

## Briquetagem dos resíduos dos processamentos mecânico e químico de *Pinus* spp.

*Eraldo Antonio Bonfatti Júnior*<sup>1</sup>

*Elaine Cristina Lengowski*<sup>2</sup>

*Vivian Midori Takahashi*<sup>3</sup>

*Gabriel Meyer Adur*<sup>4</sup>

*Dimas Agostinho da Silva*<sup>5</sup>

*Umberto Klock*<sup>6</sup>

*Alan Sulato de Andrade*<sup>7</sup>

*Ivan Venson*<sup>8</sup>

*Graciela Inês Bolzon de Muñiz*<sup>9</sup>

### RESUMO

O aproveitamento dos resíduos florestais como fonte energética é uma opção para o melhor aproveitamento de recursos renováveis e uma estratégia de substituição de combustíveis fósseis. No entanto, esses resíduos precisam ser melhorados para essas funções, e a compactação da biomassa é uma forma de aumentar a qualidade desse material para fins energéticos. O objetivo deste trabalho foi produzir briquetes de dois resíduos de processamentos da madeira de *Pinus* spp. – a serragem e o licor negro – e avaliar as diferentes proporções de licor negro nos briquetes (0, 5, 10 e 15%). Para a avaliação dos briquetes, realizaram-se testes de expansão, densidade aparente, friabilidade, análise química imediata, poder calorífico superior e densidade energética. O aumento do percentual de licor negro melhorou as expansões lateral e volumétrica, a densidade aparente, o teor de materiais voláteis e o teor de carbono fixo, contudo, não se encontraram ganhos quanto à friabilidade, à expansão em altura e quanto às características energéticas dos briquetes.

**Termos para indexação:** biorrefinaria, licor negro, serragem.

### Ideias centrais

- Aproveitamento energético de resíduos florestais
- Compactação da biomassa florestal para fins energéticos
- Biorrefinaria aplicada ao setor florestal
- Propriedades químicas da madeira no contexto energético
- Combinação de licor negro e serragem para produção de briquetes

Recebido em  
09/08/2019

Aprovado em  
10/10/2019

Publicado em  
13/12/2019



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

<sup>1</sup> Engenheiro Florestal, mestre em Recursos Florestais, doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: bonfattieraldo@gmail.com.

<sup>2</sup> Engenheira Industrial Madeireira, doutora em Engenharia Florestal, professora na Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT. E-mail: elainelengowski@gmail.com.

<sup>3</sup> Engenheira Industrial Madeireira, mestre em Engenharia Florestal, consultora técnica independente, Curitiba, PR. E-mail: viviantakahashi@hotmail.com.

<sup>4</sup> Engenheiro Florestal, Universidade do Contestado, Canoinhas, SC. E-mail: gabrielmeyeradur@hotmail.com.

<sup>5</sup> Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, professor na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: dimas.agostinho.silva@gmail.com.

<sup>6</sup> Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, professor na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: klockuer@ufpr.br.

<sup>7</sup> Engenheiro Industrial Madeireiro, doutor em Engenharia Florestal, professor na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: alansulato@gmail.com.

<sup>8</sup> Engenheiro Florestal, doutor em Engenharia Florestal, professor na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: venson.ivan@gmail.com.

<sup>9</sup> Engenheira Florestal, doutora em Engenharia Florestal, professora na Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. E-mail: graciela.ufpr@gmail.com.

Briquetting of waste from mechanical and chemical processes of *Pinus* spp.

## ABSTRACT

Harnessing forest wastes as an energy source is an option for a better use of renewable resources, and a strategy for replacing fossil fuels. However, such wastes need to be improved for this function, and biomass compaction is a way to increase the quality of these materials for energy purposes. The objective of this work was to produce briquettes of two residues from *Pinus* spp. wood processing – sawdust and black liquor –, and to evaluate the different proportions of black liquor in the briquettes (0, 5, 10, and 15%). For the evaluation of briquettes, tests for expansion, apparent density, friability, immediate chemical analysis, superior calorific power, and energy density were performed. Increasing the black liquor percentage led to improvements in lateral and volumetric expansions, apparent density, volatile material content, and fixed-carbon content, but no gains were found for friability, height expansion, and energy characteristics of briquettes.

**Index terms:** sawdust, black liquor, biorefinery.

## INTRODUÇÃO

O aproveitamento da biomassa como insumo energético é uma tendência mundial, pois é necessário à redução das emissões de poluentes de origem fóssil (Sereghetti et al., 2015). Logo, a utilização dos resíduos florestais como fonte de energia é uma oportunidade para o uso racional dos recursos naturais, especialmente para ampliar a diversificação da matriz energética brasileira (Oliveira et al., 2017; Sette Jr. et al., 2018) que, hoje, tem 42,9% de fontes renováveis, das quais 8% são de participação da biomassa florestal (EPE, 2018).

Para a indústria de processamento mecânico de madeira no Brasil, é estabelecido o coeficiente de rendimento volumétrico de 35% (Conama, 2016), e o restante é transformado em resíduo que, por ser biodegradável, é considerado de baixo impacto ambiental. Resíduos madeireiros que poderiam ser reaproveitados e reutilizados são desperdiçados pela dispersão no meio ou pela queima a céu aberto (Nolasco & Uliana, 2014).

A biomassa florestal pode ser utilizada como fonte energética, seja pela queima direta da madeira, do uso como carvão vegetal, do emprego dos resíduos da exploração e aproveitamento de bio-óleos da pirólise (Couto et al., 2000). Apesar do potencial energético, a utilização desses resíduos diretamente na geração energética pode apresentar problemas relacionados ao alto teor de umidade da biomassa, à baixa densidade energética, à granulometria variada e à alta higroscopicidade (Santos et al., 2013; Araújo et al., 2016; Hansted et al., 2016), além de a baixa densidade dificultar o transporte e armazenamento, o que encareceria as atividades de transporte e logística (Yamaji et al., 2013).

Uma outra grande fonte de resíduos florestais é a indústria de processamento químico da madeira, em especial os setores de celulose e papel, em que o Brasil é o segundo maior produtor de celulose e o oitavo maior produtor de papel do mundo (IBÁ, 2018). Existem dois seguimentos na produção de polpa celulósica, o de “fibra curta” e o de “fibra longa”: o primeiro utiliza como matéria-prima madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* spp. e é voltado para a produção de papéis de escrever, imprimir e para fins sanitários; o segundo utiliza madeira de espécies do gênero *Pinus* spp. e é voltado para a produção de embalagens.

Atualmente, 90% da polpa celulósica do mundo é obtida por meio do processo kraft, que tem como principal efluente o licor negro (Oliveira et al., 2018). Esse resíduo é utilizado como combustível na caldeira de recuperação química e energética da própria indústria (Gellerstedt, 2015). O aproveitamento da energia gerada pela queima do licor negro, rico em lignina, é um dos pontos responsáveis pela viabilidade do processo kraft (Boschetti et al., 2019a).

A utilização do licor negro não se restringe mais à caldeira de recuperação energética da planta industrial de celulose e papel. A partir do licor negro, pode-se extrair a lignina (Tomani, 2010), que tem potencial para produzir aditivos para adesivos (Mankar et al., 2012), fibras de carbono (Souto

et al., 2018), aditivos para a produção de briquetes para fins energéticos (Boschetti et al., 2019a, 2019b), entre outros bioprodutos.

Essa atividade de melhor aproveitamento da biomassa florestal é conhecida como biorrefinaria, que pode ser definida como a transformação de matérias-primas de origem renovável – como o bagaço de cana-de-açúcar, resíduos agrícolas, resíduos florestais e licor negro – em produtos de maior valor agregado, como biocombustíveis e biomateriais (Van Heiningen, 2006).

O objetivo do presente trabalho foi produzir briquetes com resíduos dos processamentos mecânico e químico da madeira de *Pinus* spp. – a serragem e o licor negro – e avaliar as diferentes proporções de licor negro nos briquetes (0, 5, 10 e 15%).

## MATERIAL E MÉTODOS

Todos os resíduos utilizados no presente trabalho provieram do processamento da madeira de *Pinus* spp. O resíduo do processamento mecânico – a serragem – é proveniente de uma serraria de pequeno porte, com capacidade para processar 3 m<sup>3</sup> de madeira por dia. O resíduo do processamento químico – o licor negro – originou-se de uma indústria de celulose e papel voltada ao segmento de “fibra longa”, com capacidade produtiva anual de 700 mil toneladas de polpa celulósica por ano. Ambas as empresas estão localizadas na cidade de Três Barras, SC.

A densidade aparente a granel da serragem, sem ou com a adição de licor negro, foi realizada em cinco repetições de acordo com a norma EN 15103 (CEN, 2010).

Para a análise química da serragem, as amostras foram preparadas de acordo com a norma TAPPI T 257 sp-14 (TAPPI, 2014a), em três repetições. A partir deste ponto, determinou-se o teor de extrativos totais (TAPPI T 204 cm-17) (TAPPI, 2017), o teor de lignina insolúvel (TAPPI T 222 om-15) (TAPPI, 2015), o teor de lignina solúvel (Goldschimid, 1971) e o teor de cinzas na madeira (TAPPI T 211 om-16) (TAPPI, 2016). O teor de lignina total se deu pela soma do teor de lignina insolúvel com o teor de lignina solúvel; o teor de holocelulose foi obtido pela diferença 100 – (teor de lignina total + teor de extrativos totais).

Do licor negro, determinou-se o álcali ativo residual, o teor de sólidos totais e o pH, de acordo com a norma TAPPI T 650 cm-14 (TAPPI, 2014b), em três repetições. Para a produção de briquetes, a serragem foi primeiramente classificada em peneira de 4 mm; após essa classificação, a serragem foi seca em estufa a 103°C±2°C até atingir a massa constante. Com o material absolutamente seco, adicionou-se licor negro, tendo-se formado quatro tratamentos diferentes (Tabela 1).

**Tabela 1.** Tratamentos com as respectivas proporções da mistura de serragem e licor negro.

Tratamento	Serragem (%)	Licor negro* (%)
T1	100	0
T2	95	5
T3	90	10
T4	85	15

\*Consideraram-se apenas os sólidos presentes no licor negro.

Após a homogeneização da serragem com o licor negro, as amostras foram levadas de volta à estufa a 103°C±2°C até atingirem massa constante. Para a produção dos briquetes, a umidade foi ajustada a 12%, com auxílio de um borrifador e uma balança analítica; essa umidade foi escolhida

por ser considerada a ideal para a compactação na produção de briquetes (Lucena et al., 2008; Moraes et al., 2019).

A etapa de briquetagem das misturas foi realizada em uma prensa hidráulica, com o auxílio de molde cilíndrico de aço inox de 64 mm de diâmetro e 178 mm de altura, revestido por uma resistência elétrica para aquecimento. Produziram-se cinco briquetes para cada tratamento, tendo-se utilizado 80 g de mistura para cada um, à pressão de 3,32 kgf·cm<sup>-2</sup> a 150°C; o tempo de prensagem foi de 5 min, seguidos de 7 min de resfriamento dentro do molde sem pressão.

A densidade aparente foi determinada pelo método gravimétrico, tendo-se utilizado uma balança analítica e um paquímetro digital para a medição da altura (no sentido de aplicação da força) e medição lateral (no sentido perpendicular à aplicação da força). As expansões lateral, de altura e volumétrica foram calculadas medindo-se a altura e o diâmetro, ao final da briquetagem, e após climatização a 12% de umidade, tendo-se considerado um intervalo de tempo de 72 horas, que é o tempo necessário para a estabilização dimensional dos briquetes.

Os briquetes foram pesados, para determinação da massa inicial, e levados para um tambor rotativo, onde permaneceram por 15 min, a 30 rotações por min. Após esse procedimento, os briquetes foram novamente pesados, e a massa final foi determinada para se calcular a friabilidade.

Os briquetes foram caracterizados quimicamente por meio da determinação da análise química imediata, quanto ao teor de materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo conforme ASTM (2013), e quanto ao poder calorífico superior (ASTM, 2018). A densidade energética foi calculada multiplicando-se o poder calorífico superior pela densidade aparente dos briquetes.

Para os resultados da caracterização das matérias-primas, calcularam-se as estatísticas descritivas. Para a avaliação dos briquetes, realizou-se a análise de variância, seguida pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas da análise química da serragem de *Pinus* spp. estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas da caracterização química da serragem de *Pinus* spp.

PE	ET (%)	LI (%)	LS (%)	LT (%)	Holo (%)	C (%)
Média	2,97	25,87	0,49	26,11	70,92	0,47
Máximo	3,25	26,08	0,50	26,57	71,37	0,53
Mínimo	2,70	25,64	0,49	25,83	70,62	0,47
CV (%)	13,01	1,19	0,78	1,15	0,11	10,52

PE, parâmetros estatísticos; ET, teor de extrativos totais; LI, teor de lignina insolúvel; LS, teor de lignina solúvel; , teor de lignina total; Holo, teor de holocelulose; e C, teor de cinzas.

Os valores da composição química, encontrados para a serragem utilizada neste trabalho, estão de acordo com os descritos na literatura para o tipo de madeira em questão. Vivian et al. (2015) encontraram 2,83% para o teor de extrativos totais, 26,18% para o teor de lignina insolúvel, 0,53% para o teor de lignina solúvel, 26,71% para o teor de lignina total e 70,46% para o teor de holocelulose ao estudarem a madeira de *Pinus taeda*, também da região Sul do Brasil.

Para o uso energético, deve-se destacar o teor de lignina total e o teor de cinzas. O primeiro está diretamente ligado ao potencial energético da biomassa, já que é um componente rico em carbono e

hidrogênio (Teixeira et al., 2016), e seu poder calorífico é superior ao da celulose, o que indica que espécies com elevados teores de lignina apresentam melhor desempenho energético (Couto, 2004). O segundo componente, além de contribuir negativamente para o aproveitamento energético, influencia a operação e a limpeza da caldeira, pois, biocombustíveis com maior teor de cinzas impõem condições abrasivas e podem fundir a elevadas temperaturas ao aderir aos elementos metálicos, o que é indicativo da necessidade de uma remoção mais eficiente e regular das cinzas (Carneiro, 2013; Liu et al., 2014).

As estatísticas descritivas da análise química do licor negro de *Pinus* spp. estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3.** Estatísticas descritivas da caracterização química do licor negro de *Pinus* spp.

PE	ST (%)	SO (%)	SI (%)	pH	AAR (g·l <sup>-1</sup> )
Média	17,12	6,71	10,41	13,40	12,11
Máximo	17,30	7,26	10,64	13,56	12,15
Mínimo	16,90	6,26	10,04	13,24	12,05
CV (%)	1,17	7,61	3,14	1,20	0,44

PE, parâmetros estatísticos; ST, teor de sólidos totais; SO, teor de sólidos orgânicos; SI, teor de sólidos inorgânicos; AAR, álcali ativo residual.

O teor de sólidos totais do licor negro é dividido em sólidos orgânicos, oriundos da madeira, e inorgânicos, oriundos dos reagentes químicos do processo kraft de polpação. No presente estudo, o licor negro utilizado continha mais sólidos inorgânicos do que orgânicos. Tal característica pode promover problemas iguais aos supracitados quanto à presença de cinzas na madeira.

Ao final do processo de polpação, é desejável que o pH seja superior a 11, e o álcali ativo residual esteja entre 5 e 13 g·L<sup>-1</sup> (Bonfatti Júnior, 2014), para evitar a precipitação da lignina na polpa celulósica; portanto, os valores desses dois parâmetros estão em linha com o ideal para a polpação industrial.

Os valores médios e a análise estatística da densidade a granel da serragem estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Densidade a granel das serragens.

Tratamento	Densidade a granel (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	158,38c (0,66)
T2	184,22b (4,66)
T3	194,45ab (0,47)
T4	205,11a (1,97)

Médias seguidas de letras iguais são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade; valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

A serragem de *Pinus* spp. do presente estudo tinha densidade a granel menor do que as descritas por Fernandez et al. (2017) e Silva et al. (2015), que encontraram, respectivamente, 180 kg·m<sup>-3</sup> e 170 kg·m<sup>-3</sup>, ao estudarem essa biomassa para a produção de briquetes. Contudo, a adição de licor negro promoveu aumento significativo dessa propriedade, inclusive nas menores dosagens desse resíduo, em razão do aumento de compostos inorgânicos mais densos na mistura.

Os resultados da análise estatística da expansão lateral, de altura, volumétrica e friabilidade estão apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Análise estatística da expansão lateral, de altura, volumétrica e friabilidade.

Tratamento	Expansão lateral (%)	Expansão em altura (%)	Expansão volumétrica (%)	Friabilidade (%)
T1	4,45a (15,23)	0,46b (29,83)	5,42a (17,72)	1,50a (6,53)
T2	4,06ab (24,95)	0,51ab (30,30)	4,58ab (6,93)	1,41a (12,09)
T3	3,94ab (15,64)	0,75ab (28,27)	4,19ab (2,26)	1,56a (9,12)
T4	2,42a (20,93)	0,89a (11,31)	3,77b (11,05)	1,34a (10,90)

Médias seguidas de letras iguais são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade; valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

Os briquetes tendem a se expandir em altura e lateralmente, formando a expansão volumétrica, após o processo de briquetagem e ao ganhar umidade do ambiente (Moraes et al., 2019). No presente trabalho, a adição de licor negro contribuiu para redução da expansão lateral e volumétrica, contudo, provocou maior expansão em altura. No entanto, os resultados de expansão em altura e volumétrica de todos os tratamentos podem ser considerados baixos, em comparação a outros trabalhos. Silva et al. (2015) encontraram expansão em altura entre 3,85 e 9,00%, para serragem de eucalipto. Yamaji et al. (2013) encontraram expansão de 2,63%, para briquetes de serragem de *Pinus* spp., em climatização a 75% de umidade. Oliveira et al. (2017) encontraram valores para expansão volumétrica de 2,16%, para serragem, e de 2,88%, para serragem moída de *Pinus* spp., o que indica que a granulometria não afeta essa propriedade.

Durante a produção de briquetes, no processo de compactação dos resíduos com elevadas pressões e temperaturas acima de 100°C ocorre a plastificação da lignina, que age como elemento ligante entre as partículas. Ao se adicionar licor negro à produção do briquete, a mistura é enriquecida de lignina, que pode atuar como agente ligante, fato que justifica a melhora na expansão volumétrica dos briquetes que tiveram adição de licor negro. Estudos já mostraram que a adição de lignina kraft pode resultar na melhoria das propriedades dos briquetes, em razão das propriedades aglutinantes deste elemento (Gouvêa et al., 2017).

Todos os tratamentos apresentaram friabilidade estatisticamente igual, o que é indicativo de que os briquetes tiveram uma boa compactação pelo processo de produção adotado. Segundo a classificação proposta por Oliveira et al. (1982), em relação à geração de finos para o teste da friabilidade, todos os briquetes produzidos foram classificados como muito pouco friáveis, já que apresentaram uma geração de finos abaixo de 10%. Em geral, quanto menor a friabilidade, mais resistente mecanicamente é o briquete (Silva et al., 2015).

Os valores médios e a análise estatística da densidade aparente dos briquetes estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6.** Valores médios e análise estatística da densidade aparente dos briquetes.

Tratamento	Densidade aparente (kg·m <sup>-3</sup> )
T1	833,04b (2,34)
T2	855,01ab (3,18)
T3	909,66ab (3,41)
T4	931,43a (4,07)

Médias seguidas de letras iguais são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade; valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

A adição do licor negro provocou o aumento da densidade aparente, e apenas a testemunha e a adição de 15% de licor negro se diferenciaram estatisticamente. Os resultados do presente trabalho são próximos aos obtidos por Paula et al. (2011), que encontraram densidade aparente de 884 kg·m<sup>-3</sup> para briquetes de serragem, também com 5 min de prensagem.

A análise química imediata determina os teores percentuais de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo (Machado et al., 2016). Os valores médios da análise de química imediata dos briquetes produzidos e as análises estatísticas estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Valores da análise de química imediata e resultados da análise estatística.

Tratamento	TC (%)	TMV (%)	CF (%)
T1	0,97c (22,26)	79,43a (0,52)	19,59b (2,58)
T2	2,65b (6,37)	71,91b (0,59)	25,53a (1,10)
T3	4,03b (26,56)	70,19c (0,79)	25,77a (2,08)
T4	7,19a (1,78)	66,91d (0,73)	25,89a (1,61)

TC, teor de cinzas; TMV, teor de materiais voláteis; CF, teor de carbono fixo. Médias seguidas de letras iguais são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade; valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

O teor de cinzas na madeira situa-se em torno de 1% (Machado et al., 2016), portanto, o resultado do tratamento T1, que é totalmente serragem, está de acordo com a literatura. A adição de licor negro, que é um material rico em compostos inorgânicos, provocou um aumento significativo desse parâmetro e diminuiu o potencial energético dos briquetes, uma vez que as cinzas são incombustíveis.

O teor de materiais voláteis reúne as substâncias que são desprezadas do combustível durante a queima, assim, quanto maior esse parâmetro, mais rápida será a queima do combustível (Santos et al., 2016). O teor de carbono fixo, que se refere à fração do combustível que queima em estado sólido, tem relação indiretamente proporcional à velocidade de queima, ou seja, combustíveis com alto teor de carbono fixo possuem queima mais lenta (Oliveira et al., 2010). A adição de licor negro provocou a diminuição significativa do teor de materiais voláteis e o aumento significativo do teor de carbono fixo, provocando ligeira vantagem, pois, os briquetes com licor negro terão mais tempo de residência no aparelho de queima, em comparação aos briquetes produzidos apenas com serragem.

Os valores médios e a análise estatística do poder calorífico superior e da densidade energética estão apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8.** Valores das propriedades energéticas dos briquetes e resultados da análise estatística.

Tratamento	PCS (kcal·kg <sup>-1</sup> )	DE (kcal·m <sup>-3</sup> )
T1	4803,50a (1,34)	4002344,12a (3,68)
T2	4619,00ab (2,33)	3951241,98a (5,51)
T3	4394,50b (1,14)	3998536,86a (4,55)
T4	4465,00ab (2,80)	4161994,56a (6,87)

PCS, poder calorífico superior; DE, densidade energética. Médias seguidas de letras iguais são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey, a 95% de probabilidade; valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

O poder calorífico é definido como a quantidade de calor liberada na combustão completa do combustível; chama-se de superior quando se considera a presença de vapor de água nos gases liberados na combustão (Machado et al., 2016). A densidade energética é o produto entre a densidade do material e seu poder calorífico e representa a quantidade de energia disponível em um determinado

volume do combustível. A adição do licor negro não mostrou tendência clara de influenciar o poder calorífico superior, e o valor do tratamento sem licor negro é estatisticamente igual ao tratamento com maior presença de licor negro. Considerando a densidade energética, não se observou nenhuma diferença estatística entre os tratamentos, ou seja, a adição de licor negro não promoveu ganhos quanto a essa propriedade.

## CONCLUSÕES

A adição de licor negro proporcionou melhoria das propriedades físicas dos briquetes, ao aumentar a densidade aparente e reduzir as expansões lateral e volumétrica.

Com aumento do teor de licor negro nos briquetes, observou-se aumento do teor de carbono fixo e do teor de cinzas e diminuição do teor de materiais voláteis e do poder calorífico superior.

Não se observou melhoria das propriedades de friabilidade e densidade energética com a adição de licor negro.

Apesar da melhoria das propriedades físicas e do teor de carbono fixo, a adição do licor negro não é tecnicamente viável para a produção de briquetes, pois não aumenta o poder calorífico superior e a densidade energética desse material.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), código de financiamento 001, Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, S.; VILAS BOAS, M.A.; NEIVA, D.M.; CARNEIRO, A. de C.; VITAL, B.; BREGUES, M.; PEREIRA, H. Effect of a mild torrefaction for production of eucalypt wood briquettes under different compression pressures. **Biomass and Energy**, v.90, p.181-186, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.04.007>.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D1762-84(2013)**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1520/D1762-84R13>.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D4809-18**: Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter (Precision Method). West Conshohocken, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1520/D4809-18>.
- BONFATTI JÚNIOR, E.A. **Designificação com oxigênio para polpa kraft com alto número kappa**. 2014. 116p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14352.00001>.
- BOSCHETTI, W.T.N.; CARVALHO, A.M.M.L.; CARNEIRO, A. de C.O.; SANTOS, L.C.; POYARES, L.B.Q. Potential of kraft lignina as an additive in briquette production. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v.34, p.147-152, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.1515/npprj-2018-0002>.
- BOSCHETTI, W.T.N.; LOPES, A. do C.P.; RIBEIRO, R.A.; REYES, R.Q.; CARNEIRO, A. de C.O. Kraft lignin as an additive in pine and eucalyptus particle composition for briquette production. **Revista Árvore**, v.43, e430201, 2019b. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000200001>.
- CARNEIRO, A.C.O. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. de. **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais**. Viçosa: Os Editores, 2013. p.429-455.
- CEN. European Committee for Standardization. **EN 15103**: Solid biofuels: determination of bulk density. Brussels, 2010.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 474, de 6 de abril de 2016. Altera a Resolução nº 411, de 6 de maio de 2009, que dispõe sobre procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros de origem nativa, bem como os respectivos padrões de nomenclatura e coeficientes de rendimento volumétricos, inclusive carvão vegetal e resíduos de serraria, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2 maio 2016. Seção 1, p.74.



- COUTO, L.; FONSECA, E.M.B.; MÜLLER, M.D. **O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de biomassa para energia em Minas Gerais**: aspectos técnicos, econômicos sociais e ambientais. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. 44p.
- COUTO, L.C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v.1, p.71-92, 2004.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018. 292p.
- FERNANDEZ, B.O.; GONÇALVES, B.F.; PEREIRA, A.C.C.; HANSTED, A.L.S.; PÁDUA, F.A.; DA RÓZ, A.L.; YAMAJI, F.M. Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassas. **Revista Virtual de Química**, v.9, p.29-38, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170005>.
- GELLERSTEDT, G. Softwood kraft lignin: raw material for the future. **Industrial Crops and Products**, v.77, p.845-854, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.040>.
- GOLDSCHIMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (Ed.). **Lignins**: occurrence, formation, structure and reactions. New York: J. Wiley & Sons, 1971. p.241-266.
- GOUVÊA, A. de F.G.; CARVALHO, A.M.M.L.; SILVA, C.M.; CARNEIRO, A. de C.O.; TRUGILHO, P.F.; FREITAS, F.P. de; VALADARES, L.B.; GOMES, C.M.; COSTA, E.B. Estudo da adição da lignina kraft nas propriedades mecânicas dos briquetes de resíduos da indústria moveleira. **Ciência Florestal**, v.27, p.1029-1036, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509828678>.
- HANSTED, A.L.S.; NAKASHIMA, G.T.; MARTINS, M.P.; YAMAMOTO, H.; YAMAJI, F.M. Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production. **Fuel**, v.184, p.180-184, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.071>.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Sumário Executivo 2018**. 2018. Disponível em: <<https://www.iba.org/publicacoes>>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- LIU, Z.; FEI, B.; JIANG, Z.; CAI, Z.; LIU, X. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. **Wood Science and Technology**, v.48, p.903-917, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-014-0648-x>.
- LUCENA, D.A.; MEDEIROS, R.D. de; FONSECA, U.T.; ASSIS, P.S. Aglomeração de moinha de carvão vegetal em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalúrgica e Materiais**, v.4, p.1-6, 2008. DOI: <https://doi.org/10.4322/tmm.00404001>.
- MACHADO, G. de O.; CHRISTOFORO, A.L.; ARAÚJO, V.A. de; LAHR, F.A.R. **Química da madeira no contexto energético**. São Carlos: EESC, USP, 2016. 121p.
- MANKAR, S.S.; CHAUDHARI, A.R.; SONI, I. Lignin in phenol-formaldehyde adhesives. **International Journal of Knowledge Engineering**, v.3, p.116-118, 2012.
- MORAES, M.D.A. de; SILVA, M.F. da; BARBOSA, P.V.G.; MARQUES, R.; SILVA, R.T.; SETTE JUNIOR, C.R. Characterization of *Khaya ivorensis* (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes. **Scientia Forestalis**, v.47, p.34-44, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n121.04>.
- NOLASCO, A.M.; ULIANA, L.R. **Gerenciamento de resíduos na indústria de pisos de madeira**. Piracicaba: ANPM, 2014. 40p.
- OLIVEIRA, A.C.; CARNEIRO, A. de C.O.; VITAL, B.R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B.L.C.; CARDOSO, M.T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v.38, p.431-439, 2010.
- OLIVEIRA, J.B. de; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M.G.; GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R. (Comp.). **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p.60-73.
- OLIVEIRA, L.H.; BARBOSA, P.V.G.; LIMA, P.A.F.; YAMAJI, F.M.; SETTE JÚNIOR, C.R. Aproveitamento de resíduos madeiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, p.683-691, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA17010>.
- OLIVEIRA, R.C.P.; MATEUS, M.; SANTOS, D.M.F. Chronoamperometric and chronopotentiometric investigation of Kraft black liquor. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.43, p.16817-16823, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.046>.
- PAULA, L.E. de R. e; TRUGILHO, P.F.; REZENDE, R.N.; ASSIS, C.O. de; BALIZA, A.E.R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, p.103-112, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.66.103>.
- SANTOS, D.R. de S.; SETTE JUNIOR, C.R.; SILVA, M.F. da; YAMAJI, F.M.; ALMEIDA, R. de A. Potencial de espécies de Bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, v.44, p.751-758, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.21>.
- SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROS, J.H. de. (Ed.). **Bioenergia & biorrefinaria**: cana-de-açúcar & espécies florestais. Viçosa: Os Editores, 2013. 551p.
- SEREGHETTI, G.C.; LANÇAS, K.P.; SARTORI, M.S.; REZENDE, M.A.; SOLER, R.R. Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, v.30, p.257-262, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n3p257-262>.

- SETTE JR., C.R.; HANSTED, A.L.S.; NOVAES, E.; LIMA, P.A.F. e; RODRIGUES, A.C.; SANTOS, D.R. de S.; YAMAJI, F.M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Industrial Crops & Products**, v.122, p.209-213, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057>.
- SILVA, D.A. da; YAMAJI, F.M.; BARROS, J.L. de; RÓZ, A.L. da; NAKASHIMA, G.T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, v.45, p.713-722, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v45i4.39700>.
- SOUTO, F.; CALADO, V.; PEREIRA JR, N. Lignin-based carbon fiber: a current overview. **Materials Research Express**, v.5, e072001, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaba00>.
- TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI T 204 cm-17**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, 2017.
- TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI T 211 om-16**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, 2016.
- TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI T 222 om-15**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta, 2015.
- TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI T 257 sp-14**: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta, 2014a.
- TAPPI. Technical Association of Pulp and Paper Industry. **TAPPI T 625 cm-14**: Analysis of Soda and Sulfate Black Liquor. Atlanta, 2014b.
- TEIXEIRA, C.M.; MARTINS, M.P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F.M. Caracterização química de resíduos de *Eucalyptus* sp. de floresta de curta rotação para a produção de bioenergia. **Revista Virtual de Química**, v.8, p.1693-1701, 2016. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160112>.
- TOMANI, P. The lignoboost process. **Cellulose Chemistry and Technology**, v.44, p.53-58, 2010.
- VAN HEININGEN, A. Converting a kraft pulp mill into an integrated forest biorefinery. **Pulp & Paper Canada**, v.107, p.141-146, 2006.
- VIVIAN, M.A.; SEGURA, T.E.S.; BONFATTI JÚNIOR, E.A.; SARTO, C.; SCHMIDT, F.; SILVA JÚNIOR, F.G. da; GABOV, K.; FARDIM, P. Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. **Scientia forestalis**, v.43, p.183-191, 2015.
- YAMAJI, F.M.; VENDRASCO, L.; CHRISOSTOMO, W.; FLORES, W. de P. Análise do comportamento higroscópico de briquetes. **Energia na Agricultura**, v.28, p.11-15, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2013v28n1p11-15>.
-