

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

LUIZ FELIPE FARIAS DE ANDRADE

RAFAEL PAULO BIGATON

**BRIQUETAGEM DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2016

LUIZ FELIPE FARIAS DE ANDRADE  
RAFAEL PAULO BIGATON

## **BRIQUETAGEM DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Orientadora: Profa. Dra. Leidy Zulys Leyva Rafull

Trabalho de Conclusão de Curso de  
graduação apresentado à Universidade  
Federal da Grande Dourados, para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Agrícola.

DOURADOS  
MATO GROSSO DO SUL  
2016

LUIZ FELIPE FARIAS DE ANDRADE  
RAFAEL PAULO BIGATON

## BRIQUETAGEM DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Agrícola na Universidade Federal da Grande  
Dourados, pela comissão formada por:

Dourados, 05 de outubro de 2016.

---

Profa. Dra. Leidy Zulys Leyva Rafull  
Orientadora - FCA/UFGD

---

Prof. Dr. Roberto Carlos Orlando  
FCA/UFGD

---

Prof. Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza  
FCA/UFGD

## **AGRADECIMENTOS – Luiz Felipe Farias de Andrade**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelas bênçãos concedidas e realizações em minha trajetória. Acredito que nos momentos mais difíceis somente ele nos dá a força e o amparo necessário para não desanimar.

Agradeço de forma incondicional aos meus pais, Lucimar Farias e Luiz Carlos Alves de Andrade, pessoas humildes, trabalhadoras que de forma sofrida me manteve na universidade me apoiando e não que nunca deixaram o foco ser perdido. Em especial ao meu pai, que me deixou para morar com Deus durante minha vida acadêmica, que hoje ele possa ver de onde ele estiver, aonde o seu filho pode chegar, e sem dúvidas esses esforços e essas vitórias devo a eles e é para eles.

Agradeço a todos colegas e amigos conquistados aqui, uns que já tomaram rumo em diferentes partes do Brasil e aqueles que ainda permanecem lado a lado.

Agradeço a todos professores que contribuíram para minha formação e que não mediram esforços para transmitir seus conhecimentos e experiências.

Agradeço especialmente a Professora Dra. Leidy Zulys Leyva Rafull, por sempre me auxiliar em todos os aspectos dentro da universidade. Nas horas de angústia foi uma verdadeira “mãe” para nós. Quero que saiba que levarei sempre guardada todas atitudes e colaborações por mim e meu colega.

Agradeço ao Professor Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza, pelos ensinamentos que irão, sem dúvidas, contribuir significativamente para minha vida profissional. Pela sua amizade e por apostar em nosso potencial, levando em consideração cada limitação de seus alunos.

## **AGRADECIMENTOS – Rafael Paulo Bigaton**

Agradeço primeiramente à Deus, por me dar forças para continuar sempre em frente, me guiar nos momentos de dificuldade e dar sabedoria nas escolhas impostas pela vida.

Aos meus pais, que sempre estiveram me apoiando e nunca me faltaram quando precisei, mesmo estando em outra cidade, se fizeram presentes com palavras, conselhos e compreensão. Graças à eles cheguei onde estou.

Aos meus irmãos, torceram por mim, e continuam torcendo e me apoiando, são eles com quem posso conversar e desabafar todos os meus problemas, e sei que neles posso sempre confiar e contar.

À Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), e aos professores de diversas áreas com quem tive o prazer de conviver e aprender, todos deixaram algo para se guardar por toda a vida.

À minha orientadora, Professora Dra. Leidy Zulys Leyva Rafull, por acreditar em mim e me trazer de volta ao curso, por um momento que pensava em desistir, não me deixando perder o foco nesta jornada, e também pela confiança depositada. E claro, pela oportunidade de poder desenvolver este trabalho. Também ao Professor Dr. Cristiano Márcio Alves de Souza, sempre ajudando de forma muito bem humorada e respeitosa, mostrando os problemas e me guiando para melhor resolvê-los.

E a todos os meus amigos e pessoas que passaram pela minha vida deixando um pouco de si.

Deixo aqui registrada a minha gratidão a todos vocês, obrigado.

## **BIOGRAFIA DOS AUTORES**

Luiz Felipe Farias de Andrade, nascido em Naviraí/MS, filho de Lucimar Farias e de Luiz Carlos Alves de Andrade. Viveu sua infância em uma fazenda que sua principal atividade era a pecuária, na área de reprodução animal, cria e cria. Aos seus 13 anos passou a morar na cidade sem deixar de lado aquele lado da fazenda já adquirido e diferente dos demais. No ensino médio teve a oportunidade de já ir se identificando com algo que seria talvez sua profissão, a Engenharia. Prestou o vestibular para quatro grandes faculdades estaduais e federais e obteve sucesso em ambas na área agrônômica, porém, engenharia civil era seu objetivo e não conseguia passar nas federais e estaduais do estado. De certa forma teve a curiosidade de tentar fazer a engenharia agrícola, logo passou no vestibular e ingressou na universidade. Hoje é orgulhoso da profissão que teve o prazer de escolher. Está se encaminhando para o fim de uma caminhada estudantil, e se preparando para o início de uma jornada como engenheiro agrícola, formado na Universidade Federal da Grande Dourados.

Rafael Paulo Bigaton, nascido em Dourados/MS, filho de Dirceu Paulo Bigaton e Adriana Regina Bueno. Embora nascido em Dourados, apenas residiu na cidade durante a graduação. Na infância, por dois anos morou na fazenda de seus pais. Passado esse tempo se mudaram para cidade de Campo Grande/MS, onde passou a maior parte de sua vida, de coração o mesmo diz que é campo grandense. Ao término do ensino médio prestou o temido vestibular, e foi aprovado no curso de Administração, na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), na cidade de Curitiba-PR, mesmo gostando do curso, e também da cidade, percebeu que faltava algo, e na busca por este algo, percebeu que lhe faltava a velha simplicidade do campo, então resolveu voltar, e novamente prestou vestibular, assim, chegou na UFGD, onde está a finalizar esta jornada para me tornar engenheiro agrícola, com orgulho, esperança, fé e muita vontade de vencer e ser um ótimo profissional.

## SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	VI
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
3.1 Principais fontes de energia exploradas no mundo.....	3
3.2 A Produção de cana de açúcar e seus resíduos .....	4
3.3 O Bagaço.....	5
3.4 Briquetagem.....	6
3.5 Máquinas para briquetagem.....	7
3.6 Características dos Briquetes .....	11
3.6.1 Umidade.....	11
3.6.2 Densidade mássica .....	12
3.6.3 Densidade Energética .....	12
3.6.4 Diâmetro e Altura .....	13
3.6.5 Volume.....	13
3.6.6 Poder calorífico.....	13
3.6.7 Índice de contração volumétrica .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	15
4.1. Delineamento experimental .....	15
4.2. Preparação dos resíduos para briquetagem .....	16
4.3. Fabricação dos briquetes.....	16
4.4. Caracterização dos briquetes e da briquetadora.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5. CONCLUSÃO .....	37
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

ANDRADE, L.F.F.; BIGATON, R.P. Briquetagem de bagaço de cana-de-açúcar. 2016. 40p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

## RESUMO

Com a intenção de utilizar o bagaço de cana-de-açúcar e aproveitar seu potencial energético, a briquetagem apresenta-se como uma opção tecnológica. O processo da briquetagem consiste na densificação do resíduo associado com elevadas temperaturas e pressões, a fins de plastificar a lignina e colar os fragmentos, produzindo um produto com densidades superiores ao dos resíduos originários. Para o desenvolvimento deste trabalho, o resíduo foi coletado em uma usina sucroalcooleira com 50% umidade e foi seco até obter umidade de 10%. A metodologia realizada foi com quatro tempos de permanência do resíduo na matriz e quatro temperaturas de aquecimento. Foram fabricados briquetes, utilizando uma briquetadora de laboratório com pistão hidráulico, com o objetivo de analisar a influência da temperatura de aquecimento e o tempo do resíduo na matriz sobre características do briquetes e sobre parâmetros operacionais da briquetadora. A temperatura foi a variável que mais influenciou nas características físicas do briquete, juntamente com a temperatura o tempo também mostrou importância nessas características. A altura do briquete foi a variável mais influenciada. Na fabricação dos briquetes foram utilizados quatro temperaturas, quatro tempos e três repetições.

A temperatura foi a variável que mais influenciou nas características físicas do briquete, juntamente com a temperatura o tempo também mostrou importância nessas características. Já as características da máquina o tempo foi a principal variável nas características da briquetadora.

Após as análises das características dos briquetes e da máquina pode-se concluir que a temperatura de 110°C e o tempo de 4 minutos, levando em consideração a energia gasta, a capacidade de briquetagem da máquina, qualidade final do briquete e a densidade energética, é a melhor configuração para produzir os briquetes.

**Palavras chaves:** briquetes, biomassa residual, energia.



## 1. INTRODUÇÃO

O petróleo, carvão mineral e gás natural são as fontes energéticas mais utilizadas mundialmente, não sendo necessariamente as melhores opções. São conceituados como forma de extrativismo primitivo. Com o passar do tempo, como consequência do grande uso do combustível fóssil, o meio ambiente vem apresentando sinais de desequilíbrio, como chuvas irregulares, clima desorganizado, aquecimento global, derretimento das geleiras polares, etc. Diante da necessidade de substituir o uso dos combustíveis fósseis, e na procura de uma fonte mais limpa de energia, a biomassa ganha cada vez mais importância no cenário da produção energética.

A biomassa sempre esteve em segundo plano quando o assunto é energia, devido à dificuldade em medir, quantificar e manusear, visto que se trata de uma fonte de energia dispersa e seu uso ineficiente gera pouca energia útil. Historicamente foi considerado um combustível inferior e poucas vezes incluído nas estatísticas energéticas oficiais.

Graças ao crescente reconhecimento dos benefícios ambientais e ao desenvolvimento e uso de novas tecnologias de conversão e o aperfeiçoamento das já existentes, a energia da biomassa apresenta-se como uma alternativa energética para atender a demanda mundial de energia. O uso atual dessa fonte energética demonstra uma evolução da civilização, associada a estágios mais elevados de produção, envolvendo sofisticadas técnicas agroindustriais.

Mundialmente os principais produtores de energia proveniente da biomassa são Ásia, Austrália, América Latina e Caribe, já as regiões do Oriente Médio e Europa possuem uma menor disponibilidade de biomassa devido à caracterização do seu meio e assim a produção se torna quase que insignificante (CORTEZ et, al, 2008). No Brasil um dos constituintes do grupo da biomassa é representado pela cana de açúcar, sendo seu bagaço o principal resíduo.

A produção de cana-de-açúcar brasileira na última safra (2015/16) foi de 658,7 milhões de toneladas, a produtividade da cultura de 70,5 Mg ha<sup>-1</sup> e a área cultivada no país foi de 9 milhões de hectares. No estado de Mato Grosso do Sul a área dedicada para o cultivo da cana-de-açúcar foi de 668,3 mil hectares, aumentando em 3,8% com relação à safra anterior. A produção no estado foi de 46,109 milhões de toneladas (CONAB, 2016).

Segundo Hugot (1972), o bagaço proveniente da indústria sucroalcooleira é de aproximadamente 24 a 30% do peso inicial da cana de açúcar, equivalente a 2,6 toneladas de bagaço por tonelada de açúcar. Estes dados demonstram a grande disponibilidade de bagaço, que também pode ser usado para fins energéticos. Neste contexto, uma das formas de se utilizar o bagaço é transformá-lo em briquetes. Produzir energia térmica a partir de resíduos densificados permite evitar certos problemas ambientais, sendo uma opção para sua destinação.

Os briquetes e péletes são substitutos diretos da lenha em muitas aplicações, incluindo o uso residencial, em indústrias e estabelecimentos comerciais como olarias, cerâmicas, padarias, pizzarias, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis e de cimento dentre outros (DIAS et al., 2013).

Briquetagem é o processo de compressão de resíduos no qual é destruída a elasticidade natural das fibras dos mesmos. Esta destruição pode ser realizada por dois processos: alta pressão e/ou alta temperatura. A temperatura favorece a plastificação da lignina, que atua como elemento aglomerante das partículas de resíduos, não sendo necessário, portanto, a adição de produtos aglomerantes como, resinas e ceras, (Biomax, 2016). Com a crise energética recente, a técnica da briquetagem, através do uso da biomassa está sendo olhada como uma boa opção para a geração de energia (REIS et al., 2002). A transformação da biomassa em briquetes lhes confere características apreciáveis, tais como a redução de gases poluentes emitidos durante o processo de queima, o aumento de densidade e a concentração de seu teor energética, de modo que o potencial de queima é melhorado (SOUZA, 2011). Desse modo, o aproveitamento de biomassa residual sob a forma de briquetes apresenta-se como uma alternativa de redução de impactos ambientais, causados pelos descartes inadequados pelas agroindústrias e pela falta de utilização dos resíduos (ESTEVES et al., 2014).

Na tentativa de dar mais uma opção para aproveitar o bagaço de cana-de-açúcar excedente das usinas de álcool e açúcar, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da influência da temperatura de aquecimento da matriz e do tempo de permanência do briquete na matriz sobre as características de briquetes e sobre parâmetros operacionais da briquetadora.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Principais fontes de energia exploradas no mundo

Segundo (FRANCISCO, 2016), a produção de energia é um elemento essencial para a vida do ser humano, sobretudo para a realização das atividades industriais. As fontes não renováveis (carvão mineral, gás natural, petróleo, etc.) respondem por cerca de 87% da matriz energética global, com destaque para o petróleo, que é a fonte mais utilizada desde a Segunda Revolução Industrial, ocorrida durante o século XIX.

Esse mesmo autor afirma que o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos, de origem fóssil e não renovável, ou seja, ele irá se esgotar na natureza. Após a extração e refino do petróleo, vários produtos podem ser obtidos, como a gasolina, óleo diesel, fertilizantes, tintas, borrachas, plástico, medicamentos, entre tantos outros. O petróleo é responsável por cerca de 37% da produção de energia no mundo, sendo que o setor de transporte é o principal destino desse óleo (50%). Apesar de sua eficácia para a geração de energia, o petróleo é extremamente prejudicial ao meio ambiente, pois durante sua combustão ocorre a liberação de gases poluentes, com destaque para óxido nitroso ( $N_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e o metano ( $CH_4$ ). Esses gases provocam a poluição atmosférica e intensificam o efeito estufa. Além desses problemas, a exploração de petróleo em plataformas marítimas também pode causar a poluição hídrica, através de vazamentos.

Diversas nações do mundo inteiro estão investindo muito dinheiro em projetos que utilizam as fontes de energia renováveis como a energia solar, a energia eólica, a energia geotérmica, o biodiesel, a energia obtida através do hidrogênio, a energia das marés, o etanol e a biomassa.

Essas fontes de energia alternativas citadas são as mais abordadas em projetos para uma menor contribuição para o aquecimento da Terra e também para tentar alcançar cada vez mais uma independência com relação ao petróleo.

### 3.2 A Produção de cana de açúcar e seus resíduos

A cana-de-açúcar, segundo Graner et. al. 1973, é originária da Oceania (Nova Guiné) e pertence à família Poacea do gênero Saccharum, cujas principais espécies são a *officinarum L.*, a *spontaneum L.*, *sinense Roxb.*, *Barberi Jesw.*, *robustum Jews* e *edule Hask.* Sua propagação acontece por meio de pedaços de colmos, denominados toletes. Estes colmos são formados por nós e entre-nós (meritálo) que na base apresentam uma zona de radículas de onde saem raízes finas e fibrosas, formando um sistema fasciculado muito desenvolvido. O colmo é cilíndrico, grosso e no topo saem folhas da base dos nós, de forma 12 alternada e com bainhas invaginantes com pelos lignificados conhecidos como joçal, podendo ou não apresentar inflorescência do tipo panícula. Existem diversas variedades cultivadas no Brasil, fruto do cruzamento híbrido das espécies, na busca por variedades resistentes às moléstias e com elevado teor de sacarose armazenados nas células do meritálo. (GERMEK, 2005). Segundo Stupiello (2001), o atual perfil varietal apresenta baixo teor de fibra, principalmente nas mais ricas em açúcar (sacarose, glicose e frutose) e precoces. (PAOLIELLO, J. M. M., 2006).

O sistema agro-industrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos, está ligado aos principais eventos históricos e é de enorme importância para o Brasil. O país é, juntamente com a Índia, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar; isoladamente, o maior produtor de açúcar e de álcool e o maior exportador mundial de açúcar. Seus números são na casa dos bilhões. Segundo estimativas, movimenta anualmente cerca de US\$ 12 bilhões distribuídos da seguinte maneira: 7% em insumos, 32% na produção agrícola, 21% na produção industrial, 16% em distribuição e vendas e 24% em arrecadação de impostos.

Por vários anos o resíduo gerado pela cana de açúcar durante o processo de produção foi um dos maiores problemas a ser enfrentado pelo setor. Segundo Cláudio Spadotto, no processamento de cana nas usinas e destilarias para a produção de açúcar e álcool, são gerados anualmente no Brasil cerca de 320 bilhões de litros de vinhaça, 88 milhões de toneladas de torta de filtro e 92 milhões de toneladas de bagaço. Esses números, que já são altos, devem aumentar consideravelmente nos próximos anos com o incremento no mercado consumidor de álcool, a expansão das lavouras de cana-de-açúcar e o funcionamento de novas unidades agroindustriais, visto que para produzir um litro de álcool em uma destilaria são necessários em torno de 12 kg de cana. Embora

não seja o de maior volume o bagaço é considerado o principal combustível no processo de produção do açúcar e etanol devido o seu poder calorífico.

### 3.3 O Bagaço

Segundo TRIANA et. al. 1990, o bagaço é um material fibroso resultante do processo de moagem da cana de açúcar. Ele é constituído por fibras exteriores (50%) que garantem resistência e dureza ao tecido vegetal, quantidades abundantes de células parenquimatosas (30%) com a função de manter a reserva de sacarose e a condução de nutrientes em pequenas distâncias, e segmentos de vasos (15%) com a com a função de conduzir nutrientes pelo seu grande comprimento. Em menor quantidade encontram se as células epidérmicas (5%) que dão origem ao tecido de revestimento e são caracterizados por bordas irregulares.

Quanto a sua composição o bagaço é dividido em holocelulose e lignina, sendo esse último responsável pela plastificação dos briquetes. Quanto a sua composição química os bagaço é constituído basicamente por carbono e oxigênio, que juntos somam aproximadamente 90% da massa seca dos componentes. O bagaço também pode ser classificado em três tipos de frações: casca, fibras e medula (CORTEZ et al., 2013).

As dimensões das partículas do bagaço variam de acordo com o sistema de extração do caldo de cana utilizado pelas usinas, sendo o mais utilizado atualmente a moagem em que a separação do caldo é dada por intermédio da pressão de rolos cilíndricos sobre a cama de cana-de-açúcar desfibrada (MAPA, 2016).

A composição imediata é totalmente influenciada pelas condições edafoclimáticas e de manejo da cultura (precipitação, clima, tipo de solo, variedade da cana e etc.) também pela época de colheita, bem como a forma como as amostras foram manuseadas e condicionadas até o momento das análises.

A produção mássica do bagaço é de 135 kg/t de cana representando 31,8% do total, e seu conteúdo energético é de 2400 MJ sendo 32,4% do total, a produtividade da cana de açúcar é de 14 t/ha em base seca. Considerando esses dados e o poder calorífico do bagaço a produtividade energética por hectare é de 251 GJ.

O bagaço junto a palha e açúcares representam juntos 42,5% do conteúdo mássico da cana de açúcar sendo os outros 57,5% representados pela água.

No Brasil estima-se que a produção de bagaço seja de aproximadamente 135 milhões de toneladas representando 27,5% da produção mássica de cana. Deste total produzido 10,9% é considerado excedente, ou seja, 14,7 milhões de toneladas do material não foi utilizado, em termos energéticos este número representa 1,28 TJ.

Atualmente o bagaço é uma fonte energética essencial para as usinas onde é usado para geração de vapor e posteriormente eletricidade. Seu poder calorífico superior varia entre 18 e 20 MJ/kg e produz em média 585kW/h por tonelada de cana sendo apenas 70% da energia do bagaço convertida em energia útil. O baixo aproveitamento da energia primária do bagaço, bem como o excedente de produção (inviabilidade da produção e comercialização de energia elétrica excedente) dá-se às baixas eficiências dos ciclos de cogeração empregados na maioria das usinas associadas ao baixo custo do bagaço.

### **3.4 Briquetagem**

A densificação do resíduo através do processo de briquetagem consiste na compactação a elevadas pressões, e temperatura. O aumento da temperatura provocará a plastificação da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas de madeira. Isto justifica a não utilização de produtos aglomerantes (resinas, ceras, etc). Para que a aglomeração tenha sucesso, é necessária uma quantidade de água, compreendida de 8 a 15% e que o tamanho da partícula esteja entre 5 e 10 mm (INFOENER, 2016).

A briquetagem é uma forma eficiente de concentrar a energia disponível na biomassa gerando um produto com qualidade superior ao da lenha, ampliando a oferta interna de energia renovável e limpa. A compressão confere uma redução de volume dos resíduos de 4 a 6 vezes, visto que há um aumento da densidade do material briquetado. Assim a estocagem, o transporte e a utilização são facilitados devido ao seu tamanho padrão, o que induz a um menor espaço de armazenamento e um melhor aproveitamento do material. Uma tonelada de briquetes é equivalente a 7m<sup>3</sup> de lenha e pode substituir de forma eficaz a lenha, óleo, energia elétrica, gás e outras fontes de energia em ramos industrial, comercial e residencial. A melhor aparência e maior higiene favorecem a utilização do briquete em indústrias alimentícias e

estabelecimentos de alimentação como o processo exige uma baixa umidade do material, os resíduos se tornam mais resistentes ao apodrecimento e à fermentação em condições naturais quando comparados à lenha (Barros, 2016).

O uso de briquetes está associado à preservação ambiental pois aproveita resíduos e substitui a lenha e o carvão vegetal.

### 3.5 Máquinas para briquetagem

No equipamento do tipo Prensa Briquetadora de Pistão, a compactação acontece por meio de golpes produzidos sobre os resíduos por um pistão acionado através de dois volantes. Do silo de armazenagem (aéreo ou subterrâneo) os resíduos são transferidos para um dosador e briquetados em seguida (forma cilíndrica) (EMBRAPA, 2016). Podem ser dos tipos mecânicos e hidráulicos.

Prensas de pistão mecânico, o movimento do pistão é alternado, a matéria prima é friccionada contra a parede da matriz provocando um aquecimento que varia entre 150 a 300°C (EMBRAPA, 2016). Estas prensas geralmente são movidas por energia elétrica, um volante com a função de compensar as oscilações da demanda de energia transmite movimento ao pistão através de uma manivela (FILIPPETO, 2008).

Estas prensas possuem baixo consumo de energia, e podem utilizar uma enorme variedade de biomassa, entre elas o bagaço da cana de açúcar, entretanto elas necessitam de muita manutenção (CHEN et al., 2009).

Na Figura 1, é possível ver como é o funcionamento de uma briquetadora a pistão mecânico.

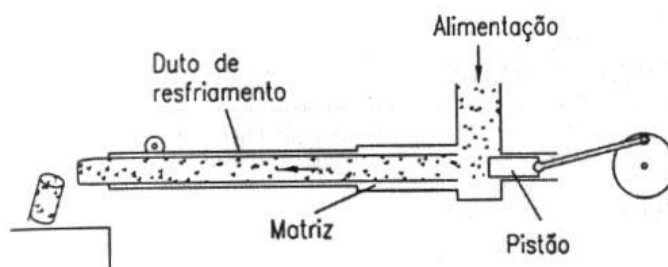


FIGURA 1. Briquetadora a Pistão mecânico (Fonte: NOGUEIRA e LORA, 2003).

Outro tipo de prensa são as de pistão hidráulico, estas não conseguem alcançar as elevadas temperaturas e pressões das mecânicas, utilizam a compactação fria e baixas pressões para realizar a densificação da biomassa (BHATTACHARYA et al., 1989).

Segundo Filippeto (2008), a pressão é produzida por um cilindro hidráulico que comprime a matéria prima, após atingida a pressão de trabalho ela poderá ser ajustada através de um controlador, adequando e fazendo a manutenção da pressão.

Um motor elétrico produz a energia para o pistão via sistema hidráulico de alta pressão, embora seja menos produtiva que as mecânicas, elas podem aceitar resíduos agrícolas com 15% de umidade (EMBRAPA, 2016).

A briquetadora por extrusão é outra tecnologia disponível para fabricar briquetes, o produto é obtido com 5% de umidade, ou menos. Quando a matéria prima é conduzida para a matriz, a mesma sofre intenso atrito e forte pressão, o que eleva a temperatura acima de 250°C, fluidificando-a. Posteriormente, o material é submetido a altas pressões, tornando-se mais compacto. No final do processo, o material é naturalmente resfriado, solidificando-se e resultando um briquete com elevada resistência mecânica (EMBRAPA, 2016). Existem diferentes tipos de briquetadora por extrusão como: rosca, rolos, roscas cônicas, rosca cilíndrica e prensa com rosca dupla.

Prensa de rolos, girando em direções opostas e em eixos paralelos os rolos normalmente forçam a biomassa a passar por uma abertura entre si, onde o produto é adensado conforme mostrado na Figura 2. Com a rotação dos rolos a matéria prima é moldada de um lado, e, do outro o produto é densificado e descarregado. A distância entre os rolos é chamada de lacuna e depende de muitos fatores como: tipo de biomassa, partículas, umidade e etc. (EMBRAPA, 2016).



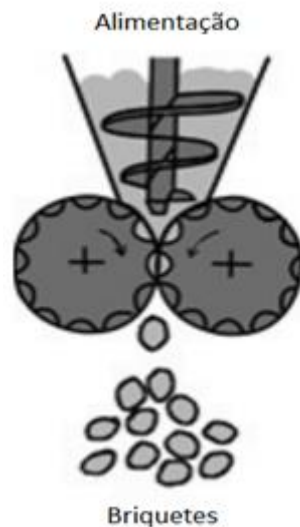


FIGURA 2. Briquetadora de rolo (Fonte: CARVALHO e BRINCK, 2007)

Prensa de rosca sem fim, a matéria prima sofre um adensamento através de uma matriz, onde a rosca empurra o material que sofre extrusão formando o briquete, Figura 3 (FILIPPETTO, 2008).

A matriz molda o briquete de acordo com sua própria forma, sendo a mais comuns os formatos quadrados ou retangulares para facilitar a estocagem dos briquetes (EMBRAPA, 2016).

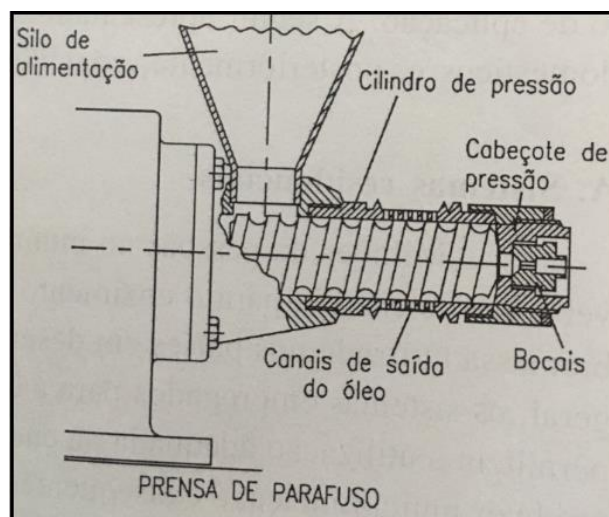


FIGURA 3. Prensa rosca sem fim (Fonte: NOGUEIRA e LORA, 2003)

Na briquetadora de parafuso de rosca cônica, a biomassa é pré-compactada em uma antecâmara, posteriormente a compactação ocorre através de um cabeçote de compressão, o atrito gerado neste processo ocasiona um elevado aquecimento,

necessitando de um sistema de resfriamento ao redor da matriz, conforme a Figura 4. Devido ao grande atrito, esta máquina apresenta um rápido desgaste na parte frontal da rosca (EMBRAPA, 2016).

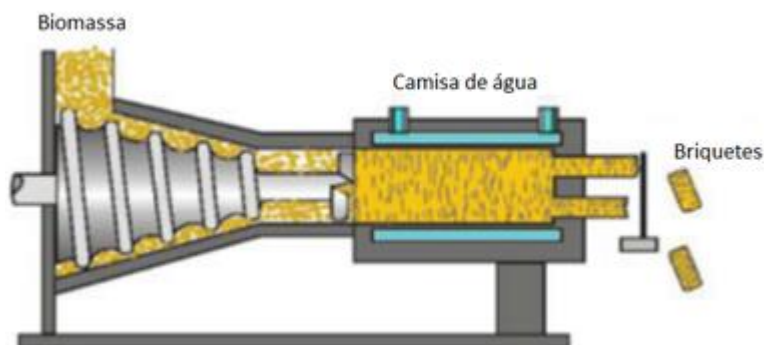


Figura 4. Prensa Rosca Cônica (fonte: BHATTACHARYA et al., 1989)

A prensa com rosca cilíndrica e matriz aquecida, é o tipo mais comum de briquetadora com rosca, a matéria prima é transportada e empurrada contra a matriz pela rosca como mostrado na Figura 5 (EMBRAPA, 2016).

Para atingir a temperatura ideal de trabalho a matriz necessita de aquecimento, que é realizado por uma resistência elétrica ou por uma pequena fornalha que envolve a matriz. Devido a este aquecimento (250 até 300°C), essa briquetadora requer uma chaminé para a coleta da fumaça, que é expelida pela biomassa. A fumaça encontra um caminho preferencial pelo furo central dos briquetes que saem perfurados por causa de um eixo da rosca cilíndrica (ERIKSSON e PRIOR, 1990).

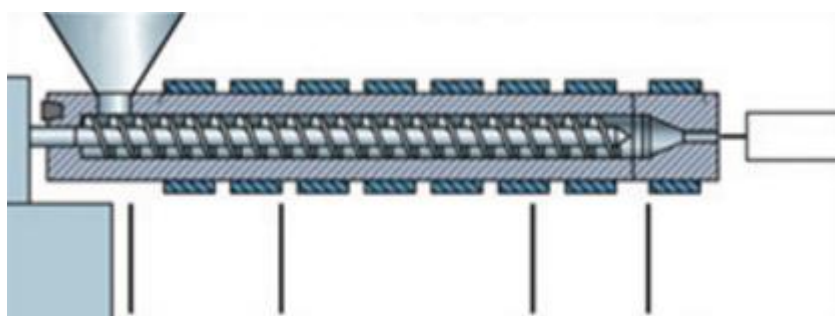


FIGURA 5. Prensa com rosca cilíndrica e matriz aquecida (Fonte: BHATTACHARYA et al., 1989).

A prensa de rosca dupla, esta máquina é projetada para situações extremas, de forma a conseguir extrusar partículas de até 80 mm e com elevada umidade até 25%.

Isto graças a um par de rosca rosca acopladas em eixos paralelos para empurrar o material conjuntamente, conforme mostrado na Figura 6 (EMBRAPA, 2016).

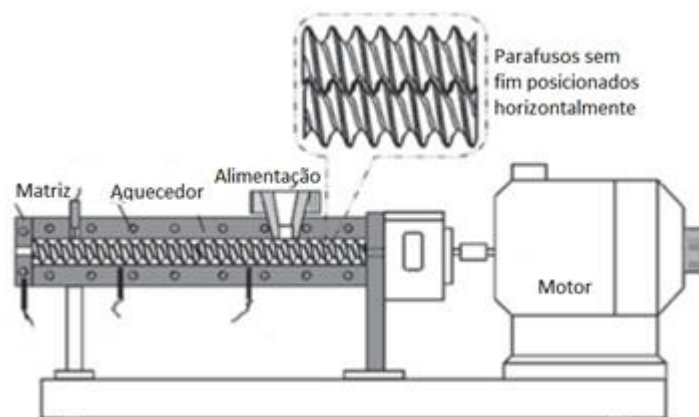


FIGURA 6. Prensa de Rosca Dupla (fonte: SPRINGER IMAGES, 2012)

As propriedades dos briquetes são influenciadas pelas briquetadoras que os produzem. Na briquetadora tipo prensa os briquetes vão possuir as seguintes propriedades: densidade de 1.000 a 1.300 kg/m<sup>3</sup>, poder calorífico inferior de 4800 kcal/kg (20,1 MJ/kg), voláteis de 81% base seca e teor de cinzas de 1,2% base seca (EMBRAPA, 2016).

Ainda segundo Embrapa, na briquetadora por extrusão os briquetes terão as seguintes propriedades: densidade de 1.200 a 1.400 kg/m<sup>3</sup>, poder calorífico inferior de 4.900 kcal/kg (2035 MJ/kg), voláteis de 85% e um teor de cinzas de menor que 1%.

## 3.6 Características dos Briquetes

### 3.6.1 Umidade

Do ponto de vista energético, a umidade é a característica mais importante, possuindo um padrão de aproximadamente 48% para o bagaço in natura. A redução da umidade é feita por meio de secagem, até seu valor ser inferior a 15% para fins de briquetagem (PAOLIELLO, 2006). No caso deste trabalho adotamos uma umidade padrão de 10%.

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe uma faixa de umidade no qual o material pode ser briquetado ou peletizado

adequadamente. Em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, mas a matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Diversos estudos recomendam que o valor ótimo de umidade deve estar entre 5 e 10% (EMBRAPA,2012).

### **3.6.2 Densidade mássica**

O bagaço de cana-de açúcar “in natura”, possui uma densidade mássica aparente de  $100 \text{ kg/m}^3$  (EMBRAPA AGROENERGIA, 2012).

A briquetagem é um método eficiente para elevar a densidade da biomassa, pois o processo de compactação faz com que haja uma maior concentração de energia por unidade de volume (PARIKKA, 2004).

Yamaji et al. (2013) e Chrisostomo (2011) encontraram um valor de densidade de  $0,66 \text{ g.cm}^{-3}$  para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar. Enquanto Chrisostomo (2011) e Brasil et al. (2015) encontraram uma densidade de  $0,9 \text{ g.cm}^{-3}$  para briquetes de bagaço de cana-de-açúcar usando uma granulometria menor que 0,4mm.

### **3.6.3 Densidade Energética**

A briquetagem de resíduos agrícolas e agroindustriais consistem na compactação desses resíduos, de modo a obter produtos com maior densidade (em  $\text{kg/m}^3$ ) e densidade energética (em  $\text{kcal/m}^3$ ) superiores às dos resíduos originais (EMBRAPA AGROENERGIA, 2012).

Segundo Pires et al., (2004), o bagaço possui alto teor de parede celular, baixa densidade energética, e é pobre em proteínas e minerais.

De acordo com (SANTOS et al. 2011) que compara o briquete de bagaço com o carvão vegetal, o briquete é obtido através de uma policondensação energética é menos higroscópico e mais resistente ao apodrecimento ou à fermentação do que o bagaço na condição natural, facilitando a estocagem e muito mais ainda o transporte. Na forma de briquetes, apresenta maior densidade energética, reduzindo-se os pátios de estocagem e a dimensão de equipamentos atualmente utilizados.

### **3.6.4 Diâmetro e Altura**

O diâmetro ideal dos briquetes para queima em caldeiras, fornos e lareiras é de 70 mm a 100 mm, com comprimento de 250 a 400 mm. Outras dimensões (diâmetro de 28 a 65 mm) são usadas em estufas, fogões com alimentação automática, grelhas, churrasqueiras etc. Quando se dispõe de resíduos com estas características, a fabricação de Briquetes é muito rentável (40 a 60 kWh/t) (MAGOSS, 2007).

### **3.6.5 Volume**

Briquetagem ou peletização são processos muito vantajosos no que diz respeito à armazenagem e transporte do material. Com a briquetagem ocorre uma grande redução de volume do material, o que implica em um armazenamento de energia maior em um menor espaço para estocagem. Além disso, há vantagem de diminuir os custos com o transporte, pois uma quantidade muito superior de biomassa poderá ser transportada em espaço físico reduzido. Se comparados com madeira, péletes e briquetes representam ganho de espaço e esse ganho é ainda maior se comparado com a matéria-prima de origem (serragem, casca, palha etc.), pois a redução de volume é, em média, de 4 a 6 vezes, podendo chegar até a 11 vezes em relação ao volume da biomassa de origem. O bagaço apesar do alto poder calorífico, é um material muito volumoso, onde segundo Hugot (1977), sua simples deposição ao ar livre, favorece a fermentação natural, apodrecimento e diminuição de seu rendimento energético, já a estocagem, é inviável devido ao grande volume utilizado, a menos que o bagaço seja comprimido, diminuindo seu volume, que é o caso da briquetagem.

### **3.6.6 Poder calorífico**

Define-se poder calorífico como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa do material em análise. No Sistema Internacional de Unidades o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilojoules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por

quilograma. O poder calorífico divide-se em superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado. O poder calorífico inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (BRIANE et al., 1985).

O Poder Calorífico Superior (P.C.S.) compreende a soma da energia liberada por uma unidade de massa seca a 0% de umidade, na forma de calor e a energia na forma de calor latente de vaporização da água de constituição que é recuperada. O Poder Calorífico Inferior (P.C.I.) é dado pela energia liberada por uma unidade de massa na forma de calor menos o calor latente de vaporização da água durante a combustão. A diferença entre P.C.S. e P.C.I. é igual a quantidade de calor necessário para evaporar a água presente no material.

O uso de bagaço como combustível em caldeiras e fornalhas, além de diminuir impactos ambientais, possui alto poder calorífico, substituindo lenha ou outros tipos de combustíveis, uma vez que este é um resíduo gerado da própria fabricação de etanol (PIACENTE, 2005).

### **3.6.7 Índice de contração volumétrica**

Concordando com Serpa e Vital et al., (2003) toda matéria e resíduo sofre modificações em suas dimensões quando seu teor de umidade é alterado. Isto está relacionado com a flutuação da umidade do resíduo abaixo da umidade de saturação das fibras, isto é, aquela umidade no qual o resíduo será utilizado. O índice de contração volumétrica está diretamente relacionado com a densidade, comprimento das fibras e o ângulo microfibrilar das paredes celulares, diferenciando maior ou menor contração.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, localizada no município de Dourados/MS.

O material que foi utilizado no experimento foi o bagaço de cana-de-açúcar (Figura 7) coletado em uma usina sucroalcooleira localizada no município de Naviraí/MS.



FIGURA 7. Bagaço de cana de açúcar utilizado no experimento.

#### 4.1. Delineamento experimental

O experimento foi montado em parcelas subdivididas, usando como fatores de variação o tempo de permanência do briquete na matriz e a temperatura de aquecimento. Foram avaliados quatro tempos de permanência do briquete na matriz (4, 6, 8 e 10 minutos) e quatro temperaturas de aquecimento (80, 110, 125 e 140°C), com 3 repetições.

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância, utilizando-se o teste F, a 5% de probabilidade. Nos casos em que houve significância dos tratamentos na análise de variância, os dados foram submetidos a análise de regressão, utilizando-se o teste t, a 5% de probabilidade. Os modelos foram selecionados com base na significância dos coeficientes de regressão, na magnitude do coeficiente de determinação e o estudo do fenômeno.

#### 4.2. Preparação dos resíduos para briquetagem

Os resíduos foram homogeneizados manualmente e a granulometria utilizada foi a mesma resultante do processo de moagem da cana-de-açúcar.

Considerando que a umidade do bagaço de cana no momento da briquetagem deve estar entre 10 e 12%, os resíduos foram secados na estufa marca Adamo com recirculação forçada de ar (Figura 8).



FIGURA 8. Secagem em estufa do bagaço de cana de açúcar.

A umidade do produto foi determinada utilizando o método padrão de estufa a 103°C, até massa constante e, calculada utilizando a seguinte equação:

$$U = 100 \frac{M_u - M_s}{M_u - T} \quad (1)$$

em que,

- U - umidade, %;
- M<sub>u</sub> - massa úmida, g;
- M<sub>s</sub> - massa seca, g;
- T- tara da cápsula metálica, g.

#### 4.3. Fabricação dos briquetes

Os briquetes do experimento foram fabricados na briquetadora modelo LB-32 (Figura 9).





FIGURA 9. Briquetadora Lippel LB-32.

A briquetadora usada possui 1,1 metros de comprimento, 0,52 metros de largura e uma altura de 1,800 m. Está composta por um motor elétrico Voges com potência de 3hp cuja função é a de acionar a bomba do sistema hidráulico que aciona os pistões inferior e superior, encarregados da compactação dos resíduos. A briquetadora possui uma matriz (cilindro) com diâmetro de 32 mm e altura de 280 mm, onde o briquete adquire sua forma através da compressão da biomassa previamente inserida. Uma resistência elétrica com uma potência de 2200 W, aquece o material, e em seguida o pistão superior que possui um percurso de 120 mm é acionado e servindo como uma “tampa” para a matriz. O pistão inferior, que possui um percurso de 300 mm e uma força máxima de 10 toneladas, é o encarregado da compressão do resíduo, sendo o material comprimido até a capacidade máxima do pistão, ou seja, quando não mais resulte em movimento.

A compressão do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada a uma pressão do sistema hidráulico de 2000 psi. Esse valor foi escolhido por recomendação do fabricante da máquina.

A massa de bagaço utilizado por briquete correspondeu a quantidade do resíduo necessário para encher o cilindro da matriz da briquetadora.

Os briquetes produzidos foram todos indentificados com as informações do tratamento e acondicionados em uma caixa de madeira com tampa, construída para mantê-los em ambiente seco e ausente de luz (Figura 10).



FIGURA 10. Briquetes etiquetados e acondicionados.

#### 4.4. Caracterização dos briquetes e da briquetadora

Durante o experimento foram determinadas características físicas e térmicas dos briquetes e características de desempenho da máquina.

Para determinar o volume do briquete foi utilizada a expressão do volume de um cilindro:

$$V_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} H_0 \quad (2)$$

em que,

$V_B$  - volume do briquete,  $\text{cm}^3$ ;

$D$  - diâmetro do briquete,  $\text{cm}$ ;

$H_0$  - altura do briquete,  $\text{cm}$ .

O diâmetro do briquete foi medido no ponto médio de cada terço da altura do briquete como mostrado na Figura 11, sendo que essa altura foi determinada a cada 120 graus da área da base do briquete (Figura 12). Foram calculadas as médias dessas

dimensões. Para as medições foi utilizado um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm.



FIGURA 11. Determinação do diâmetro do briquete.



FIGURA 12. Determinação da altura do briquete.

A densidade mássica expressa a relação entre a quantidade de massa contida por volume de briquetes e foi determinada pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V_B} \quad (3)$$

em que,

$\rho$  - densidade mássica dos briquetes,  $\text{g cm}^{-3}$ ;

$m$  - massa do briquete, g.

A massa do briquete foi determinada com uma balança de precisão modelo BL 3200H, com resolução de 0,01 g (Figura 13).



FIGURA 13. Determinação da massa do briquete.

A densidade energética expressa a quantidade de energia que pode ser obtida por volume de briquete e foi determinada como o produto do poder calorífico superior e a densidade mássica do briquete de acordo com a expressão que segue.

$$\rho_E = PCS \cdot \rho_M \quad (4)$$

em que,

$\rho_E$  - densidade energética,  $\text{J/cm}^{-3}$ ;

O poder calorífico superior e inferior dos briquetes foi estimado pela Fórmula de Dulong para combustíveis sólidos que considerou a composição química elementar dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar.

$$PCS = 8.100 C + 34.000 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500S \quad (5)$$

$$PCI = 8.100C + 34.000 \left( H - \frac{O}{8} \right) - 600 w \quad (6)$$

em que,

PCS - poder calorífico superior, kcal kg<sup>-1</sup>;

PCI - poder calorífico inferior, kcal kg<sup>-1</sup>;

C - teor de carbono, kg C/kg combustível;

H - teor de hidrogênio, kg H/kg combustível;

O - teor de oxigênio, kg O/kg combustível;

S - teor de enxofre, kg S/kg combustível;

w - água formada nos produtos, kg de água por kg de combustível.

Segundo JENKINS (1990) a composição elementar do bagaço de cana é de 44,80% de carbono, 5,35% de hidrogênio, 39,55% de oxigênio, 0,38% de nitrogênio e 0,01% de enxofre.

A água formada nos produtos foi determinada como:

$$w = 9H + u \quad (7)$$

em que,

u - umidade, %.

O índice de contração volumétrica foi determinado pela relação entre o volume da matriz dos briquetes e o volume dos briquetes, apresentados na Figura 8. A expressão utilizada na sua utilização:

$$\varphi = 100 \frac{V_M - V_B}{V_M} \quad (8)$$

em que,

$\varphi$  - Índice de contração volumétrica, %;

$V_M$  - volume da matriz dos briquetes, cm<sup>3</sup>.

O volume da matriz dos briquetes foi determinado como similar ao de um cilindro quando o pistão de compressão se encontra no ponto inferior do curso e foi determinada pela expressão:

$$V_M = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4} H \quad (9)$$

em que,

$D_M$  - diâmetro da matriz da briquetadora, cm;

$H$  - percurso do pistão de compressão, cm.

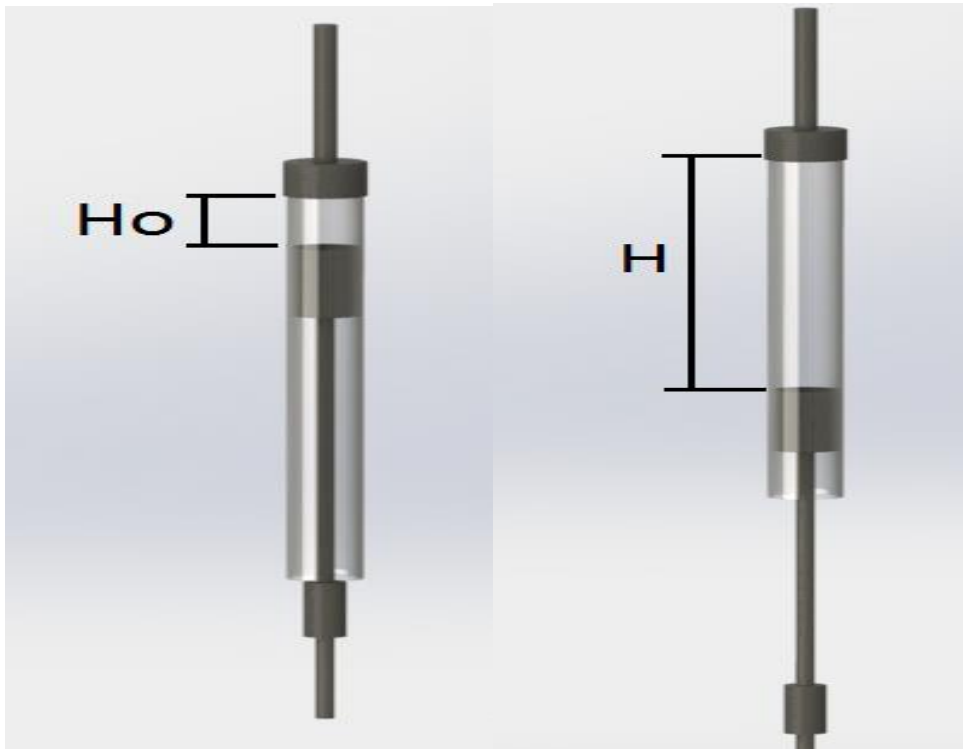


FIGURA 14. Volume da matriz com a altura  $H$  e volume do briquete com a altura  $H_0$ .

A força de compressão aplicada aos briquetes durante a densificação foi determinada pela expressão:

$$F_c = P A_M \quad (10)$$

em que,

$F_c$  - Força de compressão, N;

$P$  - pressão, psi;

$A_M$  - área da base da matriz do briquete,  $\text{mm}^2$ .

A capacidade de briquetagem foi determinada como a relação entre a massa do briquete e o tempo em que o briquete permaneceu na matriz aquecida, determinada pela equação a seguir:

$$CB = \frac{M}{t} \quad (11)$$

em que,

CB - capacidade de briquetagem, kg h<sup>-1</sup>;

t - tempo de permanência do briquete na matriz, h.

A capacidade de compressão da máquina durante o processo de briquetagem foi determinada como a relação entre a massa do briquete e o tempo de permanência do briquete na matriz que levou o material a atingir a altura final do briquete, conforme a equação a seguir:

$$Cc = \frac{M}{t_p} \quad (12)$$

em que,

Cc - capacidade de compressão da máquina, kg h<sup>-1</sup>;

t<sub>p</sub> - tempo de percurso do pistão até atingir a altura do briquete, h.

A energia útil de compressão consumida pela briquetadora foi determinada pela equação a seguir:

$$E_c = 44,7 \cdot \frac{R_p \cdot (W \cdot t)}{M} \quad (13)$$

em que,

E<sub>c</sub> - energia útil de compressão, kJ kg<sup>-1</sup>;

W - potência do motor de acionamento do sistema hidráulico, hp;

R<sub>p</sub> - relação entre a pressão aplicada e a pressão máxima de serviço do sistema hidráulico, decimal.

A energia para o aquecimento foi calculada pela equação a seguir:

$$E_{aq} = 60 \frac{R_T \cdot (W_e \cdot t)}{M} \quad (14)$$

em que,

$E_{aq}$  - energia para o aquecimento,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

$W_e$  – potência da resistência elétrica, W;

$R_T$  - relação entre a temperatura aplicada e a temperatura máxima da resistência elétrica, decimal.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 15 são apresentados os briquetes produzidos durante o experimento. Pode apreciar-se que são corpos cilíndricos bem estruturados, homogêneos e com alturas variadas.



FIGURA 15. Briquetes produzidos durante o experimento.

A umidade do material utilizado para a produção dos briquetes durante o experimento foi de 10%, como recomendado por INFOENER (2016), que deve variar entre 8 a 15% para que o processo de aglomeração tenha qualidade. Paoliello (2006) também trabalhou em seu experimento com valores inferiores a 15%, obtendo melhores resultados.

No Quadro 1 é apresentado o resumo da análise de variância dos dados que caracterizam os briquetes como massa, volume, altura, diâmetro, área, densidade mássica, densidade energética, poder calorífico inferior, e superior por briquete e contração volumétrica.

QUADRO 1. Resumo da análise de variância dos dados de massa, volume, altura, diâmetro, densidade mássica, área, poder calorífico inferior (PCIB), poder calorífico superior (PCSB), contração volumétrica e densidade energética

FV	GL	Quadrado médio				
		Massa	Volume	Altura	Diâmetro	Densidade Mássica
Temperatura( $\theta$ )	3	2,2271	160,6206*	2,383734*	1,7717*	0,1126**
Erro (A)	8	1,4229	1,1710	0,016881	0,0188	0,00031
Tempo (T)	3	0,4975	9,8517*	0,1773312*	0,24996*	0,00438**
$\theta \times T$	9	0,7218	3,9539*	0,032647*	0,3212*	0,00123*
Resíduo	24	0,5503	1,12829	0,0107	0,04254	0,0005
CV	-	2,22	3,16	2,76	3,76	2,20

FV	GL	Quadrado médio				
		Área	PCIB	PCSB	Contração Volumétrica	Densidade energética
Temperatura ( $\theta$ )	3	0,50982*	453,3802	552,6748	31,6741*	27955980**
Erro (A)	8	0,005649	289,6662	353,1059	0,230923	77872,22
Tempo (T)	3	0,073298*	101,2879	123,4710	1,942759*	1089135**
$\theta \times T$	9	0,093254*	146,9452	179,1276	0,779704*	307288,6*
Resíduo	24	0,01236	112,0362	136,5732	0,22249	121967,8
CV	-	8,95	2,22	2,22	0,55	2,20

\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

Observa-se que o volume, a altura, o diâmetro, a densidade mássica, a área, contração volumétrica e a densidade energética dos briquetes foram influenciadas por todas as variáveis estudadas, bem como a interação entre elas. A massa e os poderes caloríficos por briquete não foram influenciados pelo tempo de permanência do resíduo na matriz, independentemente da temperatura utilizada no aquecimento.

Assim, com as variáveis que foram significativas pelo teste F, optou-se por estudar superfícies de resposta dos dados em função da temperatura de aquecimento e tempo de permanência do briquete na matriz.

A Equação 15 representa o comportamento do diâmetro do briquete em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, podendo-se observar que o modelo selecionado demonstra que há uma interação direta entre as duas variáveis na formação do diâmetro, representada pela última parte da equação ( $t \cdot T$ ). O modelo selecionado demonstra que 65% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$D = 41,851 - 0,3171 \cdot t - 0,14596 \cdot T + 0,6058 \cdot 10^{-3}T^2 + 0,3265 \cdot 10^{-2} \cdot t \cdot T$$

$$R^2 = 0,65 \quad (15)$$

Na Figura 8 pode-se observar que o diâmetro dos briquetes variou entre 33,35 e 34,78 mm, constatando a expansão que acontece quando o briquete é retirado da matriz. Essa expansão representa um aumento de 5,7% considerando os 32 cm de diâmetro da matriz. Um dos fatores que pode ter influenciado esse aumento é que durante o processo de densificação, os resíduos estão sob a pressão do pistão hidráulico (2000 PSI=136 atm) e no momento que o briquete é tirado da matriz ele se expande pois fica sob a pressão atmosférica (1 atm).

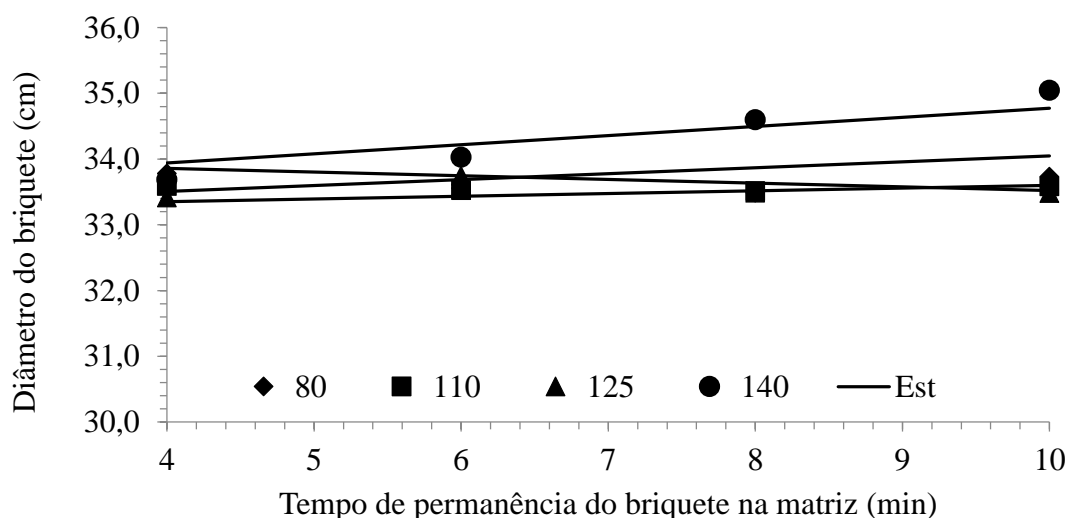


FIGURA 8. Diâmetro dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A Equação 16 representa o comportamento da altura do briquete em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, dependendo linearmente da temperatura e de forma quadrática do tempo. O modelo selecionado demonstra que 91% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$H_o = 6,494 - 0,1932 \cdot t + 0,0173 \cdot t^2 - 0,0173 \cdot T \quad R^2 = 0,91 \quad (16)$$

Na Figura 9 pode-se observar que a altura dos briquetes variou entre 3,21 e 4,51cm. A altura do briquete diminuiu na medida em que aumenta a temperatura de aquecimento, sendo que os briquetes fabricados com 80°C possuem maior altura que os briquetes a 110°C, 125°C e 140°C. Isto pode ser identificado visualmente na Figura 9.

A lignina é o aglomerante natural por excelência nos briquetes de cana de açúcar e segundo Barros (2013), a lignina acima de 100°C é plastificada. Considerando essa afirmação podemos inferir que nos briquetes fabricados com 80°C ainda não aconteceu esse processo. Acreditasse que o processo de aglomeração nessa temperatura ocorre devido a ação de outros adesivos naturais da biomassa como as proteínas, gorduras, amidos e carboidratos solúveis como afirmado por kliyan e morey(2009).

Na medida em que aumenta a temperatura de aquecimento (110, 125 e 140°C) o processo de plastificação da lignina relatado no parágrafo anterior pode estar acontecendo com maior intensidade, provocando maior expansão depois de retirada da matriz.

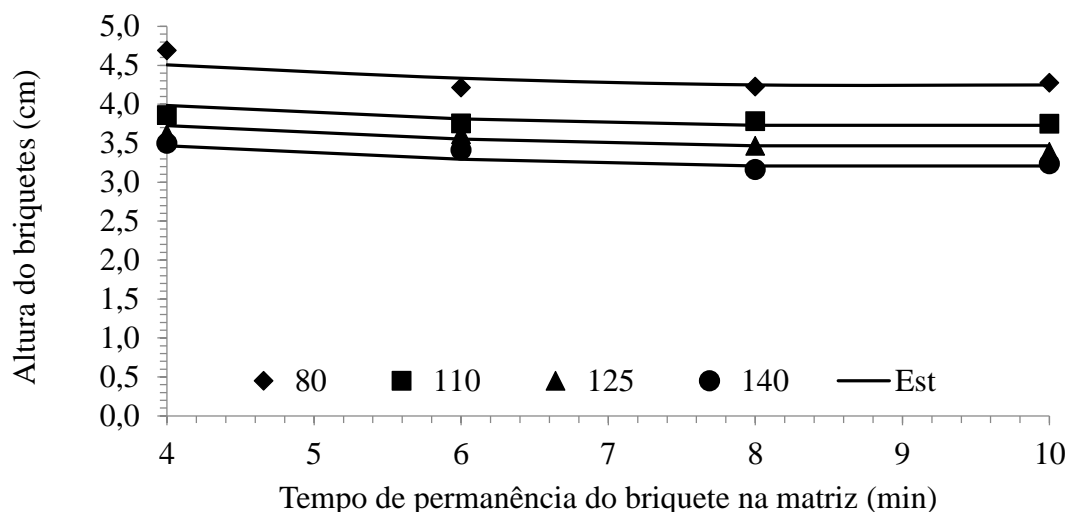


FIGURA 9. Altura dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A Equação 17 representa o comportamento do volume do briquete em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz dependendo linearmente do tempo e de forma quadrática da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 85% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$V_b = 70,6086 - 0,2896 \cdot t - 0,5083 \cdot T + 0,1695 \cdot 10^{-2} T^2 \quad R^2 = 0,85 \quad (17)$$

Na Figura 10 pode-se observar que o volume dos briquetes variaram de 29,77 a aproximadamente 39,63 cm<sup>3</sup>. O volume é uma característica que depende diretamente da área e da altura dos briquetes. Como essas características foram influenciadas pelas variáveis estudadas, conseqüentemente o volume também é influenciado. O volume é uma característica muito importante para analisar as operações de transporte, estoque e manuseio dos briquetes.

Os briquetes com menores volume são produzidos nos maiores tempos de permanência dos resíduos na matriz e na maior temperatura de aquecimento. Isto pode ser explicado pela forte ligação química das partículas do bagaço. Provavelmente a lignina e os extrativos atuam como um agente termoplástico, aumentando a força de ligação química entre as partículas e favorecendo a diminuição do volume.

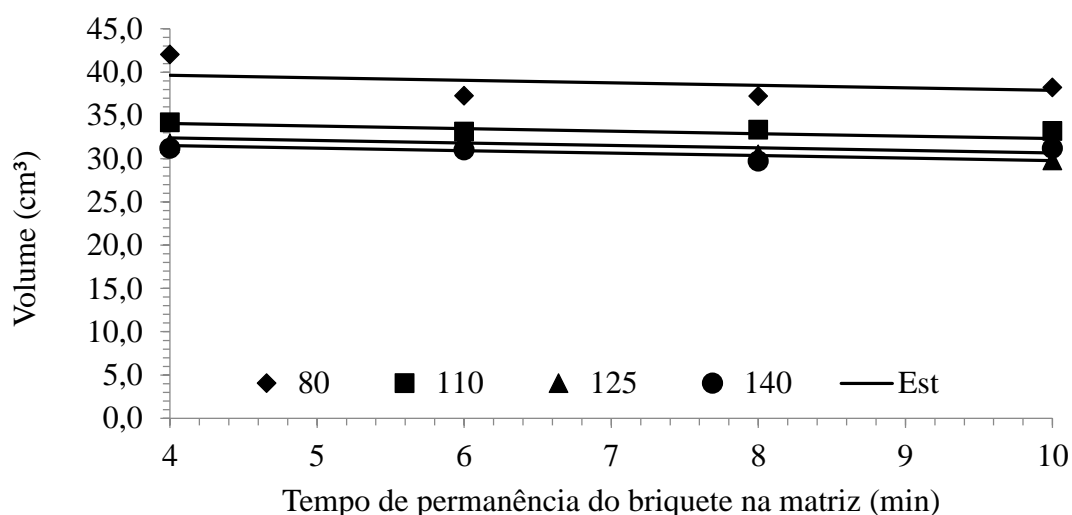


FIGURA 10. Volume dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A Equação 18 mostra a análise da densidade mássica dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, dependendo linearmente do tempo e de forma quadrática da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 90% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$\rho_M = 0,1304 - 0,5414 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0,1683 \cdot T - 0,6078 \cdot 10^{-4} T^2 \quad R^2 = 0,90 \quad (18)$$

Na Figura 11 é possível analisar que densidade mássica dos briquetes variou entre 0,85 e 1,1  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Silva et al. (2015) estudando a densidade de briquetes de bagaço de cana com 12% de umidade, chegaram a um valor médio de 0,88  $\text{g}/\text{cm}^3$  e concluíram que mesmo não sendo muito alto, pode ser considerado como uma característica adequada para biocombustível sólido.

A maior diferença de densidade ocorre entre as temperaturas de 80° e 110°C, onde houve uma variação de 0,128  $\text{g}/\text{cm}^3$ , percentualmente correspondendo a 24,22%. A densidade mássica é inversamente proporcional ao volume e diretamente proporcional a massa, portanto quaisquer variações nestes parâmetros irão modifica-la, considerando que não houve diferença entre as massas, o volume fica como único fator de variação conforme equação 17.

O aumento na densidade dos briquetes representa que no mesmo espaço há a possibilidade de comprimir uma maior quantidade de resíduos. Sendo esse fator considerado uma grande vantagem dos briquetes em termos de transporte e armazenamento. A densidade mássica é um fator muito importante quando se estuda a viabilidade de uma biomassa para bioenergia, pois maiores densidades indicam mais massa disponível para um mesmo volume e também maior densidade energética.

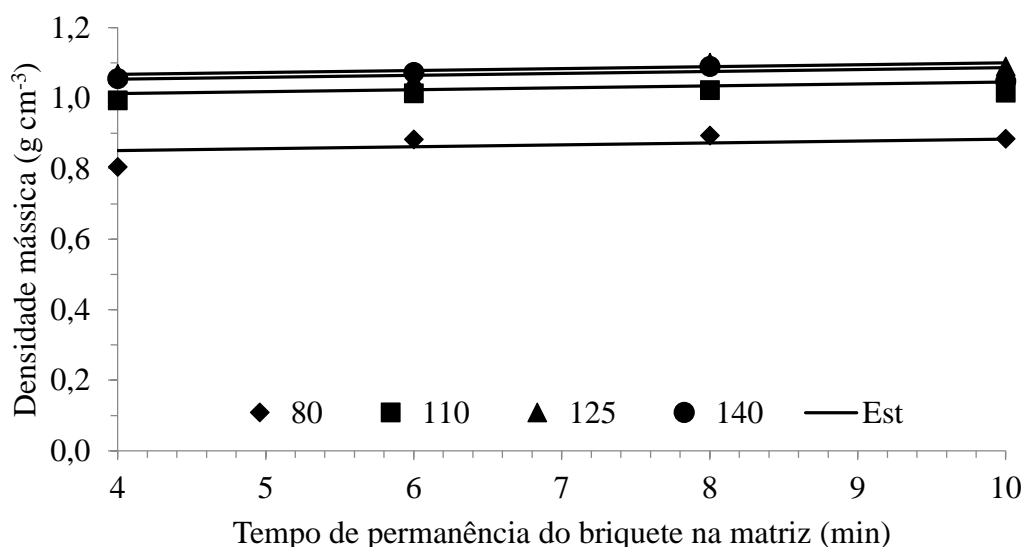


FIGURA 11. Densidade mássica dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A Equação 19 mostra os resultados obtidos da densidade energética dos briquetes em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, dependem quadraticamente do tempo e linearmente da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 91% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$\rho_E = -3884,8 + 265,14 \cdot t - 0,9575 \cdot t^2 + 667,35 \cdot T - 4,57 \cdot T^2 \quad R^2 = 0,91 \quad (19)$$

Na Figura 12 podemos observar que a densidade energética variou entre 13.202,7 e 17.146 kJ m<sup>-3</sup> (3157 e 4100 MCal.m<sup>-3</sup>) valores próximos aos encontrados por Silva e Moraes (2008) de 3985 e 4782 MCal.m<sup>-3</sup> para briquetes com densidade mássica de 1.000 a 1.200 kg/m<sup>-3</sup> respectivamente e 10% de umidade. A densidade energética caracteriza quanta energia tem uma unidade de volume do briquete. Quanto maior essa característica maior o potencial desse biocombustível.

A densidade mássica influencia diretamente a densidade energética, por tanto as variações ocorridas na primeira serão diretamente proporcionais na segunda. O maior valor de densidade energética ocorreu com a maior temperatura e o tempo de 8 minutos. A partir desse tempo a densidade energética do briquete começa a diminuir pelo que não se justifica manter a briquetadora funcionando por mais dois minutos.

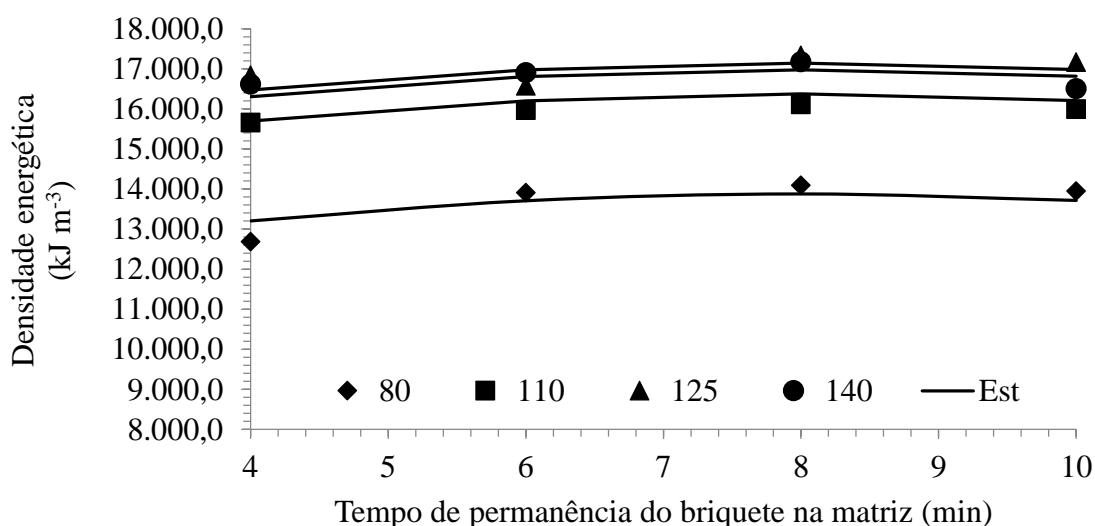


FIGURA 12. Densidade energética dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

Na Equação 20 observa-se os resultados da contração volumétrica em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, dependendo linearmente do tempo e quadraticamente da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 87% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$\varphi = 66,4982 + 0,8116 \cdot t - 0,4878 \cdot T^2 + 0,2257 \cdot T + 0,7530 \cdot 10^{-3} \cdot T^2$$

$$R^2 = 0,87 \quad (20)$$

Na Figura 13 é possível apreciar o comportamento da contração volumétrica para as temperaturas e tempo estudados. Essa característica representa a relação entre o volume ocupado pelo bagaço na matriz da briquetadora e o volume desse mesmo bagaço após a briquetagem. Essa relação indicou que o resíduo se contrai de 81,32 a 86,79%, correspondendo o maior valor de contração com a temperatura maior e o tempo de 8 minutos. Na menor temperatura de aquecimento (80°C) ocorrem as menores contração do bagaço, indicando que a temperatura é um fator importante no processo de densificação.

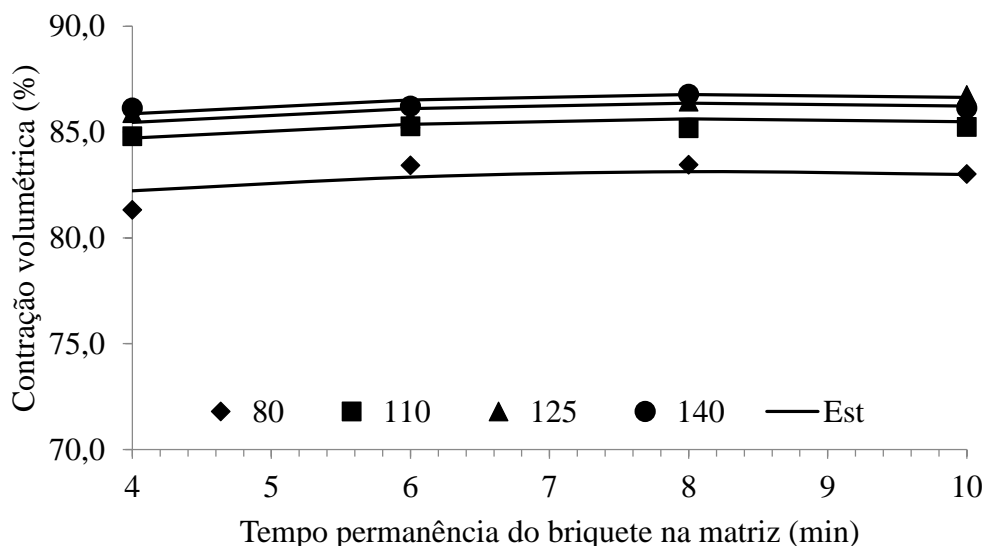


FIGURA 13. Contração volumétrica dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A contração do bagaço teve pouca variação entre si para as temperaturas de 110, 125 e 140°C, já para 80 e 110°C ocorreu uma variação de 3,48%.



A compressão ocorrida no experimento resulta em briquetes com volume de 5 a 8 vezes menores que o da matriz da briquetadora. Para Embrapa (2012), essa compactação pode ser 4 a 6 vezes menor, para Quirino (1991) a redução de volume varia entre 5 e 7 vezes, sendo que Flores et al. (2009) conseguiram uma redução de até dez vezes para briquetes de braquiária.

No Quadro 2 é apresentado o resumo da análise de variância dos dados que caracterizam o desempenho da máquina como capacidade efetiva de briquetagem, a capacidade de compressão, a energia útil de compressão e a energia consumida para o aquecimento.

QUADRO 2. Resumo da análise de variância dos dados de capacidade efetiva de briquetagem, capacidade de compressão, energia útil de compressão e energia consumida no aquecimento.

FV	GL	Quadrado médio			
		Capacidade de briquetagem	Capacidade de compressão	Energia de aquecimento	Energia útil de compressão
Temperatura ( $\theta$ )	3	0,0002	1,114867	0,732896**	22442,98
Erro (A)	8	0,00015	0,200774	143900,8	11388,05
Tempo (T)	3	0,2157**	0,183063	0,187132**	0,170195**
$\theta \times T$	9	0,000058	0,121468	2955277**	9846,533
Resíduo	24	0,000069	0,081834	62262,38	4937,272
CV	-	2,58	2,54	2,37	2,21

\*\* e \* Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.

A energia de aquecimento foi a única variável influenciada por todas as variáveis estudadas, bem como a interação entre elas, entretanto a capacidade de briquetagem e a energia útil de compressão foram somente influenciadas pelo tempo de permanência do resíduo na matriz.

Dessa forma para as variáveis que foram significativas pelo teste F, optou-se por estudar superfícies de resposta dos dados em função da temperatura de aquecimento e tempo de permanência do briquete na matriz.

A Equação 21 aborda os resultados da energia útil de compressão em função do tempo de permanência na matriz, dependendo linearmente do tempo e da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 96% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$E_c = -11140,9 + 96,35 \cdot t + 1529,3 \cdot T \quad R^2 = 0,96 \quad (21)$$

Na figura 14 observa-se uma reta, indicando que o tempo de permanência dos resíduos na matriz e a energia útil demandada para compressão são diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o tempo de permanência do briquete na matriz maior será o gasto de energia pela máquina. Os valores da energia útil variaram entre 1790,3 e 4667,5 kJ kg<sup>-1</sup>.

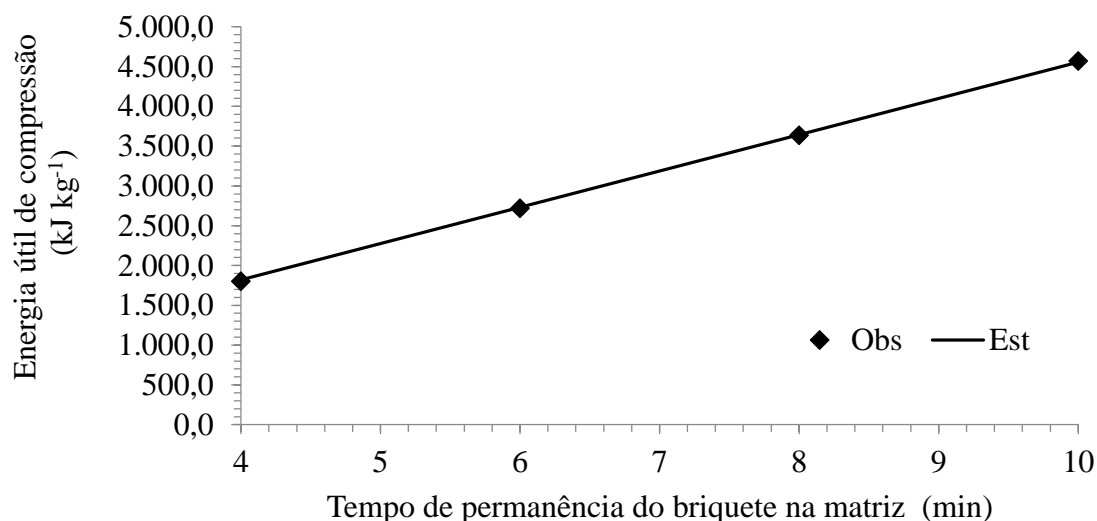


FIGURA 14. Energia útil de compressão dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo permanência do briquete na matriz.

A Equação 22 representa o comportamento da energia de aquecimento em função da temperatura e o tempo de permanência na matriz, dependendo linearmente do tempo e da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 99% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$\text{Eq} = -1479,1 + 4016,6 \cdot t + 9,529 \cdot T \quad R^2 = 0,99 \quad (22)$$

Na Figura 15 observa-se que há uma projeção linear. Os valores aumentam significativamente com o aumento do tempo do material na matriz e temperatura de aquecimento. Os briquetes de 140°C tiveram um maior gasto energético devido a exigência da máquina para elevar a temperatura e mantê-la por todos os tempos de tratamento, assim ocorreu o inverso com os briquetes de 80°C que necessitaram menos energia para chegar no aquecimento desejado.

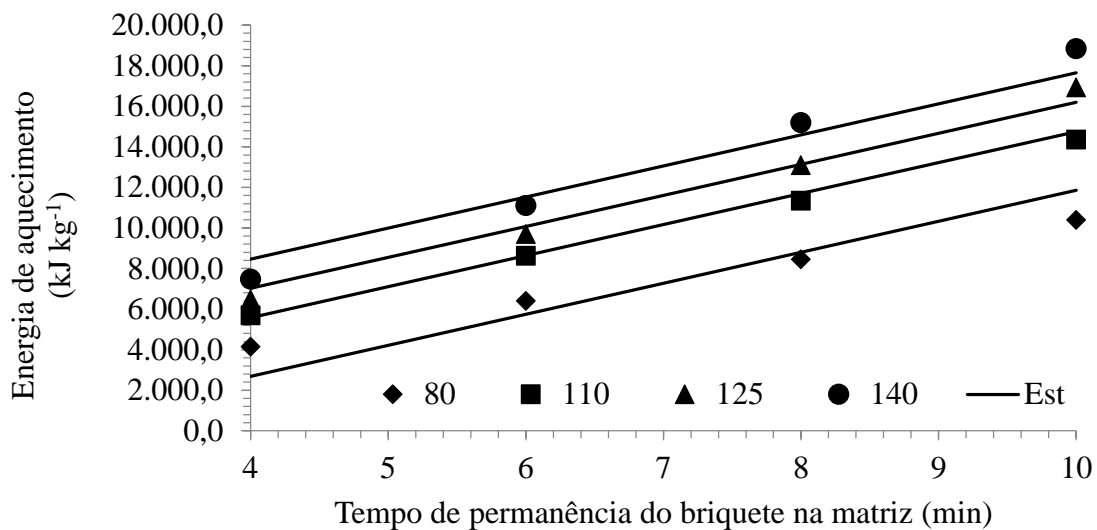


FIGURA 15. Energia de aquecimento dos briquetes de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo permanência do briquete na matriz, para as respectivas temperaturas de aquecimento.

A Equação 23 representa a capacidade de briquetagem, em função da temperatura de aquecimento e o tempo de permanência na matriz, dependendo quadraticamente do tempo e da temperatura. O modelo selecionado demonstra que 99% das variáveis dependentes conseguem ser explicadas pelos regressores presentes no modelo.

$$CB = 0,9223 - 0,1546 \cdot t + 0,7468 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 0,1613 \cdot 10^{-2} \cdot T - 0,7762 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$$

$$R^2 = 0,99 \quad (23)$$

Na Figura 16 observa-se uma curva exponencial em função do tempo de permanência do briquete na matriz, variando de 0,202 a 0,509 kg h<sup>-1</sup>. A capacidade de briquetagem da máquina reduz com o tempo do material na matriz. Conforme aumenta o tempo de permanência do briquete na matriz, como citado acima, ocorre a plastificação da lignina e outros aglomerantes, desta forma com o passar do tempo, os compostos vão se plastificando, até não haver mais agentes ligantes, assim diminuindo a capacidade de briquetagem da máquina.

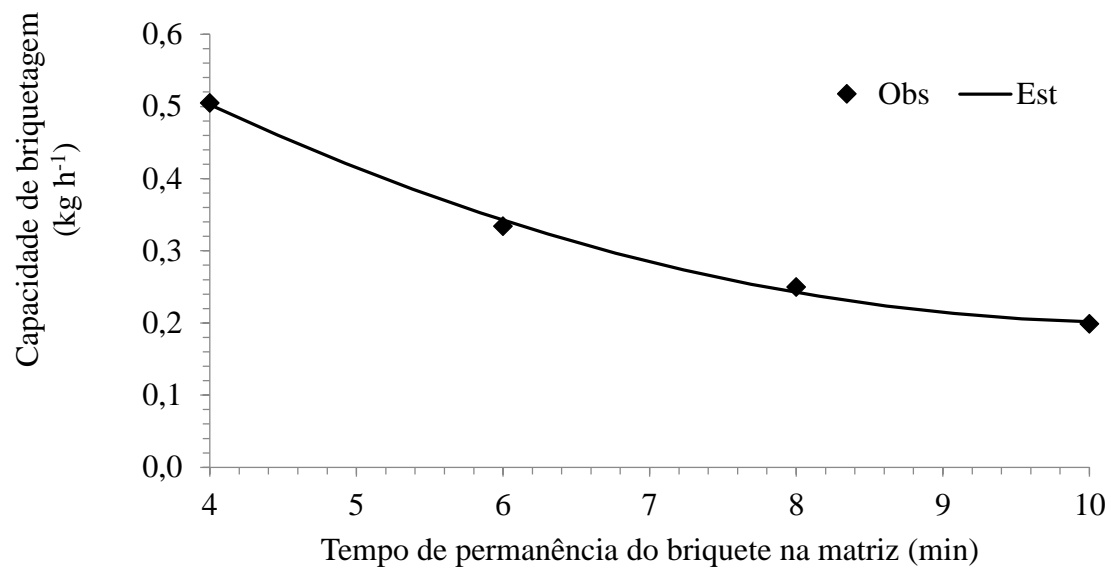


FIGURA 16. Capacidade de briquetagem em função do tempo de aquecimento do briquete.

## 5. CONCLUSÃO

O trabalho possibilitou concluir que:

- A energia de aquecimento foi a única variável influenciada pelas duas variáveis estudadas.
- A capacidade de briquetagem e a energia útil de compressão foram somente influenciadas pelo tempo de permanência do resíduo na matriz.
- A capacidade de compressão não foi influenciada por nenhuma variável.
- Os modelos ajustados foram capazes de prever os parâmetros avaliados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, L.O. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2013.

BIOMAX Indústria de Máquinas Ltda. Disponível em:

<http://www.biomaxind.com.br/site/br/briquetagem.html>. Acesso 25/05/2016

CARVALHO, E.A.; BRINCK, V. Briquetagem. In: LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004. p. 613-634.

CHEN, L.; XING, L.; HAN, L. **Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 9, p. 2689-2695, 2009.

CONAB Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento Safra Brasileira de cana-de-açúcar. <http://www.conab.gov.br/>. Acesso 20.05.2016.

CORTEZ, A.B.; LORA, E.E. S.; GOMEZ, E.O. **Biomassa para Energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

DE PAULA, P. T. et al. **Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos**. Cerne, Lavras, v. 18, n. 3, p. 433-439, 2012.

DIAS, J. D. S., dos SANTOS, D. T., Braga, M., Onoyama, M. M., Miranda, C. H. B., Barbosa, P. F. D., & Rocha, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Embrapa Agroenergia-Documents (INFOTECA-E), 2013.

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

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel**. Roma: FAO, 1990.

ESTEVES, Mayara Raysa Lima et al. **Estudo do potencial energético e aproveitamento das cascas de coco verde para a produção de briquete em Maceió-AL**. 2014.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos agrícolas vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

GOUVÊA, A. F. G. et al. **Produção de briquete a partir da adição da lignina kraft com resíduo da indústria moveleira**. 2012.

INFOENER. [http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br\\_briquete.asp](http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp) Acesso em 20/07/2016.

LIPPEL <http://www.lippel.com.br/lippel/uploads/downloads/05-05-2014-10-37utilizacao-de-bagaco-de-cana-de-acucar-na-fabricacao-de-briquetes.pdf>. Acesso 12.09.2016

LIPPEL. Briquetadeira para laboratórios de pesquisa. <http://www.lippel.com.br/br/briquetagem-e-peletizacao-de-biomassa/briquetadeiras-para-laboratorios/briquetadeira-para-laboratorios-de-pesquisa-com-biomassa-lb-32.html#.V27pN-srKM8>> Acesso em 23/06/2016.

MAPA Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Disponível em: [www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br) Acesso em 22/07/2016

MILES, T.R., MILES JR., T.R., BAXTER, L.L., BRYERS, R.W., JENKINS, B.M., ODEN, L.L. **Alkali Deposits Found in Biomass Power Plants**. NREL, 1995.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira**. 2006. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

PIRES, A.J.V.; GARCIA, R.; VALADARES FILHO, S.C.; PEREIRA, O.G.; CECON, P.R.; SILVA, F.F.; SILVA, P.A.; ITAVO, L.C.V. **Degradabilidade do bagaço de cana-de-açúcar tratado com amônia anidra e, ou, sulfeto de sódio**. Revista Brasileira de Zootecnia, v.33, p.1071-1077, 2004.

REIS, B. O. et al. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí**. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

SANTOS, M.L. et al. **Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica**. Química Nova, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.

SAWIN, J. L.; BHATTACHARYA, S. C.; Galàn, E. M.; McCRONE, A.; MOOMAW, W. R.; Sonntag-O'Brien, V.; Sverrisson, F.; CHAWLA, K.; MUSOLINO, E.; SKEEN, J.; MARTINOT, E. Renewables 2012 Global Status Report. Paris: REN21, 2012. Disponível em: [http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012\\_low%20res\\_FINAL.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/GSR2012_low%20res_FINAL.pdf). Acesso em: 25/06/2016.

SILVA, D.A.; YAMAJI, F.M.; BARROS J.L. **Caracterização de biomassas para a briquetagem**. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 713 - 722 , 2015.

SILVA, M. B.; MORAIS, SANTOS, Anderson. **Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação**. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro. 2008.

SOUZA, JEA. **Avaliação das diversas fontes e tipos de biomassa do estado de Alagoas: Estudo de suas características físico-químicas e de seu potencial energético**. Maceió: UFAL, 2011.

SPADOTTO. [http://webmail.cnpma.embrapa.br/down\\_hp/360.pdf](http://webmail.cnpma.embrapa.br/down_hp/360.pdf)

TRIANA, O. et al. **Ottas del bagaço de la caña de azucar**. Cuba-9/GEPLACEA/PNUD/ICIDCA, México,1990.

ZAGO, E. S. **O processo de briquetagem como alternativa de sustentabilidade para as indústrias madeireiras do município de Aripuanã-MT**. Revista TechnoEng-ISSN 2178-3586, v. 1, n. 2, 2015.