



## USO de bentonita como aglutinante para a fabricação de briquetes com finos de carvão vegetal

Luciano Robetti  
Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin<sup>1</sup>

**Resumo:** O carvão vegetal tem como principal impacto ambiental o desmatamento e a fumaça como agente poluidor. A fumaça é rica em compostos químicos voláteis, alguns deles cancerígenos. Entre os poluentes, podem-se destacar o alcatrão, a acetona e o metano, um dos gases responsáveis pelo aquecimento global, e a geração de moinha que é um passivo ambiental. Neste trabalho, uma mistura de componentes ligantes composta de bentonita e amido de milho foi empregada no percentual de 5% em massa a finos de carvão vegetal para a obtenção de briquetes por extrusão. Com o desenvolvimento desse trabalho, espera-se recuperar este resíduo, dando máxima utilização do carvão vegetal produzido, além de minimizar a utilização de carvão mineral, muito nocivo ao meio ambiente, aumentar a oferta de carvão vegetal, reduzindo o desmatamento e a poluição feita pelas carvoarias.

**Palavras-chave:** briquetes, extrusão, resíduo, bentonita, carvão.

### 1. Introdução

Em um país com as características de crescimento demográfico e desenvolvimento industrial como o Brasil, onde os investimentos para produção de energia não acompanharam a evolução da demanda, a discussão sobre opções de geração adicional de energia é de grande importância. Do mesmo modo, devido à dimensão e às grandes distâncias internas do país, o aspecto da concentração de energia, que visa viabilizar o seu transporte, torna-se relevante (LUCENA *et al.*, 2008).

A briquetagem é uma forma muito eficiente para concentrar a energia disponível na biomassa. Exemplifica-se este fato na consideração de que 1 m<sup>3</sup> de briquetes contém pelo menos cinco vezes mais energia do que 1 m<sup>3</sup> de resíduos (finos de carvão vegetal não briquetado), levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico superior destes materiais (LUCENA *et al.*, 2008).

---

<sup>1</sup> professor orientador

A briquetagem consiste na aplicação de uma pressão em uma massa de partículas, com ou sem ligante ou tratamento térmico (LUCENA *et al.*,2008). No carvão vegetal, usa-se um ligante de qualquer natureza, pois essa é a maneira mais econômica de compactá-lo.

O carvão vegetal é produzido a partir da lenha pelo processo de carbonização ou pirólise, tendo como principal derivado o eucalipto. Ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, o uso industrial do carvão vegetal no Brasil continua sendo largamente praticado. As usinas tendem atualmente a utilizar o coque de carvão mineral, levando o carvão vegetal a ficar confinado ao mercado de produtores independentes de ferro-gusa, à produção de ferro-liga nas regiões onde existem ainda reservas de florestas plantadas ou de matas nativas exploráveis sob o regime de manejo e complementação da sucata nos fornos elétricos a arco (ANTUNES, 1982).

Durante a sua produção e transporte, há uma grande geração de finos que de acordo com a empresa Euro Chacoal chega a 25% da produção, distribuídos na seguinte forma: 3,7% nas carvoarias, 5,8% no carregamento e transporte, 6,3% na armazenagem e 9,4% no peneiramento. Esses finos são vendidos para indústrias cimenteiras, pois não pode ser consumido pelas usinas produtoras de ferro-gusa por estar na forma de pó. O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, produzindo anualmente 10 milhões de toneladas, sendo seu consumo distribuído em 78% para a produção de ferro-gusa, 9% para o consumo doméstico e 13% para as indústrias cimenteiras.

Existem vários trabalhos para briquetar a moinha do carvão vegetal utilizando os mais diversos tipos de ligantes (FONTES *et al.*, 1989). O centro de pesquisas da USIMINAS fez trabalhos com a dextrina de milho, piche e emulsão asfáltica e também obteve bons resultados, mas os estudos foram interrompidos nos anos 1970, devido às dificuldades econômicas do país (FONTES *et al.*, 1989).

As empresas BELGO MINEIRA e FURUNU fizeram testes em escala laboratorial e planta piloto. Foram usados como aglomerantes o alcatrão vegetal, obtido na carbonização da madeira de eucalipto sem tratamento especial, e um alcatrão parcialmente destilado chamado de BOP (Breu e Óleos Pesados), melão de cana e amido de milho (FONTES *et al.*, 1989). Segundo seus estudos, a utilização do

alcatrão vegetal e o BOP oferecem várias vantagens técnicas, mas para isso é necessário que o alcatrão vegetal e o BOP sejam tratados, gerando custos adicionais.

O melaço de cana apresentou os melhores resultados técnicos, mas apresentava-se muito higroscópico, tendo que aumentar em 30% a quantidade de melaço de cana (FONTES *et al.*, 1989). Uma saída seria um tratamento térmico do aglomerante para reduzir a sua adição na formulação e diminuir a higroscopicidade do briquete, o que acabou inviabilizando economicamente a sua utilização.

O amido industrial de milho é o aglutinante mais utilizado, sofrendo tratamento de ativação para não perder suas propriedades físico-químicas (FONTES *et al.*, 1989). A adição de amido no briquete é normalmente entre 5 e 12 % em massa.

Por outro lado, a bentonita é uma argila composta predominantemente pelo argilomineral montmorilonita (55-70%), do grupo das esmectitas. Devido a sua alta plasticidade, ela pode ser utilizada como aglomerante na fabricação de briquetes de carvão vegetal, em areias de fundição, na pelotização de minério de ferro, na perfuração de poços de petróleo e na indústria cerâmica como plastificante (OLIVEIRA, 2005).

Assim, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a utilização de bentonita na fabricação de briquetes com finos de carvão vegetal para redução dos impactos ambientais provocados pelo desmatamento e armazenamentos de resíduos provenientes do carvão vegetal.

## **2. Materiais e Métodos**

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais:

a) moinha de carvão vegetal vinda do Estado do Rio Grande do Sul com poder calorífico de 4.259 kcal/kg, teor de cinzas de 39,7%, teor de voláteis de 22,0% e teor de carbono fixo de 38,3%;

b) bentonita sódica ativada vinda da empresa Soleminas (Paraíba) contendo 11% de umidade, índice de plasticidade de 36,6% e análise química conforme dados do fornecedor (Tabela 1):

Tabela 1. Análise química da bentonita sódica e da argila ARSM

Elemento (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF
Bentonita	16,8	2,7	6,6	0,7	1,9	<0,1	1,6	0,1	60,7	0,8	8,2
Argila ARSM	27,3	5,0	0,7	1,3	1,3	<0,1	2,6	<0,1	54,5	0,1	7,2

Fonte: Dados dos fornecedores, 2012.

c) amido de milho (Polissacarídeo orgânico ativado) da empresa Inquil (Treze de Maio/SC) com umidade de 1%, densidade aparente solta de 0,4 g.cm<sup>3</sup> e índice de viscosidade de 2.500 cPs;

d) argila ARSM da empresa Nutriclay (Morro da Fumaça, SC), com índice de plasticidade de 16,1 %, 8 % de umidade e análise química conforme dados da empresa (Tabela 1).

Além disso, foi utilizado um carvão vegetal bruto feito a partir da madeira de eucalipto com teor de cinzas de 20,9 %, teor de voláteis de 20,3 %, carbono fixo de 58,9 % e poder calorífico de 5.505 kcal/kg utilizado como parâmetro para a avaliação dos resultados.

Primeiramente, as amostras de moinha de carvão foram coletadas de uma pilha de armazenamento em seis pontos distintos e dispostas sobre uma lona para que fossem homogeneizadas. Após esta etapa, a moinha foi submetida a sucessivas etapas de quarteamento para obter um material mais homogêneo possível.

A moinha foi fragmentada em moinho rápido (5 min) e separada em três frações: retida em peneira com malha 20 mesh, retida em peneira com malha 48 mesh e finos. Cada fração foi armazenada em sacos plásticos para ser utilizada na fabricação dos briquetes.

Para realizar os ensaios, foi preparada uma mistura contendo, em massa, 35% do pó retido na malha 20 mesh, 35% do material retido na malha 48 mesh e 30% de finos, formando uma amostra com distribuição mais homogênea, melhorando sua mistura com o ligante e seu comportamento reológico no processo de extrusão. A

preparação do ligante iniciou com o desenvolvimento de quatro formulações, conforme Tabela 2. O amido de milho foi empregado como ligante, a bentonita como plastificante e a argila como carga, baixando o custo do ligante.

Tabela 2. Formulações dos ligantes (% em massa)

Matéria-prima	F1	F2	F3	F4
Bentonita	70	70	60	50
Amido de milho	10	20	40	50
Argila ARSM	20	10	0	0
Total	100	100	100	100

Fonte: Autor, 2012.

Em laboratório, os componentes do ligante foram pesados utilizando uma balança, sendo em seguida colocados em um recipiente para serem misturados com a utilização de uma espátula.

A etapa de homogeneização é a mais importante do processo, onde é fundamental que o material aglutinante fique distribuído uniformemente em toda a amostra para que não altere os resultados. A mistura da moinha de carvão vegetal com o ligante foi feita manualmente com o auxílio de uma espátula. Cada formulação (Tabela 3) foi obtida misturando-se o ligante (5 e 7,5% em massa) a seco com a moinha de carvão vegetal (57,5 e 60% em massa), adicionando-se em seguida 35% em massa de água (acima desse percentual, o material ficaria com excesso de água, dificultando a secagem).

O percentual de ligante a ser adicionado depende da finalidade para a qual o briquete é empregado. Neste trabalho, a finalidade dos briquetes é para uso doméstico, estufas ou pequenas fornálias como por exemplo de aviários, por isso foi utilizada como referência de 5 a 8% em massa, conforme testes feitos por Fontes (1989) com amido de milho puro. O material foi misturado com uma espátula até ficar bem homogêneo.

Tabela 3. Formulações dos briquetes (% em massa)

Material	T 1/1	T 1/2	T 2/1	T 2/2	T 3/1	T 3/2	T 4/1	T 4/2
Código do ligante	F1	F1	F2	F2	F3	F3	F4	F4
Moinha de carvão vegetal	60	57,5	60	57,5	60	57,5	60	57,5
Ligante	5	7,5	5	7,5	5	7,5	5	7,5
Água	35	35	35	35	35	35	35	35
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Autor, 2012.

Após a homogeneização, as amostras foram processadas em uma extrusora a vácuo Netzsch. O vácuo empregado neste processo de conformação é especialmente importante para remover os grandes volumes de ar na unidade de alimentação da extrusora, evitando-se que o briquete seja fraturado após o relaxamento da pressão. A pressão utilizada foi de 85 kgf/cm<sup>2</sup>, com abertura na saída de 40 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento. Após extrusão, os briquetes foram mantidos em temperatura ambiente durante três dias para que secassem de forma lenta, não gerando trincas.

A seguir, cada formulação de briquete foi avaliada visualmente para se detectar a presença de trincas aparentes. As formulações que apresentaram melhor resultado foram ensaiadas quanto à resistência à compressão em uma máquina de ensaios mecânicos universal EMIC com capacidade de 20 kN (velocidade de 10 mm/min) e quanto a propriedades físico-químicas. Os ensaios físico-químicos foram realizados de acordo com as normas NBR. Para analisar o teor de cinzas, foi realizada a queima de 1,0 grama de carvão, por 1 hora a 800°C, em mufla, conforme NBR 8289. A matéria volátil foi determinada pela queima de 1,0 grama de amostra, por 5 minutos a 950°C, em mufla, seguindo a norma NBR 8290. Para umidade higroscópica, foi utilizada a técnica gravimétrica, onde o carvão é submetido à temperatura de 110°C até atingir massa constante, conforme NBR 8293. A determinação do carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil, cinzas e 100%, conforme NBR 8112 e para determinação do poder calorífico foi utilizado um calorímetro modelo LECO AC seguindo a NBR 8633.

### 3. Resultados e Discussões

Primeiramente, foi realizada a avaliação visual dos briquetes produzidos, tentando-se identificar a presença de trincas aparentes. Durante o processo de extrusão, as formulações T1/1, T1/2, T2/1 e T2/2, com utilização dos ligantes F1 e F2, apresentaram dificuldade de extrusão devido à baixa plasticidade do material. As formulações T1/1 e T1/2 não apresentaram plasticidade durante a extrusão e bloquearam a saída da extrusora, sendo adicionados 20% a mais de água para que apresentassem a fluidez necessária para passar pela matriz. A adição de água resultou em briquetes com muita umidade, havendo dificuldade na sua secagem, resultando em deformações nos briquetes. Após secos, os corpos de prova apresentaram trincas (Figura 1) e eram muito frágeis e quebradiços.

As formulações T2/1 e T2/2 apresentaram os mesmos problemas que as formulações T1/1 e T1/2, porém tiveram um escoamento melhor após serem acrescentados 12% de água, quantidade menor em relação ao primeiro grupo. As formulações foram passadas duas vezes na extrusora, saindo quebradiças na primeira passagem e com forma cilíndrica na segunda passagem. Porém, após a sua secagem, apresentaram trincas (Figura 1) e estavam pouco resistentes.

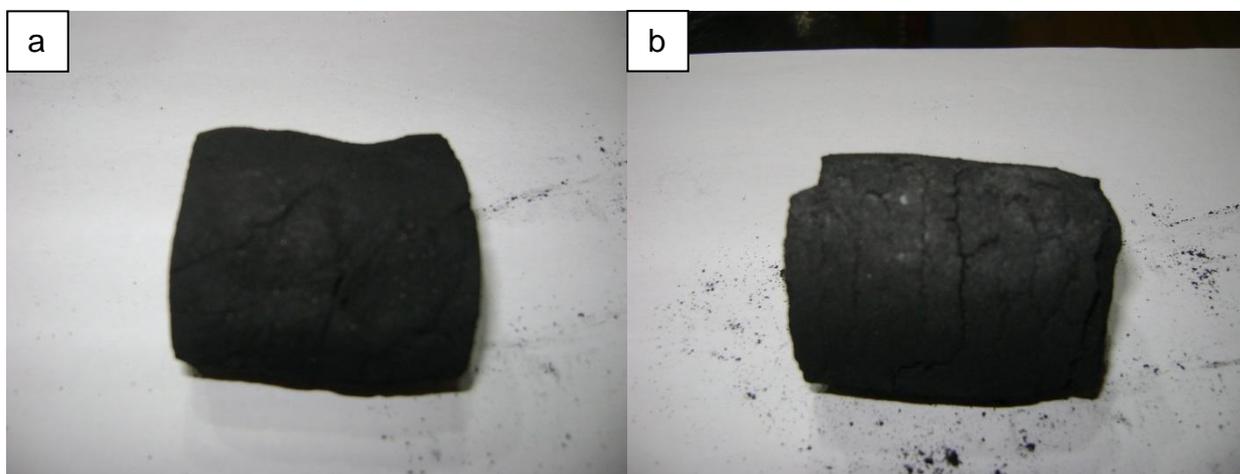


Figura 1. (a) Trincas geradas após a secagem da formulação T1/2; (b) trincas geradas após a secagem na Formulação T2/2 (Fonte: Autor,2012).

Nas formulações T3/1, T3/2, T4/1 e T4/2 foram utilizados os ligantes F3 e F4, sendo retirada toda a argila das suas composições, acrescentando-se um percentual maior de amido de milho para torná-las mais plásticas e para que os respectivos briquetes tivessem maior resistência à compressão (Tabela 4). Para os ensaios de

compressão, os briquetes foram analisados visualmente, sendo descartadas as amostras com trincas. As amostras selecionadas para o ensaio de compressão foram T3/1, T3/2, T4/1 e T4/2, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos testes de compressão dos briquetes.

Amostra	Bentonita (%)	Ligante (%)	Força de ruptura (kgf)	Resistência à compressão axial (kgf.cm <sup>-2</sup> )
T3/1	60	5	90,1	5,7
T3/2	60	7,5	125,1	6,4
T4/1	50	5	159,9	12,5
T4/2	50	7,5	96,5	13,6

Fonte: Autor, 2012.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4 foi calculada a análise de variância para a força de ruptura dos briquetes, Tabela 5. Para a análise do fator mais influente sobre a força de ruptura (teor de bentonita ou teor de ligantes utilizados), inicialmente deve-se verificar o fator F (de Fisher), que indica qual a maior fonte de variabilidade, ou seja, qual modelo é o mais significativo para todos os ensaios realizados nesse trabalho. O  $F_{\text{experimental}}$  deve ser maior que o  $F_{\text{tabelado}}$  para que a hipótese ( $H_0$ ) da variabilidade do fator seja verdadeira, ou seja, maior será a significância para o modelo testado.

A análise de variância da força de ruptura em função do percentual de bentonita e de ligante mostra que não há significância estatística para esta propriedade, Tabela 5, pois o  $F_{\text{experimental}}$  é menor que o  $F_{\text{tabelado}}$ , resultando em baixa significância estatística (dada pelo teste p) para os resultados. Desta forma, a força de ruptura não pode ser avaliada neste trabalho.

Tabela 5. Análise de variância para a força de ruptura

Fator	SQ	gL	MQ	F	P
Bentonita (%)	424,360	1	424,360	0,175309	0,747566
Ligante (%)	201,640	1	201,640	0,083300	0,821121
Erro	2420,640	1	2420,640		
SQ total	3046,640	3			

Onde: SQ são as somas quadráticas; gL os graus de liberdade (diferença entre o número total de experimentos e o número de experimentos independentes); MQ as médias quadráticas; F e p são os testes de confiabilidade.

Fonte: Autor, 2012.

Para a resistência à compressão axial dos briquetes a análise de variância, Tabela 6, mostra que o fator estatisticamente mais significativo, dado pelo teste F, é o teor de bentonita, com quase 100% de confiabilidade dos resultados, dada pelo teste p. o teor de ligante tem menor significância estatística, pois apresentou um valor para o teste  $F_{\text{experimental}}$  inferior ao valor tabelado para um nível de significância de 95%. A partir dos dados da análise de variância, os resultados para a resistência à compressão foram representados graficamente como médias em função do efeito do teor de bentonita, Figura 2.

Tabela 6. Análise de variância para a resistência à compressão

Fator	SQ	gL	MQ	F	P
Bentonita (%)	49,00000	1	49,00000	1225,000	0,018184
Ligante (%)	0,81000	1	0,81000	20,250	0,139209
Erro	0,04000	1	0,04000		
SQ total	49,85000	3			

Onde: SQ são as somas quadráticas; gL os graus de liberdade (diferença entre o número total de experimentos e o número de experimentos independentes); MQ as médias quadráticas; F e p são os testes de confiabilidade.

Fonte: Autor, 2012.

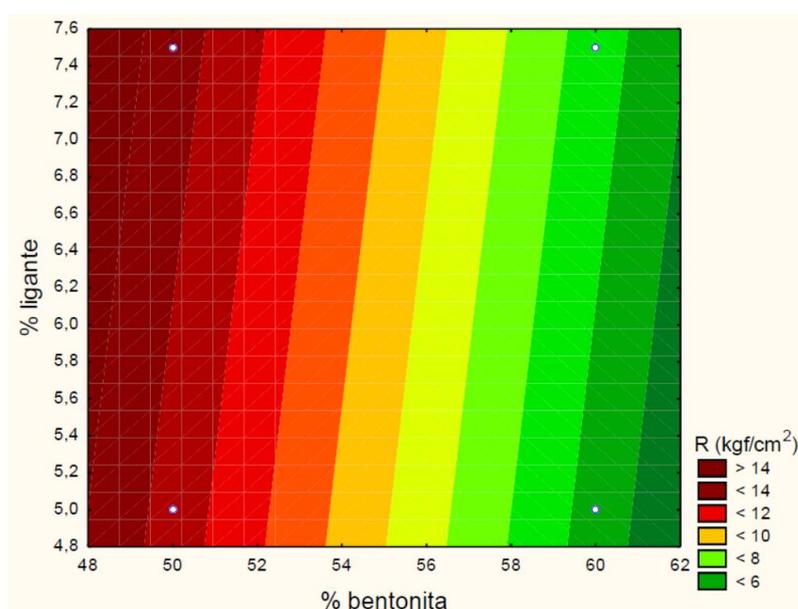


Figura 2. Curva de nível para a resistência à compressão axial (Fonte: Autor, 2012).

A maior resistência à compressão dos briquetes ocorre para a combinação de menor teor de bentonita (50%) e maior teor do ligante (7,5%), ou seja, para a formulação

T4/2. O parâmetro de referência para avaliação da resistência à compressão foi o valor obtido para um carvão vegetal de eucalipto carbonizado a 600°C (1,75 kg.cm<sup>-2</sup>), conforme PINHEIRO *et al.* (1998). Os ensaios de resistência à compressão não são tão importantes neste momento, pois como a finalidade do briquete é para uso doméstico, não há a necessidade de uma resistência muito alta, sendo satisfatórios os resultados apresentados na Tabela 4. Caso a aplicação fosse para uso industrial, esse valor deveria ser igual ou superior a 70 kgf/cm<sup>2</sup> (MOTTER, 1979). Ambas as formulações fluíram bem, sendo extrudadas com mais facilidade e sem trincas (Figura 3) em ambos os percentuais.



Figura 3. Formulações T3/2 e T4/2 após secagem (Fonte: Autor, 2012).

Após a avaliação física, foram selecionadas as amostras T4/1 e T4/2, com melhores resultados no teste de compressão, para analisar e observar se os teores de cinzas, carbono fixo, umidade e materiais voláteis estavam próximos ao do carvão vegetal bruto, Tabela 7. Os ensaios físico-químicos foram realizados no laboratório de análises e ensaios de carvão – LAEC da Satc, localizada em Criciúma SC.

Tabela 7. Ensaio físico-químico dos briquetes

	Carvão vegetal bruto	T 4/1	T 4/2
Adição de ligante (%)	-	5,0	7,5
Umidade higroscópica (%)	3,2	4,4	4,7
Teor de cinzas (%)	20,9	14,2	15,3
Teor de voláteis (%)	20,3	20,0	20,0
Teor de carbono fixo (%)	58,9	64,7	65,8
Poder calorífico (kcal/kg)	5,505	6.133	6.242

Fonte: Autor, 2012.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 7, pode-se dizer que o comportamento das formulações T4/1 e T4/2 foram satisfatórios, apresentando características físico-químicas similares às do carvão vegetal bruto. Outro fato a ser observado, é o aumento do poder calorífico dos briquetes que podem ter ocorrido devido a outros resíduos que foram depositados junto ao fino do carvão vegetal, por este estar acomodado em aterros. Como a finalidade era avaliar a utilização de bentonita na fabricação de um ligante com menor custo, o preço do amido que é o mais utilizado para esse processo é de aproximadamente R\$ 7,00/kg, enquanto o ligante F4 apresentado neste trabalho custa em torno de R\$ 3,80/kg. Como as formulações selecionadas para o ensaio de compressão deram bons resultados, ambas podem ser utilizadas para a fabricação dos briquetes, entretanto a Formulação T4/1 apresentou o menor custo.

#### **4. Considerações Finais**

Um estudo para avaliar a possibilidade de emprego de bentonita na formulação de um ligante para a extrusão de briquetes de moinha de carvão vegetal foi realizado. Diferentes formulações contendo bentonita, amido de milho e uma argila foram preparadas e, após extrusão e secagem, analisadas visualmente para se detectar a presença de trincas e a resistência à compressão foi determinada. As formulações contendo 5,0 e 7,5% em massa de ligante, este contendo 50% em massa de bentonita e 50% em massa de amido de milho, apresentaram os melhores resultados. A resistência à compressão destas duas formulações ficou acima do valor necessário para o uso doméstico e em pequenas fornalhas como as de aviários, entretanto o menor custo da formulação com 5% de ligante recomenda o seu emprego.

#### **Referências**

ANTUNES, R.C. Briquetagem de carvão vegetal. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte. CETEC, Outubro, 1982.

FONTES, P.J.P. et al. **Aspectos técnicos da briquetagem do carvão vegetal no Brasil**. Laboratório de produtos florestais. Brasília, 1989. p. 2-13.

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

MOTTER, C. et al. **Aproveitamento de finos de carvão vegetal para produção de briquetes de uso siderúrgico**. 22º Congresso Anual da ABM. Vitória, ES, Julho, 1979.

OLIVEIRA, C.H., DA LUZ, A.B., **Bentonita**. CETEM Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro, novembro 2005. p.217-230.

PINHEIRO, P.C.C., SEYE, O., **Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de eucalyptus**. Anais do 53º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, MG, 1998. p. 2032 – 2042.