornecimento a longo prazo. De forma representativa, o Brasil ainda fabrica poucos tipos e tamanhos de equipamentos para a queima de *pellets* energéticos, acarretando a necessidade de importação desses equipamentos para o comércio e para a indústria, ou até de boilers e de aquecedores residenciais (RASGA, 2013).

2.4 Normatização dos *pellets* para comercialização

As normas reguladoras conhecidas como standards para o combustível *pellets*, estabelecem valores limites para as características dos mesmos, com o objetivo de uma comercialização segura.

As normas utilizadas pelos países produtores de *pellets* não diferem muito umas das outras pois todas elas regulam o uso de aglutinantes com exceção da Suécia, que especifica as concentrações e a qualidade da matéria que pode ser integrada nas diferentes classes de *pellets*, e estabelecem valores para suas características, como densidade a granel, umidade, teor de cinzas, comprimento, diâmetro, poder calorífico, entre outros.

Algumas das normas para a comercialização de *pellets* são ÖNORM M 7135 (Áustria), DIN 51731 (Alemanha), DIN EN 14961 (Alemanha), SN 166000 (Suíça), SS 18 71 20 (Suécia) e normas da Austrian *Pellets* Association (OBERNBERGER e THEK, 2010).

Analisando a normatização nos países onde o mercado de *pellets* de madeira já está consolidado, observa-se que as normas de qualidade na Alemanha são muito rigorosas quanto à concentração de certos elementos químicos e estabelecem valores máximos para essas emissões. Os *pellets* foram divididos em classes por diâmetro e, em 2002, foi criado um selo de qualidade para as indústrias, o *DIN Plus*, que estabelece padrões de conformidade de todo o processo produtivo, bem como de transporte e armazenamento (MALISIUS et al, 2000).

O Comitê Europeu de Normatização (CEN) e alguns institutos com o mesmo propósito passaram a trabalhar conjuntamente, desde meados de 2000, na elaboração de uma

norma-padrão europeia para combustíveis à base de biomassa, abrangendo o teor das cinzas, a durabilidade e a resistência mecânica dos *pellets* de madeira, além de padronizar os métodos mais adequados para os testes a serem aplicados a essa categoria de combustíveis.

Em 2011 foi aprovada a norma EN14961 pela EPC, que trata da biomassa para energia, contendo seis partes. A primeira, EN14961-1, apresenta de forma geral o sistema de classificação para biomassas sólidas e os procedimentos para comercialização. A EN14961-2 é específica para *pellets* de madeira sem destino industrial. Na sequência, a EN14961-3 aborda os briquetes de madeira, a EN14961-4 para o cavaco de madeira, a EN14961-5 para a lenha e, finalmente, a EN14961-6 refere-se aos *pellets* de biomassa de origem não florestal (OBERNBERGER; THEK, 2010).

Mais especificamente, a DIN EN14961-2 divide os *pellets* de madeira em três classes de qualidade, sendo a *ENplus-A1*, considerada premium, a *ENplus-A2*, uma classe intermediária, e a *EN-B*, menos restritiva na maioria dos parâmetros (TABELA 1).

Figura 1 - Selos de qualidade: norma DIN EN 14961-2, *ENplus-a1*, *ENplus-A2* e *EN-B*.



Fonte: European Pellet Council (2013).

A norma DIN EN 14961-6 divide os *pellets* não-madeireiros em duas classes de qualidade, sendo A, a classe de *pellets* superior, e B a classe de *pellets* com menos rigor nos parâmetros de qualidade (TABELA 2). A diferença entre a EN 14961-2 e a EN 14961-6, está nos padrões estabelecidos, em que a norma para *pellets* não-madeireiros é menos exigente que a norma para *pellets* de madeira. Muitos dos parâmetros que são normatizados para *pellets* de madeira não estão incluídos para a norma de *pellets* não madeireiros. Um exemplo, é a exigência da quantidade máxima de alguns metais que podem estar presentes nas cinzas dos *pellets*, como arsênio, cádmio, cromo, cobre, mercúrio, níquel, chumbo e zinco.

Tabela 1 - Especificações da norma EN 14961-2.

Propriedade (Unidade)	EN 14961-2		
	ENplus -A1	ENplus -A2	EN-B
	Madeira do tronco; resíduos de madeira sem tratamento químico	Árvores inteiras sem raízes; madeira do tronco; resíduos de colheita; casca; madeira sem tratamento químico.	Plantios florestais e outras madeiras virgens; resíduos do processamento da madeira; madeira reaproveitada.
Diametro D (mm)	6 ou 8	6 ou 8	6 ou 8
Comprimento (mm)	3,15 a 40	3,15 a 40	3,15 a 40
Densidade a granel (kg m ⁻³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Umidade (%) bu	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cinzas (%) bs	≤ 0,7	≤ 1,5	≤ 3,5
Poder Calorífico Inferior (MJ kg ⁻¹)	16,5 a 19	16,3 a 19	16,3 a 19
Enxofre (%) bs	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,04
Nitrogenio (%) bs	≤ 0,30	≤ 0,50	≤ 1,0
Cloro (%) bs	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03
Durabilidade Mecânica (%) bu	≥ 97,5	≥ 97,5	≥ 96,5
Finos (%) bu	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0
Aditivos (%)	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 2,0
Arsênio (mg/kg) bs	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cádmio (mg/kg) bs	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Cromo (mg/kg) bs	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cobre (mg/kg) bs	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercúrio (mg/kg) bs	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Níquel (mg/kg) bs	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Chumbo (mg/kg) bs	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinco (mg/kg) bs	≤ 100	≤ 100	≤ 100

bu = base úmida, bs = base seca. Fonte: Adaptado de DIN EN 14961-2 (2011b).

Tabela 2 - Especificações da norma EN 14961-6.

Propriedade (Unidade)	EN 14961-6	
	A	B
	Biomassa herbácea; Biomassa de frutas; Mistura de biomassas	Biomassa herbácea; Biomassa de frutas; Mistura de biomassas
Diametro D (mm)	6 ± 1	6 ± 1
Comprimento (mm)	3,15 a 40	3,15 a 40
Umidade base úmida (%)	≤ 12	≤ 15
Umidade base seca (%)	≤ 13,6	≤ 17,6
Cinzas (%) bs	≤ 5	≤ 10
Durabilidade Mecânica (%) bu	≥ 97,5	≥ 96,0
Finos (%) bu	≤ 2	≤ 3
Poder Calorífico Útil - PCU (MJ kg ⁻¹)	≥ 14,1	≥ 13,2
Densidade a granel (kg m ⁻³)	≥ 600	≥ 600
Nitrogenio (%) bs	≤ 1,5	≤ 2,0
Enxofre (%) bs	≤ 0,20	≤ 0,20
Cloro (%) bs	< 0,20	< 0,30

bu = base úmida, bs = base seca. Fonte: Adaptado de DIN EN 14961-6 (2012).

2.5 Bagaço de cana-de-açúcar

Em termos de processamento, o bagaço é o principal resíduo da indústria. O bagaço vem sendo utilizado como fonte de energia para atender à demanda energética (vapor e eletricidade) nas usinas produtoras de açúcar e de etanol. Uma tonelada de colmos de cana-de-açúcar gera entre 240 kg e 300 kg de bagaço (DIAS et al., 2012).

O uso alternativo do bagaço é bastante restrito, devido à sua baixa densidade e a maioria do produto disponível é destinada para uso como combustível na própria usina em que é gerado na queima direta. Cerca de 90% do bagaço da cana processado é destinado para este fim. Os outros usos alternativos vão desde aplicação como condicionante do solo à produção de briquetes e *pellets* (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2017).

O bagaço apresenta Poder calorífico inferior (PCI) de 3.855 kcal/kg (PROTÁSIO et al., 2011). O PCI indica a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa, descontadas as perdas com evaporação da água. Para comparação, o estudo com três clones de eucalipto com sete anos de idade, indicou um PCI médio de 4.450 kcal/kg (GADELHA et al., 2012).

Ainda que a cifra de 10% (ou menos) do bagaço de cana atualmente disponível para o uso, que não seja a queima direta, pareça reduzida, essa porcentagem equivale a mais de 18,7 milhões de toneladas de resíduo (CONAB, 2017). Tal quantidade supera, em muito, a soma de outros resíduos que também se mostram disponíveis para produção de *pellets*.

Além do volume de bagaço de cana que se pode coletar, a vantagem está nos custos de sua obtenção, que podem ser mais baixos do que o necessário para coletar resíduos alternativos, por estarem disponíveis nos pátios das usinas de açúcar e álcool e fábricas de cachaça.

2.6 Resíduo do processamento do café

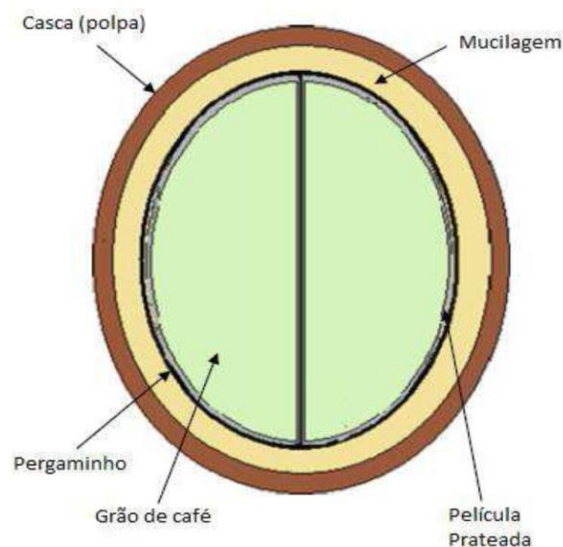
O Brasil é o maior produtor mundial de café, em uma área de 2.256.500 hectares e estima-se a produção de aproximadamente 50 milhões de sacas de 60 quilos de café beneficiado para o ano de 2016 (CONAB, 2017).

De acordo com a Internacional Coffee Organization (ICO, 2016), são produzidas mais de 9 milhões de toneladas anuais de café beneficiado em todo o mundo, onde o Brasil lidera, com produção superior a 3 milhões de toneladas no ano de 2016, vem seguido do Vietnã e Colômbia, como segundo e terceiro produtores mundiais, responsáveis por mais da metade da oferta mundial de café.

Baseado na produção atual de café estima-se que são geradas aproximadamente 9,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos, incluindo casca, polpa, mucilagem, pergaminho, película prateada e borra de café (1,1 t de resíduos sólidos por tonelada de grãos de café processada) (DIAS et al., 2014).

O fruto do café, visto na Figura 2, é ovoide e composto pelo **Epicarpo**: formado pela casca do grão de café. A casca com o amadurecimento passa de verde a vermelha ou amarela. Constituído principalmente por material lignocelulósico; **Mesocarpo** ou **mucilagem**: uma camada de espessura de 0,5 a 2 mm, que se trata de um sistema coloidal líquido, um hidrogel, quimicamente constituído por água, pectinas, açúcares e ácidos orgânicos; **Endocarpo**: conhecido como **pergaminho**. É uma membrana cartilaginosa que recobre a semente ou grão de café. Constituído essencialmente de material celulósico; **Espermoderma**: conhecido como película prateada, que rodeia o endosperma, e é eliminado quando o grão entra no processo de torra; **Endosperma**: é o grão de café, parte utilizada na preparação da bebida de café. A dimensão dos grãos varia no comprimento de 7 a 15 mm, na largura de 6 a 8 mm e no peso de 0,1 e 0,2 g (MUSSATTO et al., 2011).

Figura 2 - Esquema de corte longitudinal do grão do café.



Fonte: Mussato et al. (2011).

2.7 Finos de carvão vegetal

Os finos de carvão vegetal, também conhecidos como moinha de carvão vegetal, são produzidos durante o processo de carbonização e peneiramento do carvão vegetal.

No ano de 2015, o consumo de carvão vegetal no Brasil alcançou 4,6 milhões de toneladas (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN, 2016). No entanto, decorrente da sua elevada friabilidade, o mesmo gera uma grande quantidade de finos, que pode chegar a 25% do total produzido, ou seja, no ano de 2015 houve a geração de aproximadamente 1 milhão de toneladas de finos. Este material, devido à sua baixa granulometria, passa a ser considerado um resíduo industrial que, deve ser direcionado para outras finalidades (COUTINHO; FERRAZ, 1988; ANDRADE; GONÇALVES, 1999), tal qual a sua utilização na composição de substratos orgânicos (ZANETTI et al., 2003).

Algumas empresas em Minas Gerais pesquisaram a briquetagem como uma das opções de aproveitamento do expressivo volume de finos gerados no peneiramento do carvão vegetal, quando da seleção de granulometria, antes do carregamento do alto-forno. Segundo Silveira e Campos (1977), essa quantidade pode variar em função da qualidade do carvão e da exigência de granulometria mínima característica de cada tipo de equipamento de redução.

Outra alternativa é o processo de peletização com o uso de aglutinantes ou incorporação da moinha de carvão vegetal em meio a biomassas para a peletização sem uso de aglutinantes, que é uma finalidade pouco estudada até o momento.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção e preparo da matéria-prima: bagaço de cana-de-açúcar (BC), resíduos do processamento do café (RC) e finos de carvão vegetal (FN)

Foram coletados aproximadamente 30 kg de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no alambique de cachaça localizado na Rodovia BR 265, km 349, Lavras, Minas Gerais. Após a coleta o material foi devidamente processado em moinho de facas utilizando uma peneira com malha de aproximadamente 5,5 mm e, posteriormente, acondicionado para secagem em condições de umidade de aproximadamente 15%.

Os resíduos provenientes do processamento dos grãos do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), aproximadamente 30 kg, foram coletados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Campus Machado. Esse material foi homogeneizado e utilizado na mesma granulometria que se encontrava, ou seja, com diâmetro máximo inferior a 6 mm. Assim como o bagaço de cana-de-açúcar, foram acondicionados para secagem em condições de umidade de aproximadamente 15%.

A moinha de carvão vegetal (finos) foi adquirida a partir dos resíduos oriundos das carbonizações realizadas no Laboratório de Biomateriais, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras. Estes resíduos são oriundos da carbonização de madeiras, do fuste ou também dos galhos, de diversas procedências, como madeira de espécies nativas do cerrado e outros biomas, e espécies comerciais de *Eucalyptus* spp. Os resíduos foram processados manualmente, e com auxílio de peneira mecânica, a fração inferior a 6 mm, aproximadamente 15 kg, foi utilizada na composição dos tratamentos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição dos *pellets* produzidos.

Tratamentos	Composição (Base em massa seca)
BC100	100% Bagaço de cana
BC95	95% Bagaço de cana + 5% Finos de carvão vegetal
BC90	90% Bagaço de cana + 10% Finos de carvão vegetal
BC85	85% Bagaço de cana + 15% Finos de carvão vegetal
BC80	80% Bagaço de cana + 20% Finos de carvão vegetal
RC100	100% Resíduo do café
RC90	90% Resíduo do café + 10% Finos de carvão vegetal
RC80	80% Resíduo do café + 20% Finos de carvão vegetal
RC70	70% Resíduo do café + 30% Finos de carvão vegetal

Fonte: Do autor (2017).

3.2 Caracterização da matéria-prima

A umidade das biomassas lignocelulósicas (base seca e base úmida) foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN, 2010a), em estufa a $105\pm 2^\circ\text{C}$, considerando-se três repetições.

Para a determinação da densidade a granel da biomassa e dos tratamentos, preencheu-se uma proveta de 1000 cm^3 com a amostra e essa foi pesada em balança com precisão de 0,1 g. A densidade a granel da biomassa foi calculada dividindo-se a massa obtida pelo volume da amostra (1000 cm^3). Foram realizadas três repetições para cada amostra.

Os teores de extrativos, lignina total e holocelulose nos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e café também foram quantificados. Os extrativos foram obtidos utilizando-se solução de etanol:tolueno 1:2 (v/v) de acordo com a norma TAPPI T 204 cm-97 (TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI, 1997). A lignina total foi determinada seguindo-se os procedimentos da norma TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002). A holocelulose foi obtida por diferença (Equação 1). Foram consideradas três repetições para cada biomassa.

$$\text{HOL} = 100 - \text{EXT} - \text{LT} - \text{CZ} \quad (1).$$

Em que:

- HOL: Holocelulose (%);
- EXT: Extrativos (%);
- LT: Lignina total (%);
- CZ: Cinzas (%).

Foi realizada também a caracterização dos finos de carvão vegetal. Determinou-se a umidade (base seca e base úmida) com a mesma metodologia utilizada para as biomassas. A caracterização química imediata, quantificando a composição de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, carbono fixo foi determinada de acordo com a norma ASTM D1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2007). A quantificação dos componentes elementares dos finos e das biomassas: carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio (por diferença) foi realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo: Vario Micro Cube), considerando três repetições, conforme realizado por Protásio et al. (2011a). O analisador utiliza como gases de arraste e ignição o hélio e o oxigênio, respectivamente. Amostras de aproximadamente 2 mg, completamente secas, são acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200°C .

Finalizando a caracterização da matéria-prima, foi determinado o poder calorífico superior (PCS) e estimado os poderes caloríficos inferior e útil (PCI e PCU) dos finos de carvão vegetal e das biomassas lignocelulósicas. A determinação do PCS foi realizada utilizando-se um calorímetro digital da marca IKA C-200 de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (ASTM, 2004). Consideraram-se três repetições, sendo as amostras classificadas em peneiras de 40-60 *mesh* e secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante antes da determinação. O poder calorífico inferior (PCI), base seca, assim como realizado por Faria et al. (2016), foi estimado utilizando-se a Equação 2:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - (600 \times 9\text{H}/100) \quad (2).$$

Em que:

- PCI: Poder calorífico inferior (kcal kg^{-1});
- PCS: Poder calorífico superior (kcal kg^{-1});
- H: Teor de hidrogênio (%) obtido na análise química elementar em cada tratamento.

O poder calorífico útil (PCU), assim como realizado por Faria et al. (2016), foi estimado com base na Equação 3:

$$\text{PCU} = \text{PCI} \times \left[\left(\frac{100 - \text{Ubu}}{100} \right) \right] - (6 \times \text{Ubu}) \quad (3).$$

Em que:

- PCI: Poder calorífico inferior (kcal kg^{-1});
- Ubu: Umidade média do lote na base úmida (%).

3.3 Processo de peletização

O processo de densificação dos tratamentos produzidos foi realizado em uma peletizadora com capacidade para produção de 110 kg h^{-1} , pressão do rolo sobre a matriz de aproximadamente 300 kgf e matriz plana horizontal com canais de 6 mm de diâmetro (Figura 3).

Foram produzidos aproximadamente 6 kg de *pellets* por tratamento, conforme delineamento apresentado na Tabela 3.

Figura 3 - Peletizadora.



Fonte: Do autor (2017).

3.4 Propriedades físicas

A umidade dos *pellets* (base seca e base úmida) foi obtida utilizando-se o mesmo procedimento descrito anteriormente para a caracterização da biomassa lignocelulósica (item 3.2).

O diâmetro e comprimento dos *pellets* foram obtidos conforme a norma DIN EN 16127 (DIN, 2012), com medição realizada em paquímetro digital. Nesse ensaio foram considerados com *pellets* de cada tratamento.

A densidade aparente unitária dos *pellets* foi determinada utilizando-se o método estereométrico, ou seja, o volume calculado considerando-se a forma cilíndrica dos *pellets* e a massa obtida com o uso de balança analítica com precisão de 0,1 mg. Para esse procedimento foram amostrados aleatoriamente com *pellets* de cada tratamento.

A determinação da densidade a granel dos *pellets* foi realizada conforme item 3.2. Análise realizada em três repetições para cada amostra.

A taxa de compactação foi calculada dividindo-se a densidade a granel dos *pellets* pela densidade a granel das biomassas ou das misturas realizadas. Desta forma, foi possível determinar a porcentagem de redução de volume promovida pelo processo de peletização.

3.5 Propriedades Químicas

A análise química imediata dos *pellets* foi realizada visando a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e, por diferença, carbono fixo, da mesma forma que realizado para os finos de carvão vegetal, conforme procedimento estabelecido na ASTM D1762-84 (ASTM, 2007). O ensaio foi realizado em triplicata.

A quantificação dos componentes elementares carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio (por diferença), foi realizada seguindo-se a mesma metodologia aplicada aos finos de carvão vegetal, com um analisador universal da marca Elementar (modelo: Vario Micro Cube), conforme realizado por Protásio et al. (2011a).

3.6 Propriedades energéticas

Para a obtenção do poder calorífico superior (PCS) seguiu-se a mesma metodologia adotada para os finos de carvão vegetal no item 3.2, utilizando um calorímetro digital da marca IKA C-200 de acordo com os procedimentos descritos na ASTM E711-87 (ASTM, 2004).

Foram realizadas três repetições, sendo as amostras classificadas em peneiras de 40-60 *mesh* e secas em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante antes da determinação. O poder calorífico inferior (PCI), base seca, foi estimado utilizando-se a Equação 2, e o poder calorífico útil (PCU) foi estimado com base na Equação 3.

Dessa forma, foram calculadas as densidades energéticas unitárias superior, inferior e útil dos *pellets* (DESu, DEIu e DEUu), produto da densidade unitária dos *pellets* (Du) e dos poderes caloríficos médios (PCS, PCI e PCUp). A densidade unitária (Du), diferencia-se da densidade a granel por desconsiderar os espaços vazios entre os grânulos de *pellets*.

As densidades energéticas a granel superior, inferior e útil (DES, DEI e DEU) dos *pellets*, foram obtidas pelo produto da densidade a granel (Dg) e dos poderes caloríficos médios (PCS, PCI e PCU). A densidade a granel (Dg), ao contrário da densidade unitária (Du), leva em consideração os espaços vazios em seu cálculo.

Para a determinação das densidades energéticas superior, inferior e útil (DES, DEI e DEU) dos tratamentos antes de peletizar, foram considerados os mesmos valores para os poderes caloríficos superior e inferior (PCS e PCI) dos *pellets*, pois foram obtidos em base seca. Para determinar a densidade energética útil (DEU), o poder calorífico útil da biomassa (PCUb), que é diferente entre o tratamento antes de peletizar e o *pellet* produzido, foi estimado utilizando-se o mesmo procedimento adotado para os *pellets*, descrito na Equação 3, onde é levado em consideração a umidade do material.

Posteriormente, dividindo-se os valores de densidade energética superior e útil (DES e DEU) dos *pellets* pelos valores de densidade energética superior e útil (DES e DEU) dos tratamentos antes de peletizar, foi obtido o resultado do aumento energético superior e útil (AES e AEU) por m³ de material após a peletização.

3.7 Propriedades mecânicas

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos (partículas menores que 3,15 mm) foram determinadas utilizando-se o equipamento Ligno-Tester, Holmen®, de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010b). Para este ensaio, as amostras de *pellets* foram ventiladas por meio de um jato de ar que simula a destruição natural dos *pellets* durante o transporte e manuseio, em uma câmara com formato de pirâmide quadrangular invertida. Para a determinação da porcentagem de finos, foi utilizado fluxo de ar com pressão de 30 mbar, por 30 segundos. Posteriormente, as amostras sem finos foram submetidas a outro fluxo de ar controlado (70 mbar) durante 60 segundos para determinação da durabilidade mecânica.

A carga máxima no teste de compressão manual, em kgf, foi determinada pelo ensaio em um durômetro manual com escala de 0 a 100 kgf, da marca Amandus Kahl. Um *pellet*, por vez, foi inserido no durômetro e uma carga crescente foi aplicada, até fratura da amostra. Então, foi feita a leitura da carga máxima que um *pellet* pode suportar antes de romper. Para esse ensaio foram considerados vinte *pellets* para cada tratamento.

3.8 Análise estatística dos dados

Foi realizada análise de variância, a 5% de nível de significância, considerando delineamento inteiramente casualizado (DIC) para todas as propriedades analisadas.

Para os dados de análise química de extrativos, lignina total e holocelulose, foram considerados dois tratamentos, biomassa de bagaço de cana-de-açúcar e biomassa de resíduo do café, e três repetições. Após a análise de variância, havendo diferença significativa entre os tratamentos, realizou-se a comparação das médias aplicando o teste Scott-Knott a 5% de significância (SCOTT E KNOTT, 1974).

Para as demais propriedades, os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão vegetal foram analisados separadamente dos *pellets* de resíduo de café e finos de carvão vegetal, por apresentarem diferentes porcentagens de composição.

Após a análise de variância, para os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão vegetal, todas as propriedades que apresentaram diferença significativa entre os tratamentos foram submetidas à análise de regressão linear considerando cinco tratamentos.

O mesmo foi feito para os *pellets* de resíduo do café com finos de carvão, considerando quatro tratamentos.

As variáveis analisadas apresentaram número de repetições variadas, visando o controle do erro experimental, pois cada análise foi realizada por meio de métodos laboratoriais específicos.

Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software Sisvar®, versão 5.6 (FERREIRA, 1998).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais pré-peletização

A caracterização química (extrativos, lignina total e holocelulose) das biomassas lignocelulósicas utilizadas é de grande importância, uma vez que esses componentes influenciam na qualidade dos *pellets* produzidos (Tabela 4). A lignina atua como agente natural de ligação entre as partículas no processo de densificação, contribuindo no melhoramento das propriedades mecânicas (KALIYAN; MOREY, 2010; CARROLL; FINNAN, 2012), além de atuar como um dos constituintes químicos que mais contribuem positivamente para o aumento do poder calorífico (DEMIRBAS, 2002). O tipo de extrativo também pode contribuir para a elevação do poder calorífico superior do material lignocelulósico. Depende muito da constituição química dos extrativos, principalmente relacionada às menores relações H/C e O/C (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008). Os resultados apresentados na Tabela 4, mostram diferenças significativas entre o bagaço de cana-de-açúcar (BC) e o resíduo do processamento do café (RC) para todos os componentes químicos avaliados. O resíduo do processamento do café apresentou valores de extrativos (29,49%) e lignina total (29,44%) consideravelmente maiores que o bagaço de cana-de-açúcar (18,91% de extrativos e 21,27% de lignina total), e mesmo com o teor de extrativos inferior ao resíduo do café, a quantidade de extrativos presentes no bagaço de cana é maior em comparação com outras biomassas.

Tabela 4 - Valores médios de extrativos, lignina e holocelulose do bagaço de cana de-açúcar e no resíduo de café, em porcentagem.

Biomassa	Extrativos (%)	Lignina Total (%)	Holocelulose (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	18,91 a ^(0,37)	21,27 a ^(0,54)	59,27 b ^(0,87)
Resíduo do processamento do café	29,49 b ^(1,18)	29,44 b ^(0,48)	34,97 a ^(0,90)

Médias, na coluna, seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste Scott-Knott. (...) Desvio Padrão.

Fonte: Do autor (2017).

Pereira (2014) encontrou quantidades de 4,38, 14,66 e 15,35% de extrativos totais para palha de arroz, resíduos do algodoeiro e capim elefante respectivamente. Isso deve-se, principalmente, à fração residual de sacarose e polissacarídeos de baixa massa molar não removidos durante a moagem da cana-de-açúcar.

As holoceluloses, soma da celulose e hemiceluloses, compõem a maior parte da constituição química das biomassas lignocelulósicas, como podemos observar para o bagaço de cana (59,27%) e para o resíduo do café (34,97%). Apesar do poder calorífico das holoceluloses em geral ser em torno de 25% menor que o poder calorífico da lignina (DEMIRBAS, 2002), as holoceluloses geram maior quantidade energia do que a lignina durante a degradação térmica, justamente pelo fato de estarem presentes em maior quantidade na biomassa, porém observou-se uma menor diferença entre as porcentagens de holocelulose e de lignina total no resíduo do café.

Os valores médios de materiais voláteis (VOL), cinzas (CZ), carbono fixo (CF), umidade (base úmida- U_{bu} e base seca- U_{bs}), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico útil (PCU) e componentes elementares (C, H, N, S e O) dos finos de carvão vegetal encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores médios da caracterização física, química e energética dos finos de carvão vegetal (FN).

Análise	Propriedades	Valores Médios
Imediata	VOL (%)	25,42 ^(0,52)
	CZ (%)	20,95 ^(0,77)
	CF (%)	53,61 ^(0,35)
Umidade	U_{bs} (%)	6,68 ^(0,33)
	U_{bu} (%)	6,26 ^(0,29)
Poder Calorífico	PCS (MJ kg ⁻¹)	21,43 ^(0,30)
	PCU (MJ kg ⁻¹)	19,48 ^(0,28)
Elementar	O (%)	29,10 ^(1,45)
	C (%)	46,53 ^(1,36)
	H (%)	2,10 ^(0,09)
	N (%)	1,22 ^(0,01)
	S (%)	0,09 ^(0,01)

VOL = Materiais voláteis; CZ = Cinzas; CF = Carbono fixo; U_{bs} = Umidade na base seca; U_{bu} = Umidade na base úmida; PCS = Poder calorífico superior; PCU = Poder calorífico útil; C = Carbono; H = Hidrogênio; N = Nitrogênio; S = Enxofre; O = Oxigênio. (...) Desvio Padrão das médias.

Fonte: Do autor (2017).

É fundamental a avaliação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, pois essas características possuem correlações significativas com o poder calorífico e o desempenho energético do material (PROTÁSIO et al., 2011b; REIS et al., 2012). Observou-se que os finos de carvão vegetal apresentam valor médio de voláteis de 25,42 %, próximo a

valores médios encontrados por Soares et al. (2015) em carvão vegetal de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (22,0%).

Sabe-se que quanto maior o teor de cinzas menor será o poder calorífico do combustível, uma vez que as cinzas não participam do processo de combustão (REIS et al., 2012). O valor médio de cinzas (20,95%) dos finos de carvão vegetal é bastante alto em comparação com os valores apresentados na literatura. Soares et al. (2015) encontraram quantidade de cinzas de aproximadamente 1,5% em carvões da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, e Costa et al. (2014) encontraram valores variando de 2,4% a 5,2% em carvões de madeiras de diferentes espécies do cerrado. O alto teor de cinzas pode ser justificado pela variedade de materiais precursores utilizados na obtenção dos finos de carvão vegetal, além da possível contaminação durante o processamento do material com algum componente inorgânico. O valor médio de carbono fixo foi de 53,61%, apresentando-se inferior ao que é encontrado na literatura. Protásio et al. (2013) encontrou resultados em carvão vegetal produzido a partir da madeira dos diferentes clones de *Eucalyptus*, teor de carbono fixo superior a 75%. Essa quantidade reduzida deve-se a alta quantidade de cinzas, e pelo fato de se tratar de um resíduo, uma vez que o teor de cinzas e o carbono fixo são inversamente proporcionais.

O poder calorífico superior (PCS) e útil (PCU) apresentaram valores médios de 21,43 MJ kg⁻¹ e 19,48 MJ kg⁻¹ respectivamente. Estes valores são considerados baixos para carvão vegetal em comparação com os descritos para diferentes carvões na literatura, que variam entre 27 MJ kg⁻¹ e 31 MJ kg⁻¹ para PCS (COSTA et al., 2014; SOARES et al., 2015). O baixo valor está relacionado a alta porcentagem de cinzas, que reflete significativamente na redução do poder calorífico do material.

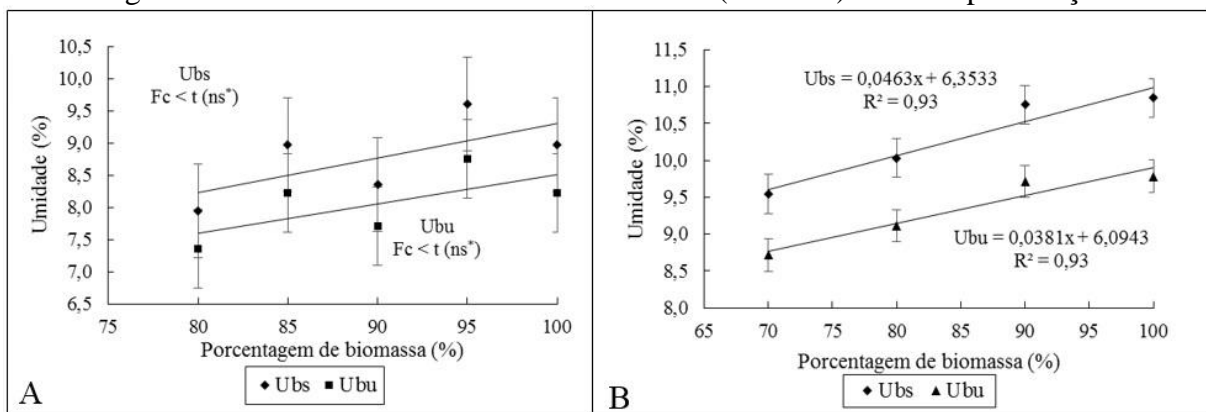
As porcentagens médias de carbono e hidrogênio foram de 46,53 e 2,10% respectivamente. Como o objetivo do trabalho foi aumentar a eficiência energética de um biocombustível, são desejáveis elevados teores de carbono e hidrogênio, pois contribuem na liberação de energia para a formação de CO₂ e H₂O (OBERNBERGER; THEK, 2010).

Já, para as porcentagens de oxigênio, nitrogênio e enxofre, é desejável que sejam baixas. Os finos de carvão vegetal apresentaram 29,10% de oxigênio, 1,22% de nitrogênio e 0,09% de enxofre. Apenas os valores de oxigênio estão acima dos encontrados por Protásio et al. (2013) que foi de 12,43%. Elevados valores de nitrogênio são indesejáveis, pois a liberação desse constituinte na atmosfera pode ocasionar a formação de óxidos tóxicos (NO_x), promover a poluição do ar, formação de chuva ácida e acidificação de solos (DEMIRBAS, 2004;), além da diminuição do valor calórico do combustível (Huang et al., 2009). Há relatos

na literatura de decréscimo do valor calórico de biocombustíveis com o acréscimo do teor de oxigênio (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008; HUANG et al., 2009; ASSIS et al., 2012). Valores médios de enxofre superiores a 0,1% estão relacionados à corrosão das fornalhas utilizadas para combustão de biomassa, e a sua liberação na atmosfera também está associada à formação de compostos SO_x e chuva ácida, conseqüentemente, causando corrosão (BECH et al., 2009; OBERNBERGER; THEK, 2010).

A umidade é um índice muito importante quando se avalia materiais para fins energéticos, pois quanto maior a quantidade de água no combustível, maior será a energia despendida para secar o material e conseqüentemente, menor será o seu valor calórico. A umidade (base seca e base úmida) (FIGURA 4A) dos tratamentos, antes da peletização, para o bagaço de cana com finos de carvão não apresentam diferença estatística, variando a umidade à base seca entre 7,9% e 9,6% e a umidade à base úmida entre 7,3 e 8,7%. Já a umidade (base seca e base úmida) (FIGURA 4B) dos tratamentos do resíduo do café com finos de carvão vegetal, apresentam diferenças estatísticas entre os tratamentos. A umidade à base seca variou de 9,5 a 10,84%, enquanto que a umidade à base úmida apresentou valores entre os tratamentos de 8,7 a 9,7%. As variações nas umidades dos tratamentos justificam-se por haver diferentes porcentagens de material na composição e influência da umidade do ambiente sobre os tratamentos.

Figura 4 - Gráficos de umidade dos tratamentos (misturas) antes da peletização.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; Ubs = umidade na base seca; Ubu = umidade na base úmida; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t$ = F calculado é menor que F tabelado.

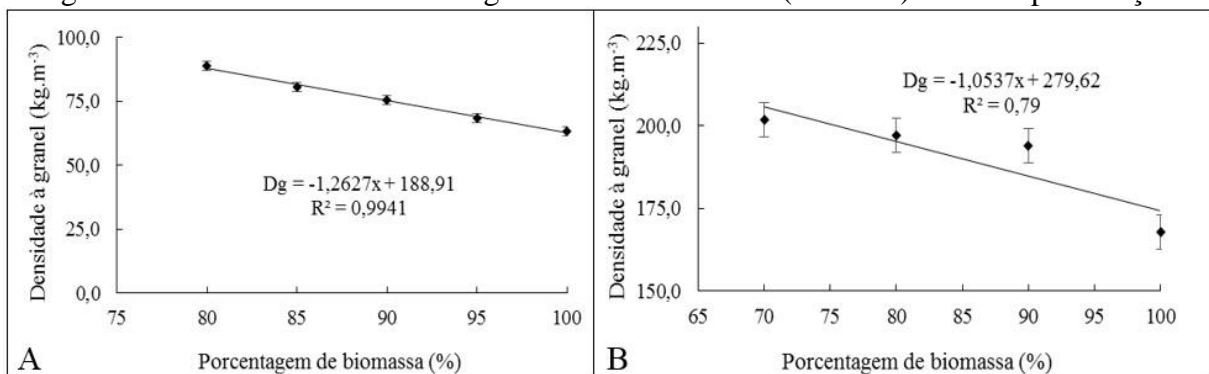
Os tratamentos de resíduo de café e finos de carvão apresentaram valores maiores de umidade quando comparados aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão.

A resistência mecânica e a durabilidade dos *pellets* elevam-se com o aumento da umidade da matéria-prima até um valor ideal (KALIYAN; MOREY, 2010), o qual varia entre

as diferentes biomassas (TUMULURU, 2014). Obernberger e Thek (2010) recomendaram que a matéria-prima para a produção de *pellets* deve ter umidade (base úmida) entre 8,0 e 12,0%. Segundo os autores, quando a umidade está abaixo desse intervalo, as elevadas forças de atrito nos canais de compressão dificultam a peletização e acima do intervalo, as dimensões (diâmetro e comprimento) dos *pellets* não ficam estáveis. Entretanto, estudos sobre peletização de diferentes biomassas utilizaram matéria-prima com umidade (base úmida) variando de 5 a 23% (LARSSON et al., 2008; NIELSEN et al., 2009; SERRANO et al., 2011), demonstraram que a umidade ideal para produção de *pellets* é variável, possivelmente devido à composição química do material, temperatura de plastificação da lignina e formato das partículas.

Os valores de densidade a granel (FIGURA 5) das misturas antes da peletização apresentaram diferença estatística entre as biomassas, havendo variação crescente com o aumento da quantidade de finos de carvão nas misturas. Os tratamentos de bagaço de cana de açúcar apresentaram valores de densidade a granel (FIGURA 5A) variando de $63,3 \text{ kg m}^{-3}$ a $88,7 \text{ kg m}^{-3}$ com a adição de 20% (base em massa seca de biomassa) de finos de carvão vegetal no bagaço de cana.

Figura 5 - Gráficos de densidade a granel dos tratamentos (misturas) antes da peletização.

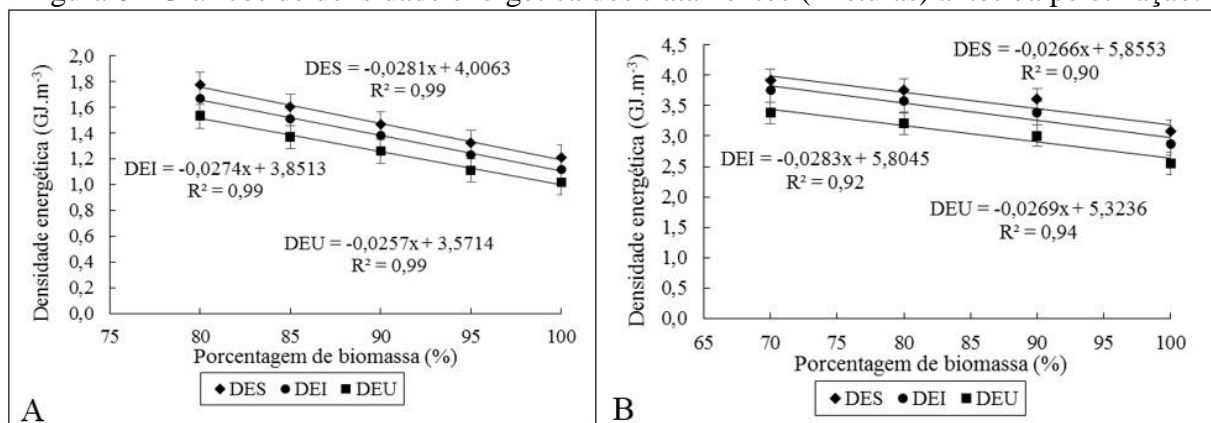


A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; Dg = densidade a granel.

Já os tratamentos com resíduo de café, apresentaram valores de densidade a granel (FIGURA 5B) variando de $167,7 \text{ kg m}^{-3}$ a $201,8 \text{ kg m}^{-3}$. Assim como o esperado, a densidade dos tratamentos para as duas biomassas aumentou com a adição dos finos de carvão. O resíduo do café apresentou densidade a granel consideravelmente maior que o bagaço de cana, o que significa que o bagaço apresentará uma maior taxa de compactação com o processo de peletização.

A Figura 6 apresenta os gráficos de densidade energética superior (DES), inferior (DEI) e útil (DEU) dos tratamentos de bagaço de cana e também dos tratamentos do resíduo de café. Tanto os tratamentos de bagaço de cana quanto para os tratamentos de resíduo do café apresentaram diferenças estatísticas, o que possibilitou o ajuste de equações para as densidades energéticas (superior, inferior e útil) dos dois tipos de materiais. Para o bagaço de cana houve um aumento nos valores de densidade energética útil com o aumento da porcentagem de finos de carvão vegetal nas misturas, aumentando a de $1,02 \text{ GJ m}^{-3}$ (bagaço de cana sem finos de carvão-BC100) para $1,53 \text{ GJ m}^{-3}$ (bagaço de cana com 20% de finos de carvão vegetal-BC80). Por sua vez, a densidade energética também aumentou com a incorporação de finos de carvão vegetal nos resíduos do café, apresentando densidade energética útil de $2,55 \text{ GJ m}^{-3}$ (resíduo do café sem finos de carvão vegetal-RC100) com o aumento para $3,38 \text{ GJ m}^{-3}$ (resíduo do café com 30% de finos de carvão-RC70).

Figura 6 - Gráficos de densidade energética dos tratamentos (misturas) antes da peletização.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão vegetal; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos carvão vegetal; DES = densidade energética superior; DEI = densidade energética inferior; DEU = densidade energética útil.

4.2 Propriedades físicas dos *pellets*

Após a peletização dos tratamentos, os *pellets* foram resfriados e acondicionados. A Figura 7 apresenta a imagem de todos os tratamentos de *pellets* produzidos.

Figura 7 – *Pellets* produzidos e suas respectivas identificações.

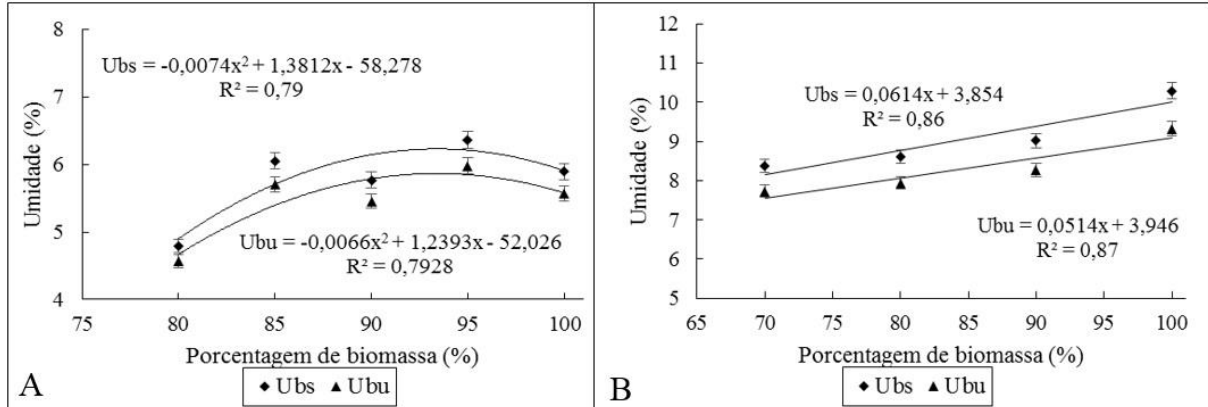


BC100 = 100% de bagaço de cana; BC95 = 95% de bagaço de cana e 5% de finos de carvão vegetal (FN); BC90 = 90% de bagaço de cana e 10% FN; BC85 = 85% de bagaço de cana e 15% de FN; BC80 = 80% de bagaço de cana e 20% de FN; RC100 = 100% de resíduo de café; RC90 = 90% de resíduo de café e 10% de finos de carvão vegetal (FN); RC80 = 80% de resíduo de café e 20% de FN; RC70 = 70% de resíduo de café e 30% de FN.

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 8, ocorreu diminuição da umidade dos *pellets* com o aumento da porcentagem de finos de carvão vegetal (FN) nas misturas. Isso ocorreu provavelmente pelo fato dos finos de carvão apresentarem umidade inferior às biomassas. Houve diferença estatística tanto para os tratamentos de bagaço de cana, quanto para os tratamentos de resíduo de café, possibilitando o ajuste de equações para os 2 tipos de *pellets*. Observou-se que os *pellets* do tratamento BC100 (FIGURA 8A), apresentou umidade (base seca e base úmida) abaixo dos valores de umidade do tratamento BC95, fugindo dos padrões de diminuição da umidade com aumento de finos de carvão nas misturas, que teoricamente formaria uma reta no gráfico. Isso está ligado à temperatura de peletização, que

pode oscilar durante o processo, quanto maior a temperatura no processo de peletização, menor será a umidade do *pellet* após o processo.

Figura 8 - Gráficos de umidade dos *pellets*.

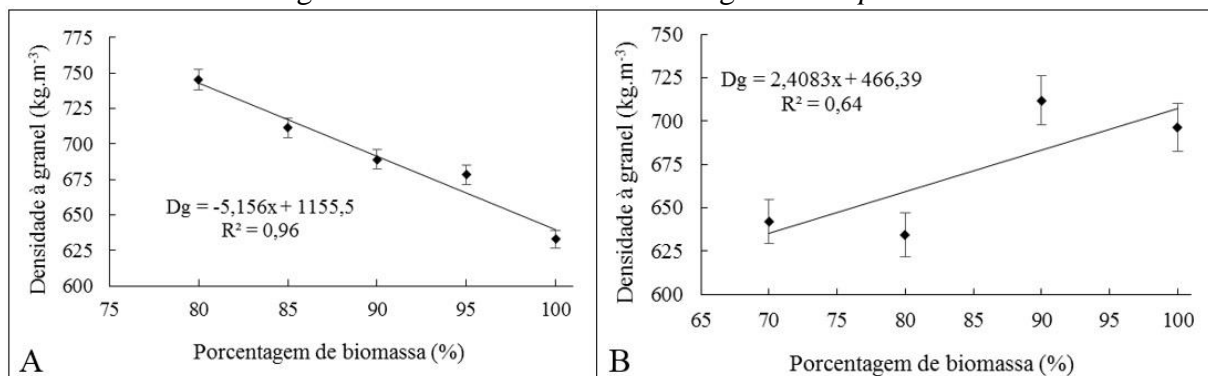


A = gráficos referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráficos referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; Ubs = umidade base seca; Ubu = umidade base úmida.

A norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), estabelece que os *pellets* do tipo A, oriundos de biomassas herbáceas, biomassas de frutas ou de misturas de biomassas, apresentem valores menores que 12,0% de umidade na base úmida e inferiores a 13,6% de umidade na base seca. Portanto, no quesito umidade os biocombustíveis sólidos avaliados atenderam à norma.

A densidade a granel (FIGURA 9) apresentou o comportamento esperado para os *pellets* de bagaço de cana de açúcar (FIGURA 9A), aumentando de $632,9 \text{ kg m}^{-3}$ (BC100) para $745,3 \text{ kg m}^{-3}$ (BC80), houve diferença significativa entre os tratamentos. Já os *pellets* de resíduo de café, não apresentaram este mesmo comportamento.

Figura 9 - Gráficos de densidade a granel dos *pellets*.



A = gráficos referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráficos referente aos tratamentos de resíduo de café com finos e carvão vegetal; Dg = densidade a granel.

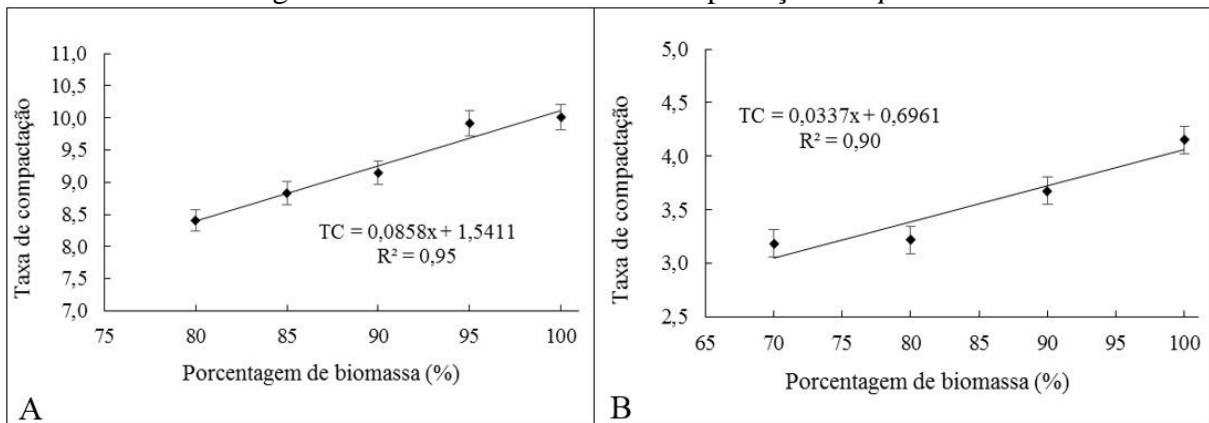
Observa-se que a densidade a granel aumentou do tratamento RC100 para RC90 (FIGURA 9B), de $696,3 \text{ kg m}^{-3}$ para $711,8 \text{ kg m}^{-3}$, porém diminuiu para os demais

tratamentos, RC80 ($634,3 \text{ kg m}^{-3}$) e RC70 ($641,9 \text{ kg m}^{-3}$), mesmo com adição de finos de carvão vegetal. Os tratamentos RC80 e RC70 foram peletizados em dias diferentes dos tratamentos RC90 e RC100, a umidade do ambiente pode ter influenciado assim como a temperatura da matriz peletizadora, que pode não ter atingido temperatura suficiente para plastificar a lignina totalmente.

Dessa forma, o *pellet* não se mantém totalmente compactado, inchando e resultando na diminuição da densidade a granel. A norma de comercialização DIN EM 14961-6 (DIN, 2012a), estabelece que o valor mínimo para densidade a granel para os *pellets* de biomassa seja de 600 kg m^{-3} . Dessa maneira, todos os *pellets* produzidos atenderam à norma, podendo ser comercializados com base neste parâmetro.

Os valores de taxa de compactação (FIGURA 10) apresentaram diferenças significativas entre todos os tratamentos, para as duas biomassas.

Figura 10 - Gráficos de taxa de compactação dos *pellets*.



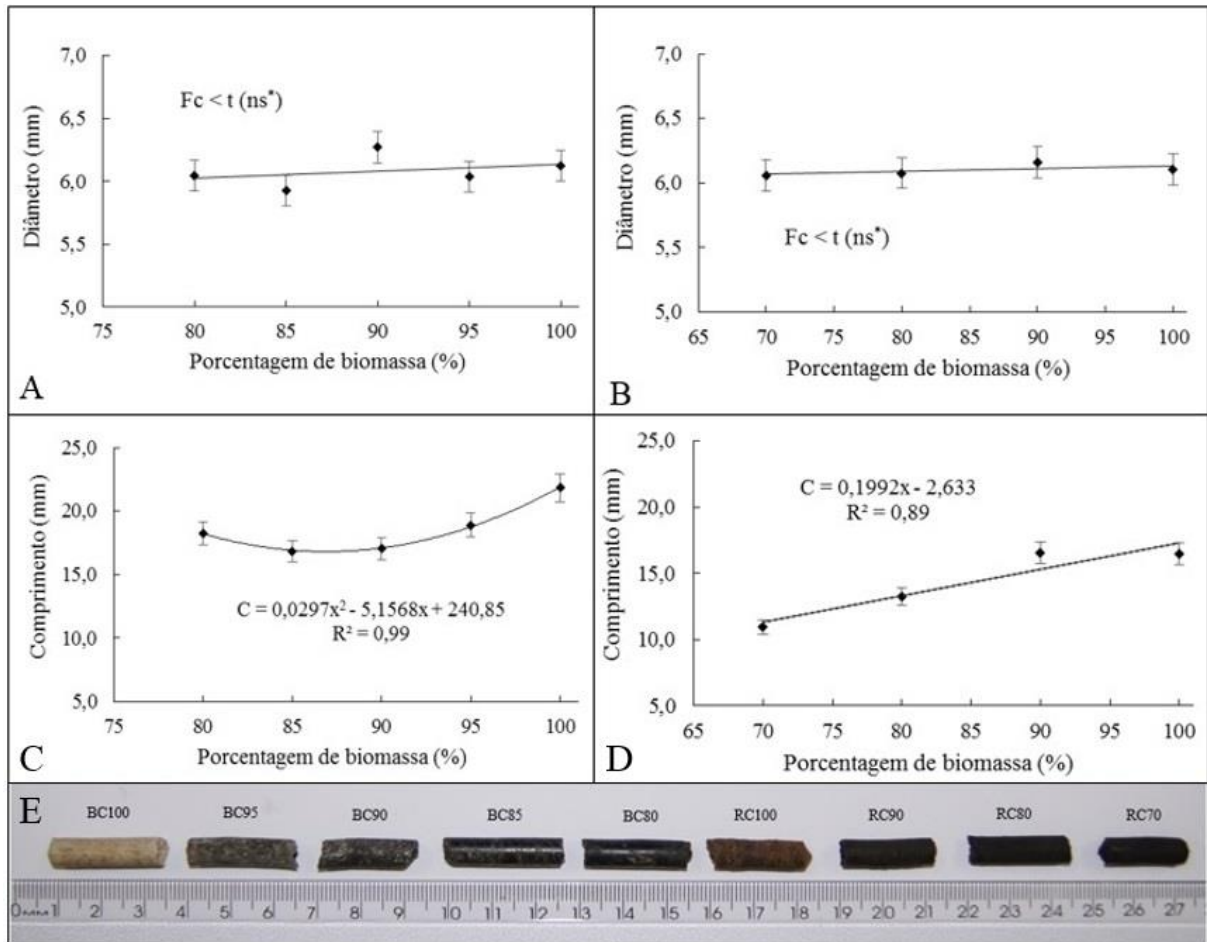
A = gráficos referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráficos referente aos tratamentos de resíduo de café com finos carvão vegetal; TC = taxa de compactação.

As taxas de compactação dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar foram acentuadamente maiores em comparação aos *pellets* de resíduo de café. O *pellet* BC100 aumentou a densidade a granel em 10 vezes (de $63,3 \text{ kg m}^{-3}$ – Fig. 5, para $632,9 \text{ kg m}^{-3}$ – Fig. 9) com o processo de peletização, já o *pellet* RC100 apresentou o aumento em 4,2 vezes. Segundo Protásio et al. (2011a), quanto menor a densidade a granel da biomassa, maior será o aumento percentual da sua densidade após a compactação e melhor será a acomodação das partículas, corroborando com os resultados encontrados para os *pellets* de BC e RC produzidos.

O diâmetro dos *pellets* (FIGURA 11) não variaram, ficando o valor médio em torno de 6 mm para todos os tratamentos, uma vez que esse diâmetro é determinado pelo diâmetro dos canais de compressão da matriz peletizadora. Segundo Mahapatra et al. (2010), a variação de

diâmetro dos *pellets* pode ser ocasionada pela migração de vapor de água do centro para a superfície, o que interrompe a formação das ligações durante a peletização. Porém, não foi observada relação entre a umidade das biomassas ou dos *pellets* com o diâmetro.

Figura 11 - Gráficos de diâmetro e comprimento dos *pellets* e imagem em escala.



BC100 = 100% de bagaço de cana; BC95 = 95% de bagaço de cana e 5% de FN; BC90 = 90% de bagaço de cana e 10% de FN; BC85 = 85% de bagaço de cana e 15% de FN; BC80 = 80% de bagaço de cana e 20% de FN; RC100 = 100% de resíduo de café; RC90 = 90% de resíduo de café e 10% de FN; RC80 = 80% de resíduo de café e 20% de FN; RC70 = 70% de resíduo de café e 30% de FN. A = diâmetro dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = diâmetro dos pellets de resíduo de café com finos de carvão vegetal; C = comprimento dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; D = comprimento dos *pellets* de resíduo de café com finos de carvão; E = *pellets* em escala. (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t$ = F calculado é menor que F tabelado.

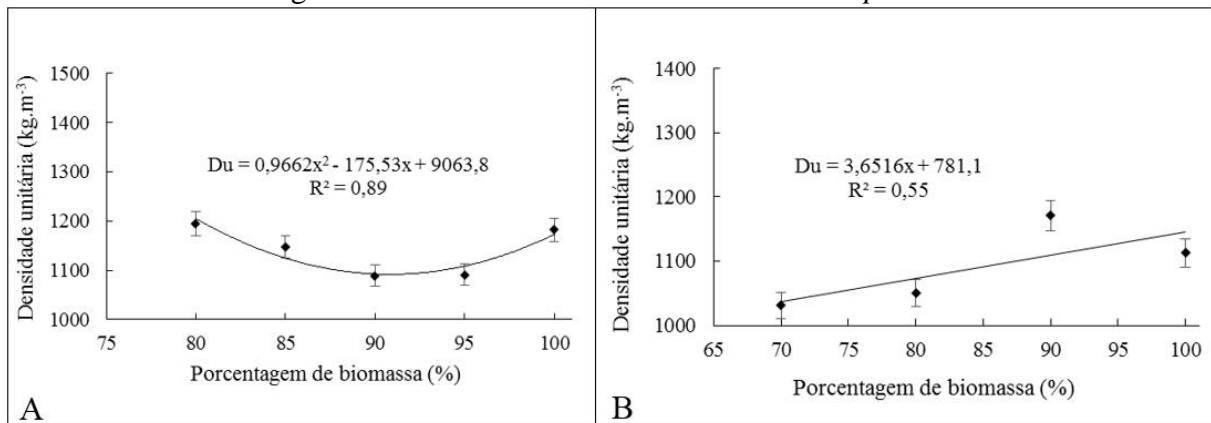
O comprimento (FIGURA 11) apresentou relação com a porcentagem de finos de carvão vegetal incorporada nas biomassas, tanto para o resíduo de café, quanto para o bagaço de cana-de-açúcar. À medida que a porcentagem de finos de carvão vegetal aumenta, o comprimento dos *pellets* diminui. Isso porque a peletização foi realizada sem a adição de aglutinantes, o que pode refletir na resistência dos *pellets*, gerando materiais mais quebradiços a medida que se aumenta a quantidade de finos de carvão. De acordo com Liu et al. (2013), o

diâmetro e o comprimento dos *pellets* afetam a combustão, de modo que menores diâmetros permitem uma taxa de combustão mais uniforme e menores comprimentos facilitam a alimentação do sistema de queima.

O diâmetro e comprimento de todos os *pellets* produzidos atendem às exigências estabelecidas pela norma DIN EN 14961-6 (DIN, 2012a), classificando-se como *pellets* do tipo A, apresentando diâmetro dentro da faixa de 6 ± 1 mm e comprimento de 3,15 a 40 mm.

A densidade unitária apresentou comportamento semelhante à densidade a granel dos *pellets*, porém com valores bem superiores. A diferença entre a densidade unitária e a densidade a granel está no número de espaços vazios que se tem entre um *pellet* e outro dentro do recipiente, quando da determinação da densidade a granel. Na determinação da densidade unitária não existem espaços vazios, resultando em valores maiores em comparação à densidade a granel.

Figura 12 - Gráficos de densidade unitária dos *pellets*.



A = gráficos referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráficos referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; Du = densidade unitária.

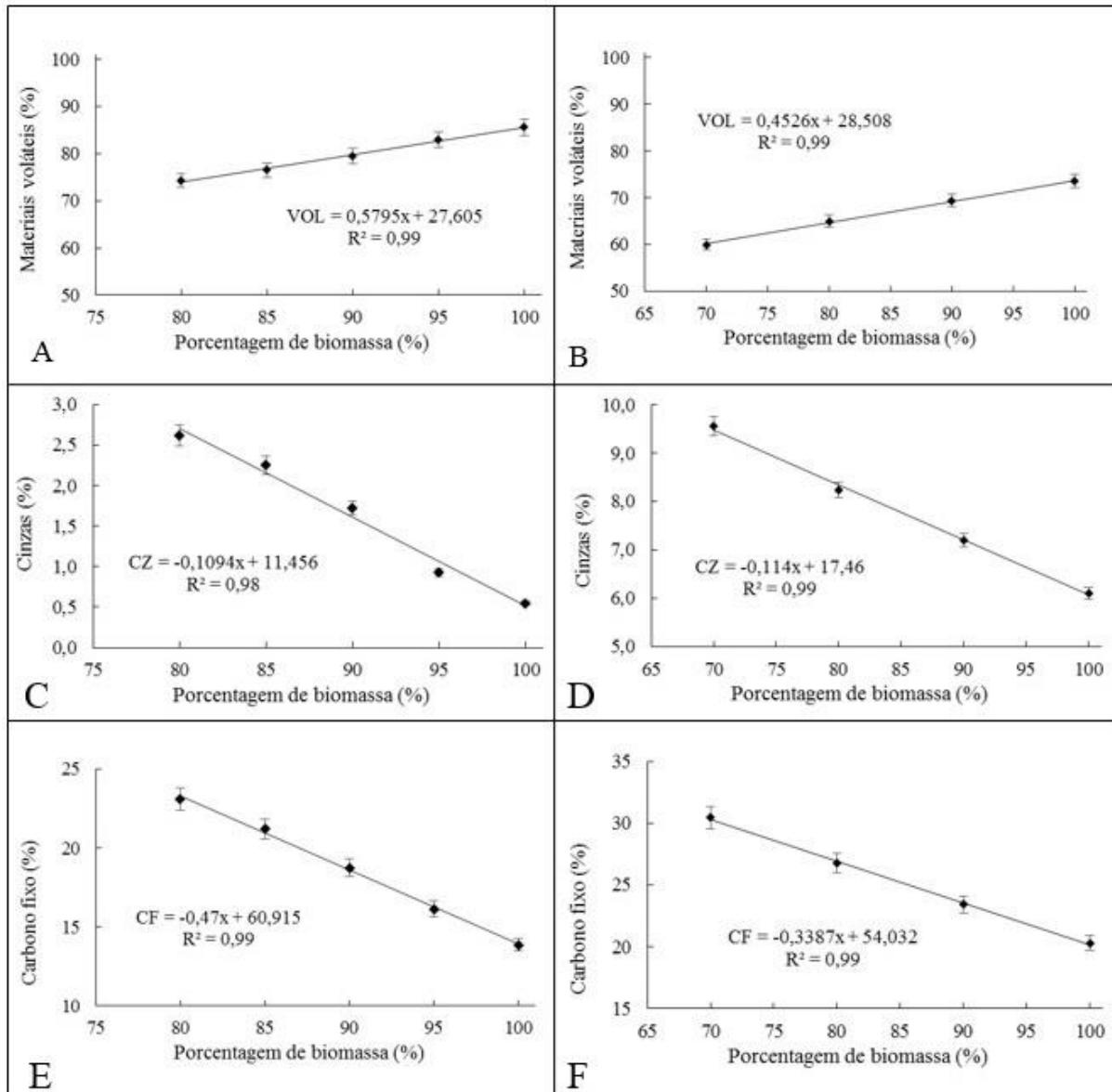
Os resultados apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, para os dois tipos de *pellets* (BC e RC), possibilitando o ajuste de modelos. Outro fator que pode influenciar na densidade dos *pellets* são aspectos ligados ao processo de peletização. Se a temperatura não estiver próxima do ideal, considerada na literatura na faixa de 100°C (OBERNBERGER; THEK, 2010), a lignina não atinge o ponto de transição vítrea e não age efetivamente como aglutinante na ligação entre as partículas.

Comparando as densidades unitárias entre os materiais, os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram maiores valores médios, atingindo até 1200 kg m⁻³.

4.3 Propriedades químicas

As porcentagens de materiais voláteis (FIGURA 13) apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos nos dois tipos de *pellets*.

Figura 13 - Gráficos de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos *pellets*.



A = materiais voláteis dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = materiais voláteis dos *pellets* de resíduo de café com finos de carvão; C = cinzas dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; D = cinzas dos *pellets* de resíduo de café com finos de carvão; E = carbono fixo dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; F = carbono fixo dos *pellets* de resíduo de café e finos de carvão; VOL = materiais voláteis; CZ = cinzas; CF = carbono fixo.

O aumento da porcentagem de finos de carvão vegetal nas biomassas ocasionou a redução do teor de materiais voláteis. Sabe-se que durante o processo de carbonização ocorre perda de grande parte dos materiais voláteis presentes na biomassa carbonizada, dessa forma a

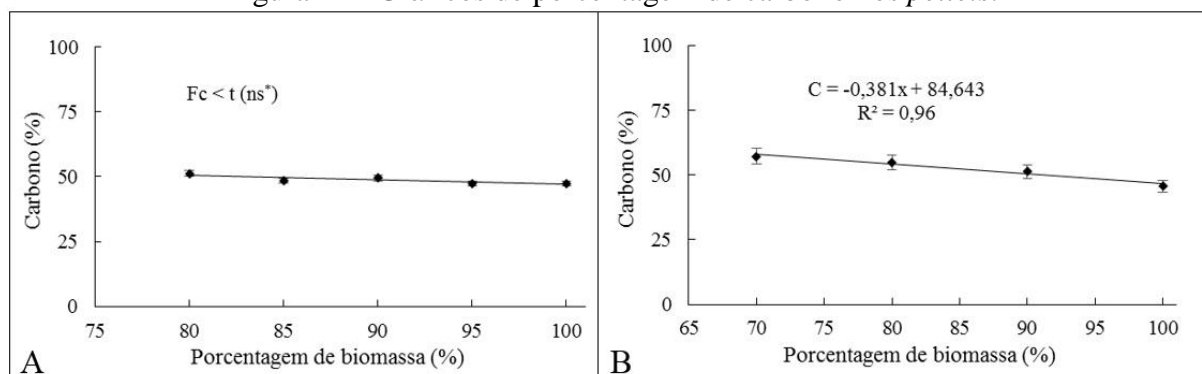
adição de finos de carvão nos tratamentos acarreta em *pellets* com menor quantidade de materiais voláteis.

Em relação ao teor de cinzas, pode-se observar muita variação entre os tratamentos dos dois tipos de *pellets*. Houve um aumento de 0,55 para 2,62% do tratamento BC100 para o BC80, e de 6,11 a 9,56% do tratamento RC100 para RC70. O alto teor de cinzas apresentado pelos finos de carvão vegetal contribuiu para o aumento do teor de cinzas nos tratamentos à medida que foi adicionado, o que não é desejável. A norma DIN EN 14961-6 (2012a) estabelece valores máximos de cinzas inferiores a 5% para a classificação A, e valores máximos inferiores a 10 % para a classificação B. Dessa forma, os biocombustíveis sólidos atenderam às exigências da norma. Nesse caso, todos os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão vegetal foram classificados como sendo do tipo A e todos os *pellets* de resíduo de café e finos de carvão vegetal, classificados como do tipo B. A adição de finos de carvão nos resíduos do café fica limitada a 30% de incorporação, pois o teor de cinzas está próximo ao limite máximo permitido pela norma.

O teor de carbono fixo aumentou com a adição de finos de carvão na biomassa, havendo diferença significativa entre todos os tratamentos. Os valores de carbono fixo variaram de 13,88 a 23,10% nos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e de 20,30 a 30,50 % nos *pellets* de resíduo do café. Observando os valores médios, os tratamentos de resíduo de café apresentaram maior quantidade de carbono fixo comparadamente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar.

Analisando os componentes elementares dos *pellets*, o teor de carbono (FIGURA 14) não diferiu estatisticamente entre os tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar, apresentando valor médio de 50%.

Figura 14 - Gráficos de porcentagem de carbono nos *pellets*.

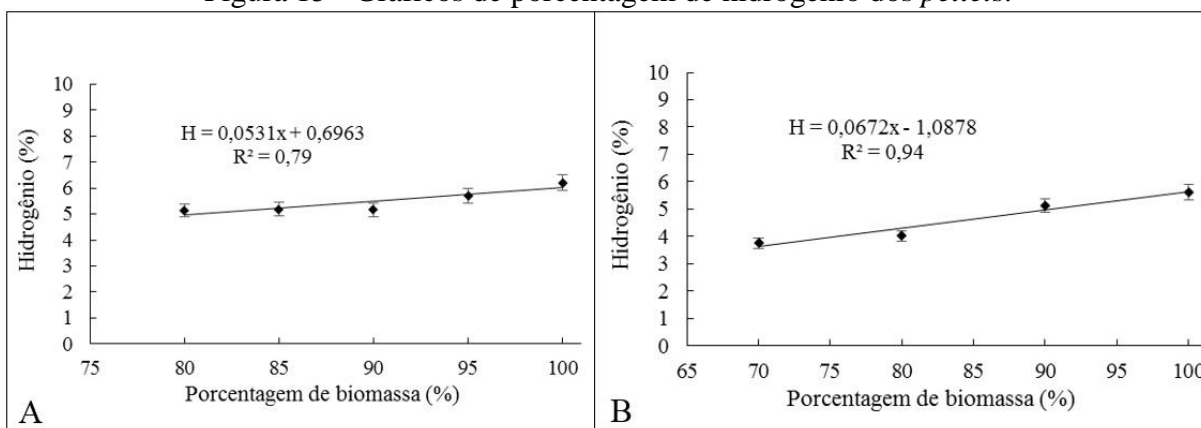


A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos carvão vegetal; C = porcentagem de carbono; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t$ = F calculado é menor que F tabelado.

Porém, apresentou diferença significativa entre os tratamentos de resíduo de café, possibilitando o ajuste de um modelo linear em função da porcentagem de finos de carvão vegetal na biomassa de café. A quantidade média de carbono foi em torno de 50% para os dois tipos de biomassa. O resíduo do café apresentou maior quantidade de carbono fixo comparado ao resíduo do bagaço de cana (FIGURA 13E e FIGURA 13F), o que deveria resultar em *pellets* de resíduo do café e finos de carvão com maior teor de carbono comparado aos *pellets* de resíduo de bagaço de cana e finos de carvão. O que pode justificar o teor médio de carbono aproximado entre os dois tipos de *pellets* é a possível falta de homogeneidade nas amostras utilizadas para análise elementar. É desejável que o biocombustível tenha elevados teores de carbono, pois o carbono é o constituinte elementar que mais contribui para o valor calórico.

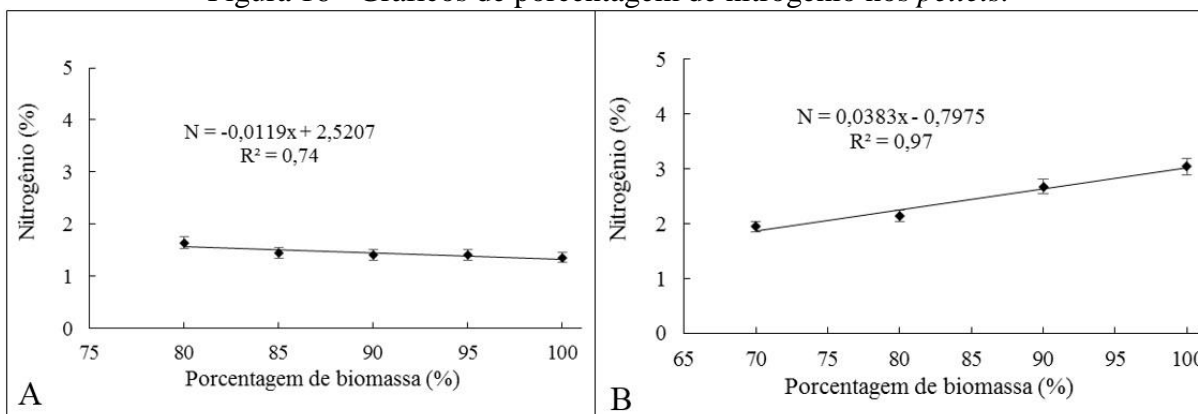
Os valores de porcentagem de hidrogênio (FIGURA 15) apresentaram diferença significativa entre os dois tipos de *pellets*, possibilitando o ajuste de modelos em função da porcentagem de finos de carvão vegetal. Nos *pellets* de bagaço de cana os valores foram de 5,14 a 6,20%, já nos *pellets* resíduo do café foram de 3,75 a 5,62%.

Figura 15 - Gráficos de porcentagem de hidrogênio dos *pellets*.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; H = porcentagem de hidrogênio.

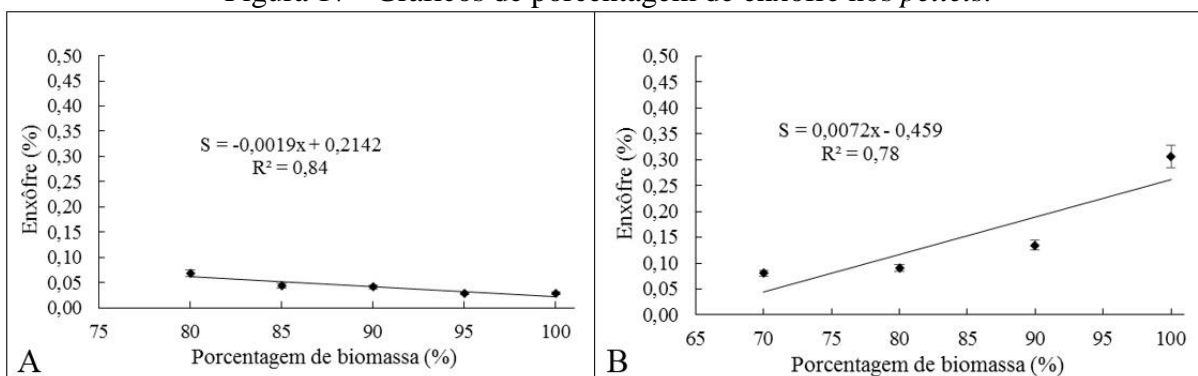
Os teores de nitrogênio (FIGURA 16) também apresentaram diferença significativa entre os tratamentos de acordo com análise de variância, a 5% de nível de significância. O bagaço de cana-de-açúcar apresenta teor de nitrogênio (1,36%) muito próximo ao teor de nitrogênio dos finos de carvão vegetal (1,22%, TABELA 5), que foi caracterizado inicialmente. Devido aos valores serem muito próximos, de acordo com a regressão, ocorreu um aumento mínimo no teor de nitrogênio, que vai de 1,36% (BC100) à 1,64% (BC80).

Figura 16 - Gráficos de porcentagem de nitrogênio nos *pellets*.

A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos carvão vegetal; N = porcentagem de nitrogênio.

Nos *pellets* preparados com resíduo do café ocorreu o inverso, pois o teor de nitrogênio do resíduo de café é superior ao dos finos de carvão vegetal, o que resultou na diminuição do teor de nitrogênio com a incorporação de finos de carvão no resíduo de café. A norma DIN EN 14961-6 (2012a) exige que o teor de nitrogênio seja inferior que 1,5% para classificação A, e inferior a 2,0% para classificação B. Os *pellets* de BC100, BC95, BC90 e BC85 atendem as exigências e foram classificados como A, enquanto BC80 e RC70 foram classificados como sendo do tipo B. Os demais tratamentos de resíduo do café (RC100, RC90 e RC80) não se enquadraram na norma.

Os teores de enxofre (FIGURA 17) apresentaram respostas semelhantes às do nitrogênio, havendo diferenças entre todos os tratamentos. Nos *pellets* de bagaço de cana, a incorporação de finos de carvão na mistura resultou no aumento do teor de enxofre, pelo fato do bagaço de cana apresentar pequena porcentagem de enxofre em sua composição. Já nos *pellets* de resíduo do café, a adição de finos de carvão em suas misturas acarretou na diminuição dos teores de enxofre, o que é interessante do ponto de vista energético.

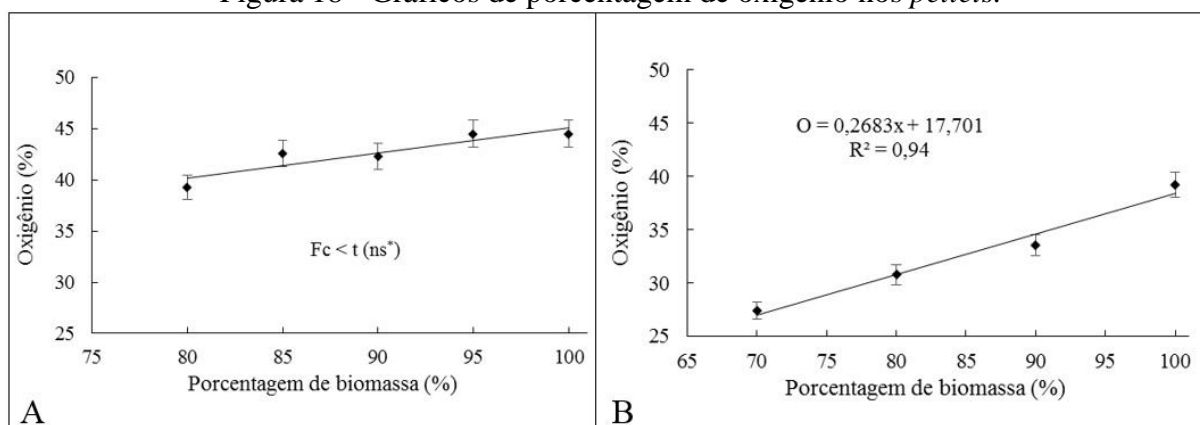
Figura 17 - Gráficos de porcentagem de enxofre nos *pellets*.

A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; S = porcentagem de enxofre.

A norma DIN EN 14961-6 (2012a) para *pellets* de biomassa exige que o teor de enxofre seja inferior a 0,2% em ambas as classificações (A ou B). Dessa forma, todos os *pellets* preparados com bagaço de cana se enquadraram na categoria A, enquanto que, para os *pellets* preparados a partir de resíduo de café, somente o RC100 não atingiu o padrão estabelecido pela norma. Neste caso, a adição de finos de carvão no resíduo de café possibilita que os *pellets* de resíduo de café atinjam os valores exigidos pela norma.

A Figura 18 apresenta os valores de oxigênio para os diferentes *pellets* produzidos. Os *pellets* de bagaço de cana não tiveram diferença entre si com a adição de finos em suas misturas, enquanto que a adição de finos no resíduo de café proporcionou a diminuição do teor de oxigênio de 39,21% (RC100) para 27,39% (RC70), o que é positivo do ponto de vista energético.

Figura 18 - Gráficos de porcentagem de oxigênio nos *pellets*.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t = F$ calculado é menor que F tabelado.

4.4 Propriedades energéticas

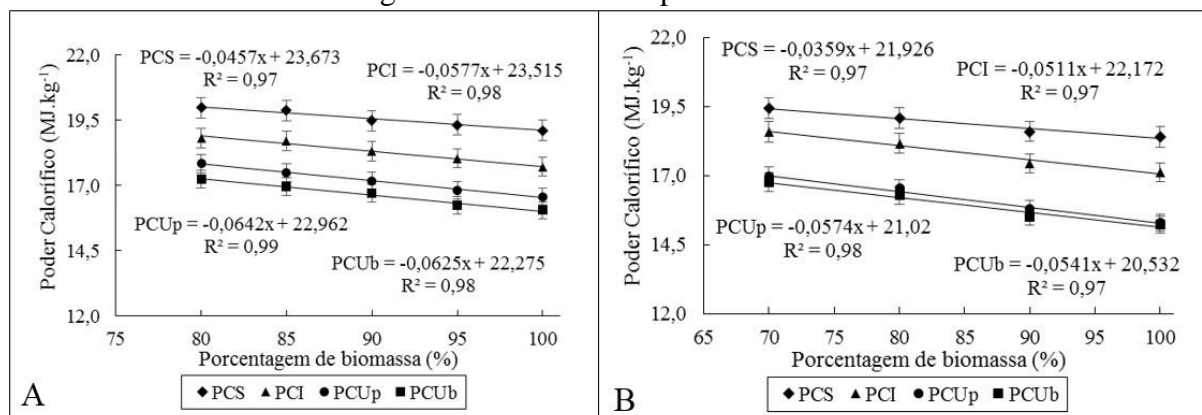
Como um dos objetivos do trabalho é a produção de biocombustível, avaliações e análises que visam avaliar as propriedades energéticas são de extrema importância. Observando a Figura 19, temos os valores de poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU). O poder calorífico útil, trata-se do valor efetivo de quantidade de energia disponível por unidade de massa, pois o mesmo já possui os descontos da energia que seria despendida para a secagem do material antes de entrar em ignição.

O poder calorífico dos *pellets* apresentou diferença significativa entre os tratamentos com a adição de finos de carvão vegetal. Os valores de poder calorífico útil dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar foram de $16,58 \text{ MJ kg}^{-1}$ (BC100) a $17,85 \text{ MJ kg}^{-1}$ (BC80), e os

pellets de resíduo de café apresentaram valores entre $15,3 \text{ MJ kg}^{-1}$ (RC100) e $16,96 \text{ MJ kg}^{-1}$ (RC70). A Figura 19 mostra que houve o aumento de energia, proporcionada pela adição de fino de carvão vegetal aos *pellets*, porém, esse aumento não foi tão acentuado como o esperado, provavelmente pelo alto teor de cinzas dos FN (20,95 %) (TABELA 5). Como se trata de um resíduo, mesmo com o alto teor de cinzas ainda existe vantagem na sua utilização, uma vez que estamos agregando valor a um resíduo que antes não tinha finalidade.

O poder calorífico superior e inferior dos *pellets* e das misturas utilizadas na sua preparação (antes da peletização) são iguais, pois trata-se de energia por unidade de massa e não energia por unidade de volume. Porém o poder calorífico útil do *pellet* difere do poder calorífico útil da biomassa (mistura) antes da peletização, pois para calcular o PCU é utilizado o valor de umidade do material, e sabe-se que a peletização diminui a umidade do material durante o processo, pelo fato de ocorrer em temperaturas próximas a 100°C . Dessa forma, observamos nos gráficos, para os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão vegetal, o aumento do poder calorífico útil dos *pellets* em relação aos seus tratamentos após a peletização. Enquanto, foi considerado um aumento mínimo nos *pellets* de resíduo de café e finos de carvão vegetal.

Figura 19 - Gráficos de poder calorífico.



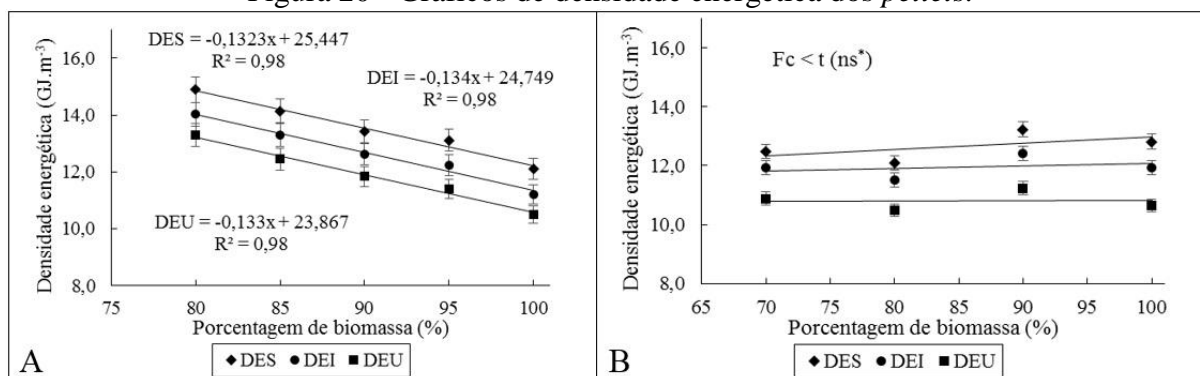
A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; PCS = poder calorífico superior; PCI = poder calorífico inferior; PCU_p = poder calorífico útil do *pellet*; PCU_b = poder calorífico útil da biomassa.

De acordo com o estabelecido pela norma DIN EM 14961-6 (2012a), os *pellets* tipo A, tem poder calorífico útil igual ou superior a $14,1 \text{ MJ kg}^{-1}$, e os *pellets* tipo B tem o poder calorífico útil igual ou superior a $13,2 \text{ MJ kg}^{-1}$. Baseado na norma, todos os tratamentos e portanto, todos os *pellets* preparados, podem ser considerados do tipo A. A adição dos finos de carvão vegetal, mesmo em pequenas porcentagens, foi bastante positiva, considerando o uso em grande escala.

A densidade energética (FIGURA 20) apresentou aumento significativo para os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, enquanto não houve diferença significativa entre os tratamentos dos *pellets* de resíduo do café.

Isso ocorreu devido ao fato da densidade a granel do material influenciar diretamente na densidade energética, apresentando a mesma tendência na variação entre os tratamentos, uma vez que a densidade energética é o produto da densidade a granel pelo poder calorífico do material.

Figura 20 - Gráficos de densidade energética dos *pellets*.

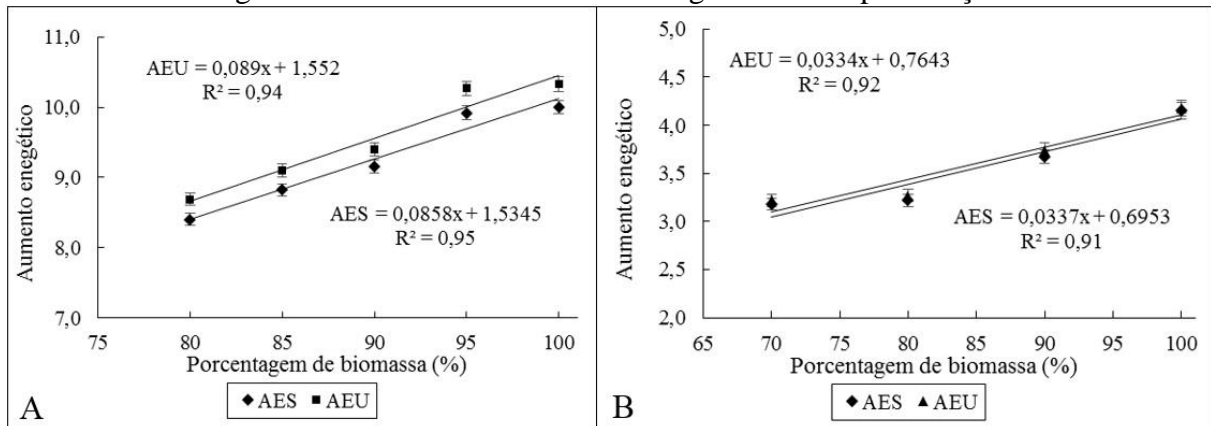


A = densidade energética dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = densidade energética dos *pellets* de resíduo de café com finos de carvão; DES = densidade energética superior; DEI = densidade energética inferior; DEU = densidade energética útil; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t$ = F calculado é menor que F tabelado.

O aumento energético (FIGURA 21), razão entre a densidade energética dos *pellets* pela densidade energética do tratamento antes da peletização, apresentou-se superior para os *pellets* sem adição de finos (BC100 e RC100), pois a biomassa sem adição de finos de carvão tem menor densidade a granel (D_g), ocasionando um maior aumento na densidade com o processo de compactação, o que reflete na densidade energética que é obtida pelo produto da densidade a granel (D_g) pelo poder calorífico do material. Pode-se observar que houve diferenças significativas entre todos os tratamentos.

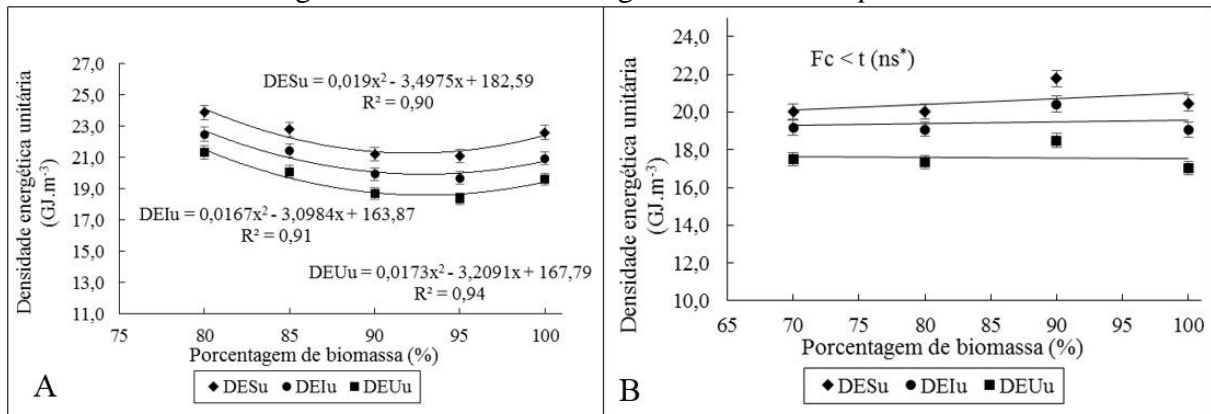
Observa-se também que o aumento energético útil foi maior que o aumento energético superior em todos os tratamentos, isso pode ser explicado pela umidade do material. O cálculo da energia útil considera o desconto da energia perdida para secar o material e, uma vez que durante o processo de peletização o material perde uma parte de sua umidade devido ao aumento da temperatura, o poder calorífico útil dos *pellets* será superior ao poder calorífico útil das biomassas. Assim ocorre maior aumento energético útil.

Figura 21 - Gráficos de aumento energético com a peletização.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; AES = aumento energético superior; AEU = aumento energético útil.

Quanto às densidades energéticas unitárias (FIGURA 22), ocorrem diferenças significativas apenas entre os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar. Os *pellets* de resíduo de café com finos de carvão não apresentaram diferenças com a adição de finos de carvão. A densidade energética útil apresentou valores entre $17,03 \text{ GJ m}^{-3}$ (BC100) e $17,49 \text{ GJ m}^{-3}$ (BC80).

Figura 22 - Densidade energética unitária dos *pellets*.

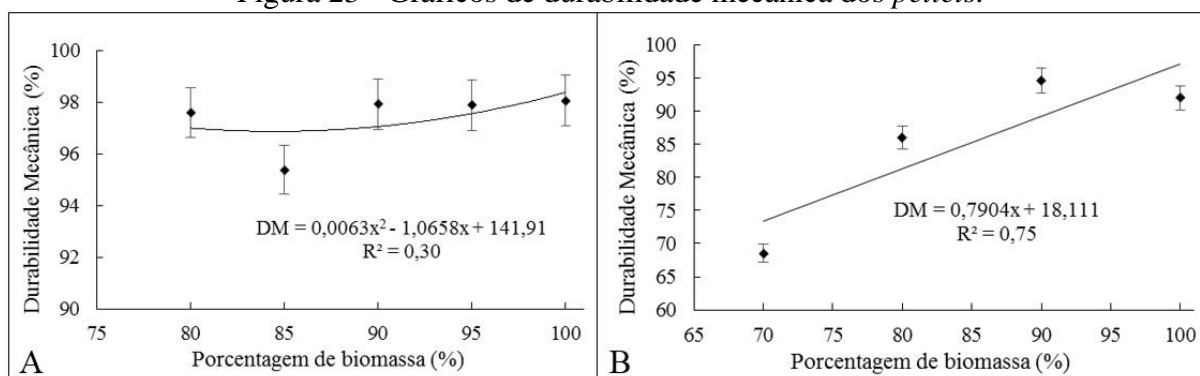
A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; DESu = densidade energética superior unitária; DEIu = densidade energética inferior unitária; DEUu = densidade energética unitária útil; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância; $F_c < t$ = F calculado é menor que F tabelado.

Liu et al. (2014) encontraram, para *pellets* de fibra de coco, $17,36 \text{ GJ m}^{-3}$ para densidade energética unitária superior, resultado inferior às densidades energéticas úteis dos *pellets* produzidos neste trabalho, mantendo a tese de que essas biomassas misturadas a resíduos do processamento do carvão tem um grande potencial energético.

4.5 Propriedades mecânicas

Como pode-se observar na Figura 23, houve diferença significativa na durabilidade mecânica entre todos os tratamentos. Os valores variaram de 95,38 a 98,07% nos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e de 68,52 a 94,59% para os *pellets* de resíduo de café.

Figura 23 - Gráficos de durabilidade mecânica dos *pellets*.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; DM = durabilidade mecânica.

A durabilidade mecânica indica a capacidade dos *pellets* em suportar a desintegração física, que leva à formação de pó, devido a impactos mecânicos durante o armazenamento e transporte (TUMULURU, 2014).

Portanto, *pellets* com durabilidade mecânica baixa tendem a desintegrar-se mais rapidamente, o que pode causar problemas nas esteiras transportadoras e na câmara de combustão (CARROLL; FINNAN, 2012). Kaliyan e Morey (2010) concluíram que o tamanho das partículas, a composição química, principalmente o teor de lignina e umidade da matéria-prima, além da temperatura e pressão de peletização, influenciam na durabilidade mecânica dos *pellets*.

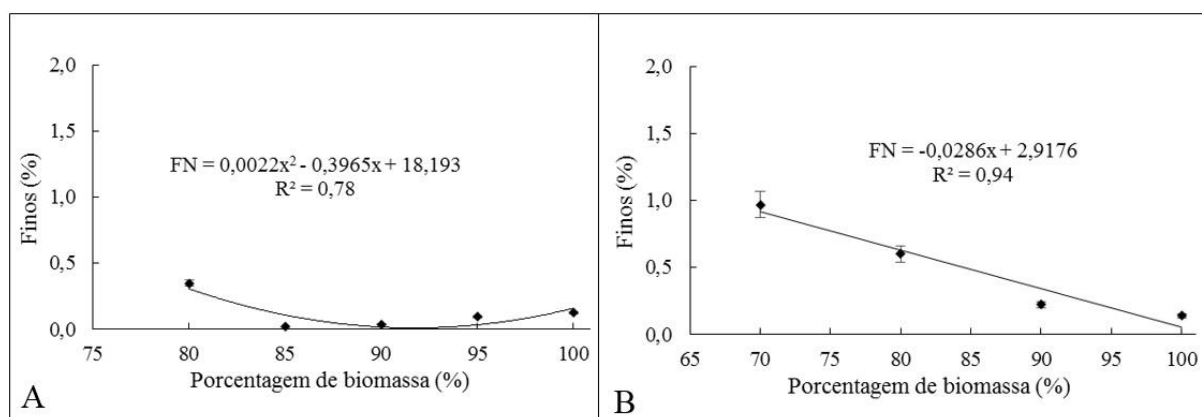
De acordo com a norma de comercialização DIN EN 14961-6 (2012a), os *pellets* tipo A devem apresentar durabilidade mecânica superior ou igual à 97,5% e os *pellets* tipo B devem apresentar durabilidade mecânica superior ou igual à 96%. Dessa forma, todos os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e finos de carvão apresentaram classificação do tipo A, exceto BC85, que não atendeu à norma. Já os *pellets* de resíduo do café e finos de carvão vegetal não atenderam a norma em nenhuma das classificações para durabilidade mecânica.

A porcentagem de geração de finos (FIGURA 24) diferiu significativamente entre os tratamentos. O teor médio de finos que apresentou maior quantidade nos *pellets* de bagaço de cana e finos de carvão foi no tratamento BC80 (0,35%), que é justificável por ser o tratamento de bagaço de cana com maior porcentagem de finos de carvão. Nos *pellets* de resíduo de café

e finos de carvão, o teor de finos gerados variou de 0,14% (RC100) à 0,97% (RC70), aumento que é justificável também pela adição dos finos de carvão nos tratamentos.

Os finos são definidos como partículas com dimensões inferiores a 3,15 mm geradas na desintegração dos *pellets*, de acordo com a norma DIN EN 14588 (DIN, 2011a). *Pellets* produzidos sob condições que não favorecem a compactação da biomassa, como baixa temperatura de peletização, umidade da matéria-prima inferior à ideal, baixo teor de lignina, baixa velocidade dos roletes ou tamanho insuficiente dos canais de compressão causam a maior geração de finos (TUMULURU et al., 2011).

Figura 24 - Gráficos de porcentagem de finos.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão vegetal; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; FN = finos.

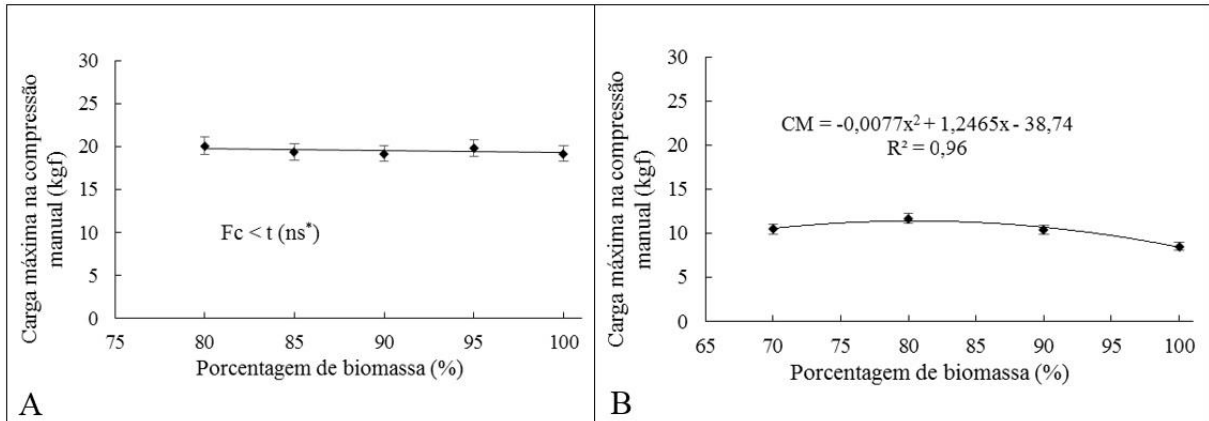
De acordo com as especificações da norma DIN EN 14961-6, os *pellets* classe A apresentam teor de finos igual ou interior a 2%, enquanto que os *pellets* classe B apresentam teor de finos igual ou inferior a 3%. Dessa forma, todos os *pellets* produzidos neste trabalho atenderam as especificações e se enquadram como *pellets* do tipo A.

Os valores de carga máxima na compressão manual (FIGURA 25) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão vegetal, dando um valor médio em torno de 20 kgf. Já os *pellets* dos tratamentos com resíduo de café e finos de carvão vegetal apresentaram diferenças significativas.

Pereira (2014) observou uma relação diretamente proporcional entre durabilidade mecânica e carga máxima na compressão manual para biomassas de resíduo do algodoeiro, ponteia de *Eucalyptus* spp. e palha de arroz, exceto para os *pellets* de bagaço de cana. Quanto maior a compactação do material, maior a área de contato entre as partículas, maior massa por unidade de volume e, em geral, maior a resistência mecânica dos *pellets*. De acordo com

Zamorano et al. (2011), a carga máxima na compressão manual simula a compressão devido ao peso dos próprios *pellets* durante o armazenamento ou esmagamento em uma rosca transportadora. Isto é interessante porque a carga máxima na compressão manual não é uma propriedade normatizada, contudo, o teste fornece uma medida rápida da resistência mecânica dos *pellets* e pode auxiliar no ajuste do processo, a fim de melhorar a qualidade do produto final.

Figura 25 - Gráficos de carga máxima na compressão manual dos *pellets*.



A = gráfico referente aos tratamentos de bagaço de cana-de-açúcar com finos de carvão; B = gráfico referente aos tratamentos de resíduo de café com finos de carvão vegetal; CM = carga máxima na compressão manual; (ns*) = não existe diferença estatística entre os tratamentos, a 5% de nível de significância.

5 CONCLUSÕES

Todos os *pellets* preparados com bagaço de cana-de-açúcar com ou sem finos de carvão vegetal atenderam os parâmetros para comercialização de acordo com a norma DIN EN 14961-6, com exceção do tratamento BC85 por apresentar valor de durabilidade mecânica inferior à exigida.

Todos os *pellets* produzidos com resíduo de café com ou sem finos de carvão vegetal não se enquadraram à norma DIN EN 14961-6 por não apresentarem durabilidade mecânica mínima exigida, que é um dos parâmetros de normatização. Porém, esses *pellets* estão de acordo com a classificação tipo A em todos os outros parâmetros, com exceção do teor de cinzas, que se enquadra como tipo B.

Entre os *pellets* produzidos, o tratamento BC80 destacou-se por apresentar o maior poder calorífico útil em comparação a todos os outros tratamentos realizados, e atendeu a todos os parâmetros da norma europeia para *pellets* de biomassa.

Mesmo com alta quantidade de cinzas apresentada pelo resíduo de finos de carvão vegetal, houve uma contribuição positiva que pode ser observada principalmente no aumento do poder calorífico útil dos *pellets* na medida em que foi adicionado finos de carvão nos tratamentos.

✓ Sugestões para futuros trabalhos

Recomenda-se a utilização de aglutinantes no processo de peletização, que poderá melhorar as propriedades mecânicas e energéticas, o que pode possibilitar o enquadramento dos *pellets* que não atenderam aos requisitos de durabilidade mecânica pela norma.

A lignina pode ser utilizada como uma das alternativas de aglutinante para melhorar as propriedades mecânicas e energéticas, uma vez que o processo de produção de polpa celulósica gera grande quantidade de lignina residual.

Para não ocorrer problemas com o alto teor de cinzas, recomenda-se utilizar baixas porcentagens de finos de carvão vegetal nas misturas ou por utilizar finos com menos quantidade de cinzas.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, A. M.; GONÇALVES, F. G. Adaptação de um forno para o aproveitamento dos subprodutos da carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 241-247, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – A. S. T. M. **ASTM E711-87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. Philadelphia: ASTM International, 2004. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – A. S. T. M. **ASTM D 1762-84**: Standard method for chemical analyses of wood charcoal. Philadelphia: ASTM International, 2007. 2p.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

AXELSSON, L.; FRANZÉN, M.; OSTWALD, M.; et al. Perspective: Jatropha cultivation in southern India: Assessing farmers' experiences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 6, n. 3, p. 246–256, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2016**: ano base 2015. Rio de Janeiro, 2016. 292 p.

BASU, P.; BUTLER, J.; LEON, M. A. Biomass co-firing options on the emission reduction and electricity generation costs in coal-fired power plants. **Renewable Energy**, v. 36, n. 1, p. 282-288, 2011.

BECH, N.; JENSEN, P. A.; DAM-JOHANSEN, K. Determining the elemental composition of fuels by bomb calorimetry and the inverse correlation of HHV with elemental composition. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 534-537, 2009.

BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, n. 8, p. 776-785, 2008.

CARDOZO, E.; ERLICH, C.; ALEJO, L.; FRANSSON, T. H. Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications. **Fuel**, v. 115, p. 778–787, 2014.

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.

COSTA, T. G.; BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, 2014.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: café**, v.1, n.3, primeiro levantamento, janeiro/2017. Brasília, 2017. 41 p.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, Piracicaba, n. 38, p. 33-37, 1988.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 71-92, 2004.

CUBERO-ABARCA, R.; MOYA, R.; VALARET, J.; TOMAZELLO FILHO, 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, 2014.

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.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Pittsburgh, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

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 15210-1**: Solid biofuels – Determination of mechanical durability of *pellets* and briquettes – Part 1: *Pellets*. Berlin: CEN, 2010b. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 14588**: Terminology, definitions and descriptions. Berlin: CEN, 2011a. 43 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, **DIN EN 14961-6**: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Non-woody *pellets* for non-industrial use. Berlin: CEN, 2012a. 16 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. I. N. **DIN EN 16127**: Determination of length and diameter of *pellets*. Berlin: CEN, 2012b. 11 p.

DIAS, J. M. C. de S.; SANTOS, D. T. dos; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 132 p.

DIAS, D. R.; VALENCIA, N. R.; FRANCO, D. A. Z.; LÓPEZ-NUÑEZ, J. C. Management and Utilization of Wastes from Coffee Processing. In: **Cocoa and Coffee Fermentations**. CRC Press, 2014. p. 545-588.

DOSHI, P.; SRIVASTAVA, G.; PATHAK, G.; DIKSHIT, M. Physicochemical and thermal characterization of nonedible oilseed residual waste as sustainable solid biofuel. **Waste Management**, v. 34, n. 10, p. 1836–1846, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. 292 p.

EUROPEAN PELLET COUNCIL - EPC. **Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes**. Version - 2. Brussels, Belgium, 2013. 43 p.

FALCÃO, D. S. **Produção e Consumo Doméstico de Combustíveis Lenhosos em Moçambique**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Energia e Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2013. 108 p.

FARIA, W. S.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; ANDRADE, C. R.; JUNIOR, J. B. G. Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em *pellets* para geração de energia térmica. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 137-147, 2016.

FERREIRA, D. F. **Sisvar** - sistema de análise de variância para dados balanceados. Lavras: UFLA, 1998. 19 p.

GADELHA, F. H.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, C. R. L.; MELO, I. V.; JORGE, D. L.; TAVARES, J. A.; SILVA, S. P. R. Rendimento volumétrico e energético de clones de híbridos de *Eucalyptus* sp. No polo gessoiro do Araripe, PE. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 331-341, 2012.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C. *Pellets* de Madeira: Mercado em crescimento. 2012.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de *pellets* de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, p. 14 - 18, 2013.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de *pellets* de madeira por TGA. **Holos**, v. 1, n. 0, p. 327–339, 2016a.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A. Trends and challenges of brazilian *pellets* industry originated from agroforestry. **Cerne**, v.22, n. 3, p. 233 – 240, 2016b.

GARCIA-MARAVÉ, A.; RODRIGUEZ, M. L.; SERRANO-BERNARDO, F.; DIAZ, L. F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of *pellets* made from residual biomass of olive trees. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v.129, p. 1–7, 2015.

GAUTAM, R. K.; MUDHOO, A.; LOFRANO, G.; CHATTOPADHYAYA, M. C. Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 2, n. 1, p. 239–259, 2014.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Oxford, v. 29, n. 6, p. 1793–1797, 2009.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Ibá 2015, ano base 2014. Brasília, 2015.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION, I. C. O. Disponível em: <<http://www.ico.org/>>. Acesso: 30 de Janeiro 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-6: 2014** - Solid biofuels - Fuels specification and classes - Part 6 - Graded non wood. Brussels, 2014.

JIN, H.; CAPAREDA, S.; CHANG, Z.; GAO, J.; XU, Y.; ZHANG, J. Biochar pyrolytically produced from municipal solid wastes for aqueous As (V) removal: Adsorption property and its improvement with KOH activation. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 622–629, 2014.

KALIYAN, N.; MOREY, R. V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and *pellets* made from corn stover and switchgrass. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 3, p. 1082-1090, 2010.

KUZMINA, J. S.; MILOVANOV, O. Y.; SINELSHCHIKOV, V. A.; LEE, S. Ethanol from lignocellulosics. In: LEE, S; SPEIGHT, J G; LOYALKA, S K. **Handbook of Alternative Fuel Technologies**. Boca Raton, Florida. CRC Press. p. 343-372. , 2007.

LARSSON, S. H.; THYREL, M.; GELADI, P.; LESTANDER, T. A. High quality biofuel pellet production from pre-compacted low density raw materials. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 7176-7182, 2008.

LIU, Z. J.; LIU, X. E.; FEI, B. H.; JIANG, Z. H.; CAI, Z. Y.; YU, Y. The properties of *pellets* from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, v. 55, p. 1-5, 2013.

LIU, Z.; QUEK, A.; BALASUBRA MANIAN, R. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Applied Energy**, London, v. 113, p. 1315-1322, 2014.

MAHAPATRA, A.; HARRIS, D.; DURHAM, D.; LUCAS, S.; TERRILL, T.; KOUAKOU, B.; KANNAN, G. Effects of moisture change on the physical and thermal properties of sericea lespedeza *pellets*. **International Agricultural Engineering Journal**, v. 19, n. 3, p. 23-29, 2010.

MALISIUS, U.; JAUSCHNEGG, H.; SCHMIDL, H.; NILSSON, B.; RAPP, S.; STREHLER, A.; HARTMANN, H.; HUBER, R.; WHITFIELD, J.; KESSLER, D.; GEIßLHOFER, A.; HAHN, B.. **Woodpellets in Europe – State of Art/ Technologies/Activities/Markets**. Industrial Network on Wood *Pellets*. Editora UMBERA GmbH, A-3100 St. Poelten, Schiessstattring 25, 2000.

MIRANDA, T.; ARRANZ, J. I.; MONTERO, I.; ROMÁN, S.; ROJAS, C. V.; NOGALES, S. Characterization and combustion of olive pomace and forest residue *pellets*. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v.103, p. 91–96, 2012.

MOON, C. et al. Effect of blending ratio on combustion performance in blends of biomass and coals of different ranks. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Rome, v. 47, p. 232-240, 2013.

MUSSATTO, S. I.; MACHADO, E. M.; MARTINS, S.; TEIXEIRA, J. A. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 5, p. 661, 2011.

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.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de *pellets* e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilisation of *Pellets*. **Bios bioenergiesysteme**, Londres, Washington, 2010. 593 p.

PEREIRA, P. L. C. **Propriedades de *pellets*: biomassas, aditivos e tratamento Térmico**. 2014. 64 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

PODDAR, S.; KAMRUZZAMAN, M.; SUJAN, S. M. A.; HOSSAIN, M.; JAMAL, M. S.; GAFUR, M. A.; KHANAM, M. 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.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n. 68, p.273-283, 2011a.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; RIBEIRO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 68, p. 295– 07, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; DOS REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F.; GODINHO, T. P. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

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. 167 p. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Fundação Getúlio Vargas - Escola de Economia de São Paulo – EESP, São Paulo, 2013.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

SCOTT, A.J.; KNOTT, M. A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v.30, n.2 p.507-512, 1974.

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.

SHAN, F.; LIN, Q.; ZHOU, K.; WU, Y.; FU, W.; ZHANG, P.; SONG, L.; SHAO, C.; YI, B. An experimental study of ignition and combustion of single biomass *pellets* in air and oxy-fuel. **Fuel**, v. 188, p. 277-284, 2017.

SHANG, L.; NIELSEN, N. P. K.; STELTE, W.; et al. Lab and Bench-Scale Pelletization of Torrefied Wood Chips-Process Optimization and Pellet Quality. **Bioenergy Research**, v. 7, n. 1, p. 87-94, 2014.

SILVEIRA, R. C.; CAMPOS, V. F. Utilização de finos de carvão vegetal. **Metalurgia ABM**. São Paulo, 237 (33): 497501, 1977. p 497-501.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos *pellets* de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 833, 2015.

STELTE, W.; SANADI, A. R.; SHANG, L.; HOLM, J. K.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Recent developments in biomass pelletization – a review. **Bioresources**, v. 7, n. 3, p. 4451-4490, 2012.

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

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY, T. A. A. P. I. **TAPPI. T 222 om-02**. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002, 5 p.

THEERARATTANANOON, K.; XU, F.; WILSON, J.; BALLARD, R.; MCKINNEY, L.; STAGGENBORG, S.; VADLANI P.; PEI Z. J.; WANG, D. Physical properties of *pellets* made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. **Industrial Crops and Products**, Washington, v. 33, n. 2, p. 325-332, 2011.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v 2, n. ½, p. 45-53, 2001.

TUMULURU, J. S. Effect of process variables on the density and durability of the *pellets* made from high moisture corn stover. **Biosystems Engineering**, v. 119, p. 44-57, 2014.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. London, UK: Earthscan, 2008. 442 p.

ZANETTI, M.; FERNANDES, C.; CAZETTA, J.O.; CORÁ, J.E.; MATTOS JUNIOR, D. Caracterização física de substratos para a produção de mudas cítricas sob telado. **Laranja**, Cordeirópolis, v.24, n.2, p.519-530, 2003.

APÊNDICE A – Valores obtidos dos parâmetros para todos os pellets.

Parâmetro (Unidade)	EN 14961-6		BC100	BC95	BC90	BC85	BC80	RC100	RC90	RC80	RC70
	A	B									
Diametro D (mm)	6 ± 1	6 ± 1	6,1	6	6,3	5,9	6	6,1	6,2	6,1	6,1
Comprimento (mm)	3,15 a 40	3,15 a 40	21,8	18,9	17	16,8	18,3	16,5	16,6	13,2	10,9
Umidade base úmida (%)	≤ 12	≤ 15	8,23	8,76	7,71	8,23	7,36	9,78	9,71	9,11	8,71
Umidade base seca (%)	≤ 13,6	≤ 17,6	8,97	9,6	8,35	8,98	7,94	10,84	10,75	10,03	9,54
Cinzas (%) bs	≤ 5	≤ 10	0,55	0,93	1,73	2,25	2,62	6,1 (B)	7,2 (B)	8,2 (B)	9,6 (B)
Durabilidade Mecânica (%) bu	≥ 97,5	≥ 96,0	98,07	97,9	97,93	95,38 (N)	97,6	92,02 (N)	94,59 (N)	86,03 (N)	68,52 (N)
Finos (%) bu	≤ 2	≤ 3	0,12	0,09	0,04	0,02	0,35	0,14	0,22	0,6	0,97
Poder Calorífico Útil - PCU (MJ/kg)	≥ 14,1	≥ 13,2	16,58	16,81	17,17	17,5	17,85	15,3	15,78	16,53	16,96
Densidade a granel (kg/m³)	≥ 600	≥ 600	632,9	678,3	689,2	711,3	745,3	696,3	711,8	634,3	641,9
Nitrogenio (%) bs	≤ 1,5	≤ 2,0	1,36	1,41	1,41	1,44	1,64 (B)	3,05	2,68	2,14	1,95 (B)
Enxofre (%) bs	≤ 0,20	≤ 0,20	0,03	0,03	0,04	0,04	0,07	0,31	0,13	0,09	0,08

(B) = pellets enquadrados na classe B; (N) = pellets não se classificaram nos parâmetros da norma. * Os demais se classificaram como tipo A.