

Produção e caracterização física e mecânica de briquetes obtidos de carvão vegetal

Production and physical and mechanical characterization of briquettes obtained from charcoal

José Sebastião Cidreira Vieira^{*}; Neemias da Silva Nascimento; Wilame Silva Castro; Mackson Rangel de Melo Rodrigues; José Victor Silva e Silva; Sarah Lorena Silva Santos.

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Campus Zé Doca,
Departamento de Desenvolvimento Educacional.
e-mail: sebastiaocidreira@ifma.edu.br

Submetido em 07/04/2020; Versão revisada em 23/05/2020; Aceito em 26/05/2020

Resumo

O setor siderúrgico é o maior consumidor de carvão vegetal, que é usado como redutor e fornecedor de calor para a combustão dos minérios de ferro, ao longo do processo de obtenção de ferro-gusa, aço e ferros-liga. Os objetivos deste trabalho foram produzir briquetes a partir de resíduos finos de carvão vegetal, realizar caracterização física e mecânica dos briquetes obtidos e investigar a viabilidade de sua aplicação na siderurgia. Os resíduos foram aglutinados com fécula de mandioca e cal virgem e água. Os briquetes foram caracterizados em termos de análise imediata, umidade e resistência mecânica. Os materiais produzidos com fécula de mandioca e cal virgem apresentaram boas propriedades mecânicas e energéticas, permitindo inferir a sua viabilidade na obtenção de energia renovável e aplicação em diversos setores. Os briquetes contendo fécula de mandioca revelaram ser mais resistentes quando comparados com briquetes fabricados com cal virgem.

Palavras-chave: Biomassa, resíduos, briquetes.

Abstract

The steel sector is the largest consumer of charcoal, where it is used as a reducer and heat supplier for the combustion of iron ores throughout the process of obtaining pig iron, steel, and ferro-alloys. The objectives of this work were to produce briquettes from fine charcoal residues, to perform physical and mechanical characterization of the briquettes obtained and to investigate their feasibility of application in the steel industry. The residues were agglutinated with cassava starch and lime and water. Briquettes were characterized in terms of immediate analysis and mechanical resistance. The materials produced with cassava starch and lime showed good mechanical and energetic properties, allowing them to infer its viability in obtaining renewable energy and application in several sectors. The briquettes containing cassava starch proved to be more resistant when compared to briquettes made with lime.

Keywords: Biomass, waste, briquettes.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país tropical, que devido a sua localização geográfica apresenta um grande potencial para a obtenção de energia renovável. Naturalmente, apresenta um perfil de país agrícola, pois possui climas favoráveis, disponibilidade de recursos hídricos, apresenta excelente índice pluviométrico e uma vasta área territorial, que permite a expansão de diferentes cultivares. Além de sua rica biodiversidade e tecnologias avançadas, desponta como um produtor com elevado potencial para a produção de bioenergia (OSHIRO, 2016; VIEIRA, 2017).

O Brasil ainda utiliza o carvão vegetal em processos industriais. Existem mais de 120 indústrias com segmentos na área de ferro-gusa, ferro-liga e aço, que utilizam o carvão vegetal como fonte redutora e fornecedora de calor. Esse país detém 11% da produção mundial de carvão vegetal. Por isso, atualmente, ocupa o posto de maior produtor mundial deste insumo energético. A demanda mundial por fontes alternativas de energia tem crescido significativamente nos últimos anos e despertado o interesse internacional pelo potencial brasileiro na produção de biomassa (OLIVEIRA *et al.*, 2015; LIMA, SANTOS e CASTRO, 2016, JESUS, 2020).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Produção de Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) gerou divisas na ordem de R\$ 16,3 bilhões em 2018, devido ao desempenho excelente da indústria siderúrgica, maior consumidor de carvão vegetal e conseqüente aumento da demanda, obtendo um crescimento de 11,1% quando comparado com o ano de 2017. A produção de carvão extrativo rendeu 544,5 mil toneladas. Os principais estados produtores foram: o Maranhão, com 161,5 mil toneladas e a Bahia, com 100,5 mil toneladas. Dentre os municípios líderes na produção de carvão vegetal destacam-se Grajaú-MA (IBGE, 2018).

O carvão vegetal ocupa uma posição de destaque na economia nacional. Sua maior demanda é no setor siderúrgico, onde é utilizado como redutor e

fornecedor de calor para a redução dos minérios de ferro, no processamento de ferro-gusa. Este insumo também é amplamente consumido nas indústrias de cerâmica, de cimento, de alimentos e no setor doméstico (MARTINS *et al.*, 2016).

No decurso da produção do carvão vegetal ocorre um acúmulo bastante expressivo de finos, que são oriundos das atividades do processo de obtenção desta fonte energética, que perduram desde as etapas de carbonização, peneiramento, transporte e utilização final (DONATO *et al.*, 2015). A geração de finos ocorre naturalmente em face da friabilidade intrínseca do carvão vegetal. Esse parâmetro de qualidade está diretamente ligado à abrasão e choques mecânicos, que o carvão fica exposto durante seu processo de obtenção. A capacidade de gerar finos (friabilidade) também é afetada pela umidade, pelo diâmetro e pelo comprimento da madeira carbonizada (DONATO *et al.*, 2015).

A carbonização da madeira consiste no seu aquecimento a temperatura entre 350 e 500 °C, na presença controlada de oxigênio, aumentando o teor de carbono a partir de modificações de seus componentes. Fatores como impurezas, temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e pressão afetam o rendimento e a qualidade do carvão produzido (CARNEIRO *et al.*, 2013).

No entanto, apesar dos avanços tecnológicos na produção de carvão vegetal, no Brasil, continua sendo produzido em fornos rudimentares por meio de processos deficientes, quanto ao domínio sobre a carbonização ou pirólise da lenha, que aliados à heterogeneidade do carvão vegetal, característica dos processos defasados em termos de produção continua, resultam em um produto final com propriedades físicas e químicas variadas e indesejáveis, principalmente, ao setor siderúrgico. Dentre os principais problemas relacionados ao controle do processo produtivo do carvão vegetal, destacam-se a redução da resistência mecânica e a elevada taxa de friabilidade. Esses parâmetros são responsáveis pela geração de resíduos finos durante

a produção, transporte e alimentação dos altos-fornos. O excesso de finos quando injetados no alto-forno pode obstruir a passagem de ar quente na zona de combustão, especificamente nas ventaneiras, dificultando a redução dos minérios de ferro durante a produção de ferro-gusa (UHLIG, GOLDBERG e COELHO, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Dentre as alternativas de aproveitamento dos finos de carvão vegetal destaca-se a briquetagem, que permite sua aplicação como redutor e fornecedor de calor na produção de ferro-gusa ou para geração de energia propriamente dita. A briquetagem é uma técnica de aglomeração de finos na qual as partículas dispersas de uma biomassa são compactadas a determinada pressão conforme a qualidade da matéria-prima, resultando em um sólido com granulometria bem definida. Quando a matéria-prima é constituída de finos de carvão vegetal, se faz necessária a adição de um material ligante (aglutinante), capaz de manter a densificação das partículas visando a obtenção de um produto denominado de briquete (LUCENA *et al.*, 2008; DONATO *et al.*, 2015).

O aglutinante e a água assumem um papel relevante na composição de um briquete, uma vez que influenciam diretamente nas propriedades químicas, físicas e mecânicas e no seu custo final. O excesso de umidade exerce influência negativa durante a queima, a geração de cinzas (QUIRINO e BRITO, 1991; FERNANDEZ *et al.*, 2017)

No decurso de fabricação de briquetes, os resíduos são submetidos à moagem, homogeneização, aglomeração, densificação das partículas do material sólido, dando origem a um combustível com granulometria uniforme, mais denso e com resistência mecânica elevada. O efeito da densificação resultante do processo de briquetagem produz um combustível com maior concentração energética por unidade de volume e o torna economicamente viável (PINHEIRO *et al.*, 2006; FONTE, QUIRINO e PASTORE JÚNIOR, 2010).

A geração de resíduos finos proveniente da

atividade de carvoejamento pode gerar lucro ao serem transformados em matérias-primas por diversos processos, reduzindo o preço e a demanda do produto final. Os finos de carvão vegetal podem ser reutilizados como matéria-prima de processos diferentes daquele que lhe deu origem. Eles podem ser empregados no setor siderúrgico para a produção de ferros-ligas e ferro-gusa, na produção de energia por intermédio de calor, de vapor ou de eletricidade, em grupos geradores ou termoelétrica, nas indústrias alimentícias, de cimento e cerâmica (PAULA, 2010).

Este trabalho teve como objetivo principal produzir briquetes, a partir de resíduos finos de carvão vegetal aglutinados com fécula de mandioca, cal virgem e adição de água, avaliar suas propriedades físicas e mecânicas, além de estudar a viabilidade de aplicação no setor siderúrgico.

A compactação dos resíduos agroindustriais aumenta a densidade, diminui o teor de umidade, minimiza a heterogeneidade e o tamanho nominal de partículas de biomassa, corrige as anomalias dos resíduos antes de serem expostos ao processo de briquetagem (FERNANDEZ *et al.*, 2017).

O município de Zé Doca (MA), em termos de economia destaca-se na agroindústria, principalmente pela atividade madeireira. Devido a essa atividade são geradas quantidades grandes de resíduos vegetais, como os finos que resultam de atividade de carvoejamento e pó de serragem, provenientes da atividade madeireira, mas que podem ser aproveitados para gerar emprego e renda, contribuindo assim, para o bem-estar da população e manutenção do homem no campo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os resíduos finos de carvão vegetal utilizados na fabricação dos briquetes foram produzidos com lenha, oriunda das madeiras do município de Zé Doca (MA) e carbonizados em caeiras de modo totalmente rudimentar, sem controle dos parâmetros de qualidade exigidos para o carvão vegetal. Essa

atividade é comum na mesorregião do Alto Turi, pois não existem políticas públicas que incentivem a produção de carvão vegetal mecanizada.

As amostras foram coletadas em quatro carvoarias do município de Zé Doca (que estavam operantes no dia da coleta) em sacos plásticos de capacidade 3,0 Kg, totalizando 12 Kg. As referidas amostras foram transportadas para o Laboratório de Biocombustíveis do IFMA Campus Zé Doca, onde foram submetidas ao processo de moagem, peneiramento, homogeneização, extrusão, cura, secagem, caracterização físico-química e resistência mecânica.

O carvão foi preparado para a produção de briquete através da trituração da biomassa em moinho de bolas e, posteriormente, peneirado em um agitador de peneira da marca: ABRONZINOX, modelo: AG-52/12, sendo utilizada a massa retida na peneira de malha inferior a 0,15mm.

Cada batelada foi composta de 416 g de carvão pulverizado, 95,0 g de aglutinante (fécula de mandioca ou cal virgem) e 330g de água. Inicialmente, o aglutinante foi misturado com 130 g de água e aquecido em temperatura branda até atingir o ponto de gelatinização. As demais matérias-primas foram homogeneizadas em um misturador planetário, marca VapTeste juntamente com o aglutinante gelatinizado, durante 15 minutos.

Os briquetes foram confeccionados em formato cilíndrico com diâmetro médio de 45 mm e altura média de 150 mm, moldados durante 5 minutos em uma prensa extrusora de baixa pressão de compactação idealizada e confeccionada no próprio Campus Zé Doca. A **Figura 1** apresenta a prensa extrusora e briquetes produzidos com finos de carvão vegetal.

Os corpos de prova foram desmoldados, curados à temperatura ambiente, secos em estufa a 80 °C durante duas horas e caracterizados em termos de análise química imediata (teor de cinzas, teor de materiais voláteis e teor de carbono fixo), teor de umidade e resistência mecânica conforme sugerem Adad (1982) e Pinheiro (2009). Para cada tipo de

aglutinante foram confeccionados cinco corpos de prova e sua caracterização foi realizada em triplicata totalizando 90 ensaios.

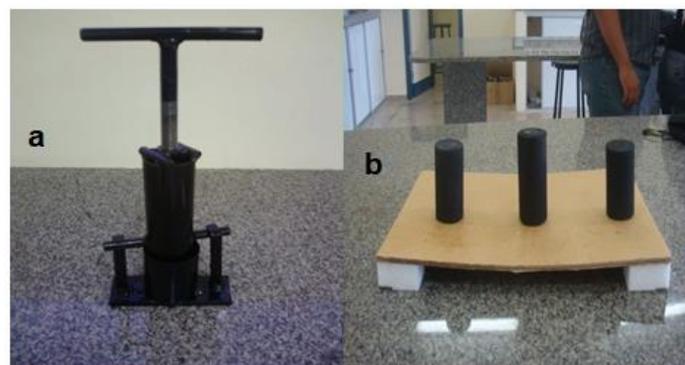


Figura 1 Produção de briquetes a partir de finos de carvão vegetal.
Legenda: (a) Extrusora de baixa pressão de compactação
(b) briquetes produzidos com diferentes aglutinantes.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Em uma cápsula de porcelana previamente limpa e seca foi pesado aproximadamente de 1g de briquete. Em seguida, o sistema foi submetido à secagem, em uma estufa a 110 °C ± 5°C durante três horas. Após a secagem a amostra foi resfriada em um dessecador e pesada novamente. O teor de umidade foi calculado através da **Equação 1** apresentada a seguir.

$$H_2O(\%) = \left(\frac{P_{úmido} - P_{seco}}{P_{úmido}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde, $P_{úmido}$ é o peso da amostra (g) úmido e P_{seco} é o peso da amostra (g) seca.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS

Em um cadinho de porcelana limpo e seco foi pesado cerca de 1g da amostra, que posteriormente foi levado ao forno mufla, previamente aquecido. A amostra foi calcinada por completo, em uma temperatura de 650 °C, por duas horas. Após a calcinação, o sistema foi deixado no próprio forno mufla, para esfriar e posteriormente foi levado ao dessecador. Em seguida o cadinho foi pesado e os cálculos efetuados. O teor de cinzas foi calculado

através da **Equação 2**, disposta a seguir.

$$T_{cinzas}(\%) = \left(\frac{P_{cinzas}}{P_{inicial}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde, T_{cinzas} é o teor de cinzas (g), P_{cinzas} é o peso da amostra (g) após a análise de cinzas, e $P_{inicial}$ é o peso inicial (g) da amostra.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE MATERIAIS VOLÁTEIS

Para a determinação do teor de materiais voláteis foi pesado em um cadinho de porcelana, previamente limpo, seco e tarado, cerca de 1g de amostra. Em seguida, foi colocado sobre a porta do forno mufla, previamente aquecido a $980 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 3 minutos e, posteriormente no meio do forno mufla, deixado por 7 minutos com a porta fechada. Após esse procedimento a amostra foi retirada e colocada no dessecador para resfriar. O teor de materiais voláteis, foi calculado de acordo com a **Equação 3**, que é descrita a seguir.

$$MV(\%) = \left(\frac{P_{av} - P_{dv}}{P_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde, MV é material volátil, P_{av} é o peso da amostra (g) antes da análise de voláteis, P_{dv} é o peso da amostra (g) depois da análise de voláteis e P_i é o peso inicial (g) da amostra.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO

O teor de carbono fixo foi determinado pelo método matemático conforme sugerido por Adad, 2008 e 1982, através da Equação 4, demonstrada a seguir.

$$Carbono_{fixo}(\%) = 100 - (\%H_2O + \%MV + \%T_{cinzas}) \quad (4)$$

DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO

O poder calorífico foi determinado pelo método matemático utilizando a fórmula de Goutal descrita por Adad (1982). A equação a seguir foi utilizada para calcular-se o poder calorífico dos corpos de prova.

$$Poder_{calorífico} = (82 \times \%Carbono_{fixo} + a \times MV)(Kcal / Kg) \quad (5)$$

Onde, a, é um coeficiente que varia com a qualidade do carvão. Para determiná-lo basta calcular a percentagem V. Os demais membros da equação foram definidos em equações anteriores.

RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com o intuito de determinar o comportamento mecânico dos briquetes, quando submetidos à determinada carga ou esforço. As análises foram realizadas em triplicata em uma máquina de resistência mecânica, modelo Tira Teste 2024. Os ensaios de compressão mecânica foram realizados aplicando-se uma força perpendicular à seção do briquete até que ocorresse sua ruptura. A célula de carga utilizada foi de 5 toneladas, carregamento de $0,50 \text{ mm min}^{-1}$ aplicada no sentido diametral dos briquetes. O módulo de ruptura (MOR) dos briquetes foi calculado através da Equação 6, que é mostrada a seguir.

$$MOR = \sigma = \left[\frac{F_{orça}}{A_{rea}} \right] \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de briquetes pode contribuir para a eliminação de resíduos com elevado potencial de queima. Os resíduos de biomassa provocam impactos tanto de ordem social, quanto de ordem ambiental. A geração de resíduos causa impactos negativos como alteração de paisagem devido à poluição visual,

proliferação de macro e micro vetores, poluição do solo, do ar e dos lençóis freáticos. Os materiais particulados podem ser dispersos pela ação do vento ou serem liberados juntamente a gases tóxicos quando os resíduos são queimados. A atividade madeireira possui altos índices de desperdícios, pois apenas 1/3 da madeira extraída transforma-se em produto final, enquanto 2/3 das árvores exploradas acabam virando sobras ou serragem e na maior parte das vezes, esses resíduos não possuem destinação correta (MARQUES, 2012).

A **Tabela 1** mostra os resultados revelados durante a caracterização química imediata e teor de umidade para os briquetes produzidos com fécula de mandioca e cal virgem, respectivamente. Em face dos estudos anteriores, na área de produção de carvão ecológico (briquete), realizados pelo Grupo de Pesquisas em Análises Químicas Sustentáveis (GPAQS), do IFMA-Campus Zé Doca, no decorrer deste estudo, a fabricação dos briquetes contendo fécula de mandioca ou cal virgem foi mantida na mesma proporção em relação aos finos de carvão e água conforme mencionado no **capítulo materiais e métodos**.

Tabela 1
Caracterização dos briquetes obtidos.

| Parâmetros | Aglutinantes | | Faixa ideal |
|---|--------------------|-------------------|-------------|
| | Fécula de mandioca | Cal virgem | |
| Teor de cinzas (%) | 2,55 (±0,90) | 28,79 (±4,71) | 0,5 - 4 |
| Materiais voláteis (%) | 26,65 (±11,70) | 8,48 (±4,74) | 25 - 35 |
| Carbono fixo (%) | 65,34(±10,53) | 49,51 (±9,92) | 70 - 80 |
| Poder calorífico (Kcal/Kg) | 7910,08 (±295,16) | 5010,45(±779,74) | Anotar |
| Teor de umidade (%) | 5,67 (±3,12) | 11,36 (±6,70) | 1 - 6 |
| Resistência Mecânica (Kgf. cm ⁻²) | 11,00 (±0,89) | 2,88 (±0,08) | 10-80 |

O processamento de briquetes a partir do CaO foi bem sucedido. Inicialmente, a cal virgem absorveu água e se transformou em cal hidratada adquirindo propriedades aglutinantes. A cura ocorreu com a absorção do CO₂ atmosférico. Visualmente, os briquetes produzidos com o ligante cal virgem (CaO) revelaram boa uniformidade e compactação. Durante

esse processamento, ocorreu a conversão do hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, e do dióxido de carbono (CO₂), absorvido em carbonato de cálcio (CaCO₃), conferindo maior dureza ao produto final.

Na **Tabela 1** observa-se alto teor de cinzas para os briquetes de cal virgem, possivelmente provocado pela calcinação do CaCO₃. Outro fator observado foi a elevação no teor de água, devido o endurecimento inicial que ocorreu por hidratação, influenciando significativamente na redução da resistência mecânica destes briquetes. Quanto maior for o teor de umidade na composição do briquete menor será o seu poder calorífico, bem como sua resistência ao impacto e maior será o teor de cinzas (RODRIGUES, 2010; OSHIRO, 2016).

Como o processo de fabricação de briquetes envolve resíduos de biomassa, um parâmetro de controle de qualidade a ser considerado é o teor de umidade. De acordo com Quirino (1991), Lucena *et al.* (2008) e Oshiro (2016), o teor de umidade ideal na compactação energética está na faixa de 10 a 12% de água. Os resultados obtidos para o teor de umidade revelaram 5,67% de água para briquetes com fécula de mandioca e 11,35% de água para briquetes com cal virgem. A umidade dos briquetes de fécula de mandioca foi inferior aos resultados encontrados por Brugnera (2016) em seu estudo da produção de briquetes com resíduos da indústria de carvão, com aglutinante misto de glicerina bruta e amido de milho, que obteve umidade na faixa de 7,22 a 8,23%. O valor médio de umidade revelado para os briquetes contendo cal virgem (11,36% H₂O) foi superior aos encontrados por Brugnera (2016). O teor de umidade elevado contribui significativamente para a geração de finos, maior consumo de briquetes e qualidade baixa do ferro-gusa formado (FROEHLICH e MOURA, 2014).

De acordo com Brugnera (2016), o carvão vegetal deve apresentar valores médios de composição imediata de 25% de materiais voláteis, 5% de cinzas e 70% de carbono fixo, com poder calorífico em torno de 7.000 Kcal Kg⁻¹. Na **Tabela 1** observa-se

que os briquetes contendo fécula de mandioca apresentaram teor de materiais voláteis (26,65%) praticamente iguais, teor de carbono fixo menor, baixo teor de cinzas (2,55%) e maior poder calorífico (7.910 Kcal Kg⁻¹), quando comparado com os valores médios especificados por Brugnera (2016). Por outro lado, os briquetes obtidos a partir da cal virgem apresentaram teores de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico menor (5.010,45 Kcal Kg⁻¹) e teor de cinzas 28,79% muito maior que os especificado por Brugnera (2016).

Os dados das análises obtidas para o poder calorífico dos briquetes fabricados com fécula de mandioca (7910 Kcal. Kg⁻¹) e com cal virgem (5.010 Kcal.Kg⁻¹) foram satisfatórios e mais elevados em relação à média para combustíveis sólidos (briquetes) de origem vegetal, conforme especificou Cortez, Lora e Gomes (2008) que é de 3.749,8 Kcal Kg⁻¹.

O teor de cinzas obtido para os briquetes contendo cal virgem (28,79%) foram considerados bastante elevados para uso industrial, cuja especificação média é de 2% de cinzas. Já para os briquetes obtidos com fécula de mandioca foram encontrados valores médios em torno de 2,55%. O aumento no teor de cinzas contribui para a ocorrência de álcalis, que desgastam sobremaneira os tijolos refratários do alto-forno e encarecimento do processo produtivo de ferro-gusa. O teor de inorgânicos, quantificados como cinzas, representa a fração incombustível e sua presença deve ser pequena e pouco significativa, pois contribui para a diminuição do teor calórico do briquete (BRUGNERA, 2016).

A geração de finos reduz significativamente a resistência mecânica dos briquetes e sua permeabilidade. A elevação no teor de finos causa obstrução da zona de combustão do alto-forno, especificamente nas ventaneiras que fornecem ar quente para a combustão e enorme prejuízo ao processo produtivo de ferro-gusa (PICANCIO *et al.* 2018).

O setor siderúrgico requer um carvão vegetal contendo pequena quantidade de finos (16% em

média). Tais materiais, ao atingirem o cadinho do alto-forno (zona onde ocorre o acúmulo de metal fundido e resíduos denominados de escória), entram a passagem do ferro e das escórias líquidas, provocando aumento na frequência das corridas e variações na composição química e temperatura do ferro-gusa. O acúmulo de finos nas ventaneiras do alto-forno acarreta mudança na zona de coesão e na permeabilidade do alto-forno aumentando as perdas térmicas devido às dificuldades na remoção das escórias e do ferro-gusa (FROELICH e MOURA, 2014; PICANCIO *et al.* 2018).

O teor de carbono fixo observado para briquetes contendo fécula de mandioca (65,34%) e para briquetes contendo cal virgem (49,51%) estão abaixo da média considerada ideal para o setor siderúrgico que é de 74% conforme descreveram Brito (2002) e Rosa *et al.* (2012). Entretanto, tais briquetes podem ser empregados para queima direta em fogões a lenha, fornalhas de caldeiras, fornos cerâmicos, pizzarias, padarias, churrasqueiras e fornalhas de alambique.

Em termos de resistência à compressão, que mede a capacidade dos briquetes suportarem cargas altas durante o seu uso, a **Tabela 1** mostra que os corpos de prova com fécula de mandioca apresentaram resistência mecânica (11,00 Kgf.cm⁻²) dentro da faixa ideal para o setor de siderurgia(10-80 Kgf.cm⁻²), caso contrário do briquetes produzidos com cal virgem (2,88 Kgf.cm⁻²). A **Figura 2** mostra os dados do teste de compressão de alguns briquetes analisados.

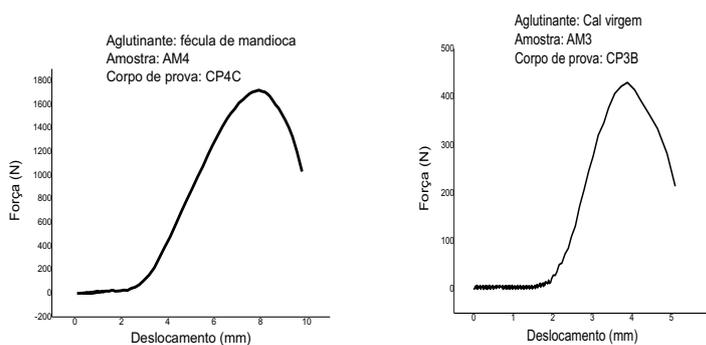


Figura 2 - Curvas de resistência mecânica dos briquetes produzidos com fécula de mandioca e cal virgem.

Os valores de deformação máxima entre os briquetes produzidos com fécula de mandioca e cal Os briquetes produzidos tanto com fécula de mandioca apresentaram boa resistência mecânica (11,00 Kgf. cm⁻²), portanto, podem ser recomendados para o setor siderúrgico (10-80 Kgf.cm⁻²) visando a produção e não entupirão as ventaneiras e facilitarão o processo de combustão. Por outro lado, o processo de fabricação dos briquetes de cal virgem precisa ser melhorado, como por exemplo, incorporando fibras de cana-de-açúcar com o intuito de aumentar sua resistência a grandes impactos e óleo de copaíba para elevar seu poder calorífico.

CONCLUSÃO

A partir da análise imediata (teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico), do teor de umidade e da resistência mecânica realizadas nos briquetes produzidos com o aglutinante cal virgem, foi possível verificar que estes insumos energéticos apresentaram propriedades que permitem sua aplicação em diversos setores da economia como na queima de fornalhas de caldeiras, fornos cerâmicos, pizzarias, padarias, churrasarias e setor doméstico. Para a aplicação na siderurgia precisam de reforço para aumentar sua resistência mecânica, aumentar o teor de materiais voláteis, diminuir o teor de umidade e de cinzas..

No decorrer do processamento dos briquetes com cal virgem ocorreu a conversão do Ca(OH)₂ e CO₂ em carbonato de cálcio (CaCO₃), conferindo maior dureza ao produto final. Observou-se alto teor de cinzas para estes briquetes, possivelmente provocado pela calcinação do CaCO₃ e elevação no teor de água, influenciando significativamente na redução da resistência mecânica destes briquetes. virgem revelaram aspectos visuais análogos. Tais resultados levam-nos a crer que os espaços intersticiais (porosidade) entre os corpos de prova (briquetes) produzidos são semelhantes, apesar de terem sofrido deslocamento parecido após atingirem a capacidade

máxima de compactação. Os briquetes estudados revelaram-se menos resistentes (11,0 e 2,88 Kgf.cm⁻² em média) em relação aos briquetes fabricados por Concentino, Zanella e Taranto (2017), quando utilizaram pectina, com alto teor de metoxilação na produção de briquetes, a partir de carvão obtido pela pirólise do bagaço de laranja (18,15 – 34,23 Kgf. cm⁻²).

Os parâmetros de qualidade para a produção de carvão vegetal destinado à siderurgia devem atender a um conjunto de especificações conforme descrito na norma PQM3-03 da Secretaria de Agricultura e Abastecimento de Estado de São Paulo (SAA), Resolução SAA n. 10, de 11 de julho de 2003 (SÃO PAULO, 2003) e a Empresa de Pesquisa Energética (2008). Neste contexto, as características essenciais do carvão vegetal para atender às especificações das indústrias metalsiderúrgicas são (vê faixa ideal na **Tabela 1**): 0,5 a 4% de teor de cinzas, 25 a 35% de materiais voláteis, 70 a 80% de carbono fixo, 1 a 6% de umidade, além de resistência mecânica entre 10 a 80 Kgf. cm⁻².

Os resultados obtidos durante a caracterização dos briquetes (**Tabela 1**) revelaram que os briquetes produzidos com a aglutinante fécula de mandioca apresentaram melhores propriedades, quando comparados com os produzidos com cal virgem e com a faixa ideal para uso na siderurgia. Tais briquetes apresentaram resultados bons, exceto o teor de carbono fixo (65,34%) que ficou um pouco abaixo do limite inferior ideal (70-80%). Os briquetes fabricados com cal virgem podem ser empregados para queima direta em fogões a lenha, fornalhas de caldeiras, fornos cerâmicos, pizzarias, padarias, churrasarias e fornalhas de alambique.

Os briquetes processados com fécula de mandioca apresentaram propriedades mecânicas e energéticas boas, o que nos permite inferir a sua viabilidade na obtenção de energia renovável a partir desse insumo e reais possibilidades de empreendedorismo no processamento de conversão termoquímica, uma vez que a briquetagem produz um combustível renovável, permite o aproveitamento

de resíduos de biomassa e tende a promover o desenvolvimento socioeconômico, a redução dos impactos ambientais e a geração de emprego e renda.

A resistência mecânica e os resultados físico-químicos revelados para os briquetes produzidos com fécula de mandioca nos permite inferir que podem ser aplicados na produção de ferro-gusa, aço e ferros-ligas.

REFERÊNCIAS

ADAD, M. T. **Controle Químico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982, 204p.

BRITO, J. O. A escolha certa do carvão. **Revista Churrasco e Churrascarias**, v. 5, n. 24, p. 16, 2002.

BRUGNERA, A. B. **Estudo da produção de briquetes com resíduos da indústria de carvão com aglutinantes**. 2016, 60f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Centro-Oeste, Guarapuava PR, 2016.

CARNEIRO, A. C. O *et al.* Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-Açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Os Editores, 2013. p. 429-457.

CONCENTINO, V. O. ; ZANELLA, K. ; TARANTO, O. P. Avaliação do tipo de aglutinante na resistência à compressão do carvão vegetal obtido pela pirólise do bagaço de laranja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2017, São Carlos (SP). **Anais..** São Carlos, SP, UFSCar. 2017.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMES, E. O. **Biomassa para energia**. 1ª ed. Campinas: Editora Unicamp, 15-55p, 2008.

DONATO, D. B. *et al.* Propriedades de briquetes obtidos de finos de carvão vegetal. **Brazilian Journal of Wood Science**, v.6, n.2, p.107-111, 2015.

FERNANDEZ, B. O. *et al.* Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. **Rev. Virtual Quim.**, v.9, n. 1, p. 29-38, 2017.

FONTE, J. P.; QUIRINO, W. F.; PASTORE JÚNIOR. F. **Agglutinantes para briquetagem de carvão vegetal**. Brasília: DPQ/IBDF, 2010. Disponível em: www.wikpedia.org.br . Acesso em 15 de jan. 2010.

FROELICH, P. L.; MOURA, A. B. D. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Tecnologia e Tendências**, vol.9, n.1, p 1-19, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da Extração e da Silvicultura (PEVS)**, Rio de Janeiro; IBGE, 2016. Disponível em: www.biblioteca.ibge.gov.br . Acesso em 30 mar. 2019.

JESUS, M. S. Atuais desafios da produção de carvão vegetal no Brasil. **Blog do Mata Nativa**. 2 maio 2019 Disponível em: www.matanativa.com.br/blog/. Acesso em 17 de mai. de 2020.

KALIYAN, K.; MOREY, R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, v3, n.3, p. 337-259, 2009.

LIMA, A. S.; SANTOS, K. P. P.; CASTRO, A. A. S. F. Aspectos socioambientais da produção de carvão vegetal de origem nativa em uma área de cerrado em Jerumenha, Piauí, Brasil. **Revista Espácios**, vol. 37, n.3, p.18-29, 2016.

LUCENA, D. A. *et al.* Aglomeração de moinha de carvão vegetal e sua possível aplicação em alto-forno e geração de energia. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, v4, n.4, p.1-6, 2008.

MARQUES, R. F. P. V. et al. **Impactos da disposição de resíduos sólidos urbanos na qualidade da água superficial em três municípios de Minas Gerais**. *Ciênc. agrotec.* [online]. vol. 36, n.6, pp.684-692. 2012.

MARTINS, M. P. *et al.* Produção e avaliação de finos de carvão vegetal compactados com resíduo celulósico proveniente de industrial de papel e celulose. **Revista Árvore**, vol. 40, n.1, p.173-180, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (BRASIL). **Balanco Energético Nacional 2008**:ano base 2007. Rio de Janeiro. EPE, 2008. 244p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energético-Nacional->

2008. Acesso em: 16 mar. 2020.

OLIVEIRA, A. F. et al. Análise de qualidade do carvão para consumo doméstico de quatro municípios do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, vol. 4, p.102-111, 2015.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016, 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Paraná, Londrina, 2016.

PAULA, L. E. R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 2010, 72f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

PICANCIO, A. C. S. et al. Controle do processo de produção de carvão vegetal para a siderurgia. **CAD**, vol 12, n.1, p.15-20, 2018.

PINHEIRO, G.F. et al. Características energéticas de biomassas amazônicas.in: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 6., 2006 , Campinas. Anais [...]. Campinas, SP, [s. n], 2006.

PINHEIRO, P. C. C. **Guia de prática de análise imediata de combustíveis sólidos**. Belo Horizonte: [s. n], 2000. Disponível em: www.demec.ufmg.br . Acesso em: 11 mar.2020.

QUIRINO, W. F. J, O. B. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: LPF/IBAMA, 1991. (série técnica, 13). Disponível em: www.mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf . Acesso em 15 jul. 2019.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010, 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

ROSA, R. A. et al. Qualidade do carvão vegetal para uso doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 3, n. 2, p. 41-48, 2012.

SÃO PAULO. (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, 2003. v. 113 (129). Disponível em: <http://www.codeagro.sp.gov.br/arquivos/selo/saa.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2020.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**. São Paulo, vol. 14, n.. 2, pp. 67-85, 2008.

VIEIRA, J. S. C. **Síntese de catalisadores heterogêneos ácidos e básicos para a produção de biodiesel**. 2017, 144f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.