

Desenvolvimento de molde para produção de briquetes em escala de bancada

João Vitor da Silveira Nunes¹
Kevyn Matheus Vieira Nogueira²
Enio Pontes de Deus³
Maria Alessandra de Sousa Rios⁴

RESUMO

O briquete produzido pelo adensamento de biomassa é uma das alternativas de combustível sólido que pode ser oriunda da agricultura, de podas de árvores e do setor madeireiro. Esse biocombustível apresenta vantagens em comparação à lenha e ao carvão, tais como maior densidade calorífica e facilidade de armazenamento e transporte. Entretanto, a variedade de matérias-primas utilizadas para a produção de briquetes ainda é pequena; portanto, é necessária a ampliação de pesquisas voltadas a essa temática. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma briquetadeira em escala de bancada, de baixo custo de fabricação e fácil manuseio. O sistema é composto por um molde-base, camisa e pistão acoplado a uma prensa hidráulica. As peças foram fabricadas em aço inox ASTM 304 por meio de um torno mecânico. Simulações foram realizadas em elementos finitos para a carga estática de 10 t aplicada à prensa, e o menor coeficiente de segurança obtido foi de 1,3182 para a peça do pistão. Os briquetes foram produzidos com até 50 MPa de pressão de compactação. Estão descritos, ainda, os defeitos mais comuns, ocorridos durante o uso do molde e o procedimento de manutenção corretiva para cada caso.

Termos para indexação: biocombustível, biomassa, briquete, molde, simulação.

Development of a mold for briquette production in a bench scale

ABSTRACT

The briquette produced by densification of residual biomass is one of the alternatives for solid fuel which can come from agriculture, tree pruning, or wood industry. This biofuel shows advantages over firewood and charcoal, such as higher calorific density and ease of storage and transportation. However, the variety of raw materials used for the production of briquettes is still small; therefore, the expansion of research on this topic is necessary. In this sense, this work presents the development of a briquetting machine on a bench scale, with low manufacturing cost and easy handling. The system is composed of a base-mold, metal pipe liner, and piston coupled to a hydraulic press. The parts were manufactured in ASTM 304 stainless steel using a mechanical lathe. Finite element simulations for a 10-tonne static load applied to the hydraulic press were performed, and the lowest safety coefficient obtained was 1.3182 for the piston part. The briquettes were produced using up to 50 MPa of compaction pressure. The most common defects occurring during the use of the mold, and the corrective maintenance procedure for each case are also described.

Index terms: mold, briquette, simulation, biomass, biofuel.

Ideias centrais

- Briquetadeira em escala de bancada, de simples manuseio e baixo custo.
- Molde briquetador composto de um molde-base, camisa metálica e pistão.
- As peças foram fabricadas em aço inox ASTM 304.
- Foram realizadas simulações em elementos finitos.

Recebido em
14/10/2021

Aprovado em
03/11/2021

Publicado em
20/05/2022



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

¹ Engenheiro Mecânico, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: vitornune@gmail.com.

² Engenheiro Mecânico, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: kevyannogueira@gmail.com.

³ Engenheiro Civil, doutor em Engenharia Estrutural, professor titular, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: epontes@ufc.br.

⁴ Engenheira Química, doutora em Química Inorgânica, professora adjunta, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE. E-mail: alexsandrarios@ufc.br.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, novas formas de energia têm sido investigadas e as pesquisas têm-se concentrado naquelas que possam trazer menos impactos ambientais. Uma das formas que tem-se destacado são os biocombustíveis – entre os quais estão os briquetes oriundos de biomassa sólida – que podem ser utilizados em fornos e caldeiras em setores como panificação, termelétrico ou até mesmo para uso doméstico (Purohit et al., 2006; Silva, 2007; Bonfatti Júnior et al., 2019; Lima et al., 2019; Ponte et al., 2019; Mitchell et al., 2020).

O briquete é uma fonte de energia alternativa à lenha e ao carvão que tem maior densidade energética e alcança maiores temperaturas de queima, em razão de sua menor umidade e, a depender da matéria-prima usada, pode produzir menos cinzas e gases. Além disso, a biomassa em sua forma original é difícil de ser utilizada como fonte de energia, em razão do tamanho irregular, alta umidade e baixa densidade que dificultam seu armazenamento, transporte e manuseio, problemas que são contornados com os briquetes graças à compactação destes (Mitchell et al., 2020). No entanto, a maior vantagem desse biocombustível está na questão ambiental, pois, com o maior consumo de briquetes, se diminui a demanda por lenha e carvão, o que contribui para a diminuição do desmatamento (Gioda, 2018). Outro fator importante é o aproveitamento de resíduos vegetais, principalmente os agrícolas, que, na maioria das vezes são descartados em aterros e lixões ou são subaproveitados (Demirbas, 2004; Souza & Vale, 2016; Raju et al., 2021). Em casos mais extremos, resíduos agrícolas são queimados sem nenhum controle, causando problemas respiratórios em populações próximas (Arévalo et al., 2017).

Entretanto, apesar do potencial brasileiro para a produção de briquetes, a variedade de biomassas utilizadas ainda é muito limitada, o que torna necessária a pesquisa de outras matérias-primas. Uma das possíveis causas para esses cenários é a dificuldade de acesso a briquetadeiras de laboratório. A maioria das briquetadeiras comercializadas são voltadas para a produção em escala industrial, que utiliza grandes quantidades de biomassa, característica inviável para a utilização em laboratório. As poucas briquetadeiras comercializadas para uso em laboratório têm custo bastante elevado.

Na revisão de literatura sobre briquetes, foram encontrados modelos de briquetadeiras de fabricação própria, porém, pouco era detalhado sobre a estrutura de compactação ou como era feita a fabricação dos moldes. Diante desse cenário, o trabalho apresenta um molde para a fabricação de briquetes em escala de bancada, de baixo custo. Desse modo, outros modelos de fabricação própria podem ser elaborados e modificados, para difundir e tornar acessível a pesquisa sobre a temática briquetes e resíduos orgânicos, com potencial para a produção de combustíveis sólidos.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma briquetadeira em escala de bancada, de simples manuseio e baixo custo, além de explicar o procedimento de fabricação e matérias-primas utilizadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Essa parte segue uma descrição detalhada do processo de fabricação dos moldes, a concepção das peças, simulações em elementos finitos e o passo a passo de fabricação e materiais utilizados.

Pesquisa e concepção do molde

Durante pesquisa na literatura sobre briquetes, encontraram-se alguns trabalhos que relatavam utilizar um molde de fabricação própria. Esses trabalhos foram usados como base para conceber o desenho do molde de briquetagem.

Shuma & Madyira (2017) utilizaram um molde com um pistão de 96 mm de diâmetro, 250 mm de comprimento, uma camisa de 96 mm de diâmetro interno, 100 mm de diâmetro externo, 200 mm de comprimento, uma base com um diâmetro interno de 96 mm, um ressalto abaixo com

diâmetro maior de 100 mm e 80 mm de altura. O trabalho apresenta também a utilização do aço de baixo carbono na fabricação das peças, provavelmente aços semelhantes ao ASTM SAE 1020 e 1010 (0,1 e 0,2% em massa de carbono, respectivamente), que são exemplos de aços de baixo custo e fácil obtenção. O conjunto foi acoplado a uma prensa hidráulica de 30 t, e a pressão máxima utilizada para produção de briquetes foi de 19 MPa, logo, para a área com diâmetro de 96 mm, a prensa só era utilizada até 13,75 t.

No trabalho de Masullo et al. (2018), realizado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), os autores utilizaram um molde de metal com diâmetro interno de 35 mm, onde eram colocados 20 g de material, e em uma prensa hidráulica Marcon MPH-15 de 15 t era aplicada uma pressão de 12 t durante 30 s, para se obter uma pressão de compactação de 124,7 MPa.

Silva et al. (2015) utilizaram um molde de inox de 35 mm de diâmetro interno, acoplado a uma prensa de bancada Marconi MA-098/CP, com aplicação de 1.250 kgf/cm², durante 20 s. a amostras de 20 g de biomassa.

A partir desses modelos, elaborou-se um molde formado por tubo, pistão e camisa, que foram acoplados a uma prensa hidráulica da Marcon, modelo MPH15. As peças foram fabricadas em torno mecânico, com aço inox ASTM 304, que é um material de baixo custo e fácil obtenção.

Elaboração das peças

Os desenhos tridimensionais foram elaborados no programa SolidWorks 2014 (Dassault Systèmes S.A., 2013) (Figura 1 A, B e C)

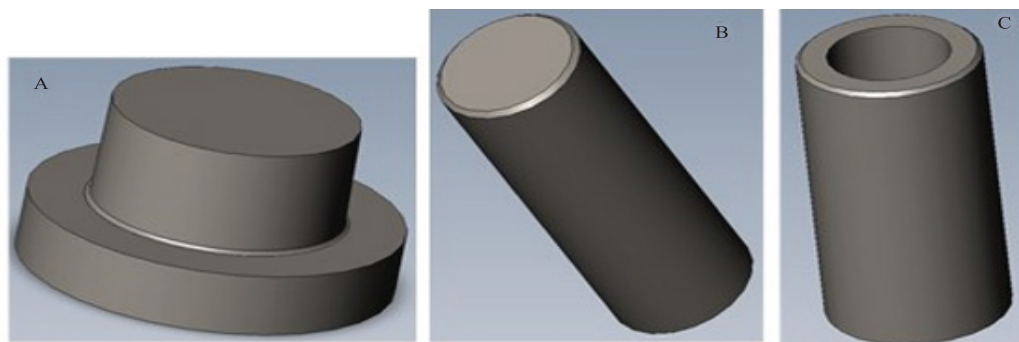


Figura 1. Peças utilizadas no molde briquetador: A, base; B, pistão; C, camisa metálica.

O encaixe do molde briquetador ocorre de forma que a base entra na parte inferior da camisa metálica, a biomassa é adicionada na parte superior da camisa metálica e o pistão fecha o sistema (Figura 2).

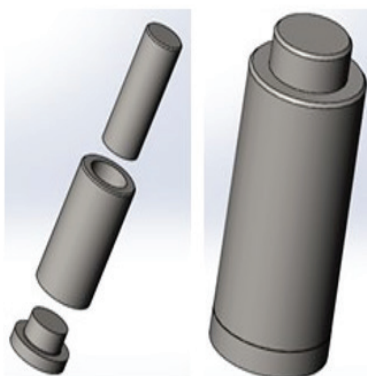


Figura 2. Encaixe das peças que compõem o molde briquetador.

Após testes com os protótipos anteriormente descritos, a geometria do encaixe entre o pistão e a camisa metálica seria cônica e não reto (Figura 3), para evitar que, durante o manuseio, o pistão desacoplasse da camisa metálica e caísse, causando acidentes ou danos à peça.

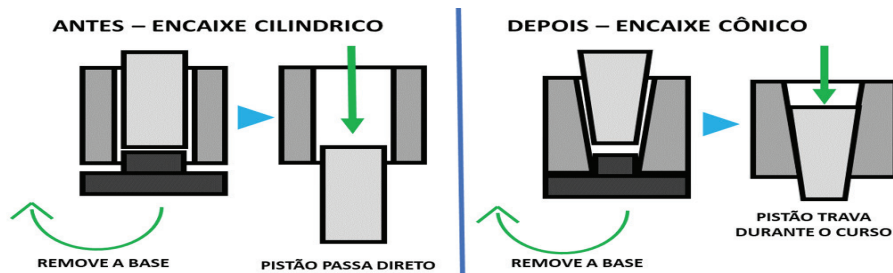


Figura 3. Modificação do encaixe do pistão e camisa metálica de cilíndrico para cônico.

Com essa alteração, o pistão e a camisa metálica são encaixados corretamente, sem o risco de travar. Um chanfro de 2 mm foi adicionado para indicar o lado superior das peças (Figura 4).



Figura 4. Chanfro adicionado ao pistão, para indicar o lado da peça que deve ser voltado para cima.

Foto: João Vitor da Silveira Nunes

Validação da Estrutura

Para garantir o bom funcionamento e segurança, durante o uso do molde briquetador, calcularam-se os fatores de segurança nas três peças, a partir de simulações em elementos finitos por meio do Ansys versão 17.0 (Ansys, Inc., 2016).

O projeto foi feito de maneira que o molde suportasse a tensão realizada pelo carregamento estático, já que a quantidade de vezes que o molde é utilizado ao longo de sua vida útil é bem baixa, tendo-se considerado desnecessário avaliar a falha por fadiga. Os cálculos foram executados para uma carga de 10 t na prensa hidráulica, com uma força vertical de cerca de 100.000 N.

Fator de Segurança

O fator de segurança ou coeficiente de segurança é um valor adimensional que representa a probabilidade de falha de uma estrutura. A falha ocorre quando a peça sofre deformação e perde sua função (Budynas & Nisbett, 2016) ou não consegue mais funcionar adequadamente (Norton, 2013).

Para verificar o comportamento da peça sobre carga estática, a resistência do material é comparada com as tensões a que ele é submetido, que são causadas pela carga aplicada. A resistência é uma propriedade inerente à peça e depende do material e dos tratamentos realizados, enquanto as tensões dependem mais de fatores como a carga aplicada e a geometria da peça (Norton, 2013). Assim, pode-se obter o fator de segurança para carga estática (N) nos materiais dúcteis, pela razão entre a maior tensão de von Mises (σ'), que ocorre na peça, e o limite de resistência ao escoamento (S_y) (Norton, 2013).

Assim, para que uma peça seja segura, o fator deve ser maior que 1, no entanto, normalmente se esperam fatores de segurança maiores, com uma certa margem, para evitar qualquer incerteza ou falha que possa ocorrer (Norton, 2013).

Critério de resistência – limite de escoamento

O valor utilizado para representar a resistência do material é o limite de resistência ao escoamento (S_y) (Figura 5), que é obtido pela curva de tensão vs a deformação obtida em ensaios de tração (Callister & Rethwisch, 2009; Norton, 2013).

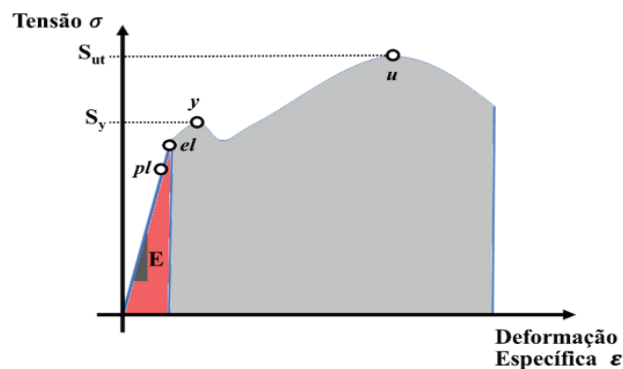


Figura 5. Curva de tensão vs deformação teórica para materiais dúcteis.

Fonte: Norton (2013).

Dentro da região elástica (área vermelha), o material ainda retorna à sua forma original, quando a tensão cessa. A tensão (σ) e deformação (ϵ) nessa região seguem a lei de Hooke, pela qual $\sigma = E \times \epsilon$, em que E é o módulo de elasticidade (Norton, 2013). Em geral, as deformações elásticas em metais só vão até distorções de 5%. No nível atômico, os espaços interatômicos se alteram, mas as ligações atômicas não se modificam (Callister & Rethwisch, 2009). A partir do limite de proporcionalidade (pl), a curva perde sua linearidade e, após o limite elástico (el), o comportamento já entra na região de deformação plástica (área cinza), em que o material se deforma permanente (Norton, 2013). No nível atômico, as ligações se rompem, e novas ligações se formam (Callister & Rethwisch, 2009). Ao chegar no ponto y , a tensão alcança o limite de resistência à tração (S_y), em que o material se deforma muito mais facilmente com a tensão aplicada. Para materiais dúcteis sobre carregamento, o S_y pode ser utilizado como critério de resistência (Norton, 2013).

Tensão equivalente - tensão de von Mises

O objetivo é manter as tensões abaixo do limite admissível, para que as peças não se deformem excessiva e permanentemente. Entretanto, durante um ensaio de tração, o corpo de prova sofre cargas normais, então, o limite de escoamento só leva em conta esforços normais. Para comparar com carregamentos de tensões combinadas, utilizam-se tensões equivalentes, que combinam os efeitos de todas as tensões. Para o caso de materiais dúcteis, em carregamento estático, pode-se utilizar a tensão de von Mises (σ').

A tensão de von Mises leva em conta cargas normais e cisalhantes, em diferentes eixos, e retorna uma única tensão de tração uniaxial, equivalente ao esforço causado por todo o conjunto de tensões. O cálculo da tensão de von Mises para tensões normais (σ_x e σ_y) e cisalhantes (τ_{xy}) (Norton, 2013) está apresentado na equação 1:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

Método de elementos finitos

Em geometrias mais simples, as tensões podem ser obtidas por meio de resoluções analíticas, mas, conforme a complexidade da geometria da peça, pode ser mais prático e preciso obter as tensões por meio de ferramentas computacionais (Norton, 2013). Atualmente, já existe uma variedade de programas de elementos finitos que permitem calcular tensões de modo muito mais preciso e prático do que os métodos convencionais.

As análises de elementos finitos permitem representar o sistema complexo, que é um corpo contínuo, por meio de um sistema formado pelo agrupamento de elementos finitos (Tavares, 1998). Os programas aplicam uma malha sobre a peça, que é o conjunto de elementos discretos conectados através dos nós (Tavares, 1998; Norton, 2013). Assim, para obter o comportamento de fatores como temperatura, deformação ou tensão, como é o caso do presente estudo, ao longo de toda peça, esse valor é calculado em cada um dos elementos, por meio de um sistema de equações diferenciais.

Quando se trata de simulações estáticas, realizam-se simulações lineares, o que significa que as ligações entre os nós do material se deformam segundo a lei de Hooke, e a constante de rigidez não se altera. Os programas podem ainda controlar os elementos da malha, para terem formas tetraédricas ou hexaédricas.

Para estimativas de rigidez e tensão, indica-se utilizar hexaedros de oito pontos e tetraedros de três pontos, para a obtenção de resultados mais precisos (Norton, 2013). Em regiões em que as tensões têm pouca variação, pode ser usada uma malha grosseira com elementos maiores, porém, em regiões em que o gradiente de tensão varia abruptamente, é preciso uma malha mais refinada ou com elementos menores, portanto, é preciso atenção para as áreas onde há concentração de tensão. Conforme a malha se refina, as simulações se tornam mais precisas, porém, mais demoradas. O sinal de que uma malha já foi refinada o bastante é o de que, à medida que se reduzem os tamanhos dos elementos, os resultados começam a convergir. Nesse ponto, não é preciso mais refinar a malha (Tavares, 1998).

Simulação de cada peça

Tanto para a base como para o pistão aplicou-se uma carga vertical de 10.000 N sobre a face superior, enquanto a face inferior foi fixada em um dos eixos (Figuras 6 A e 6 B).

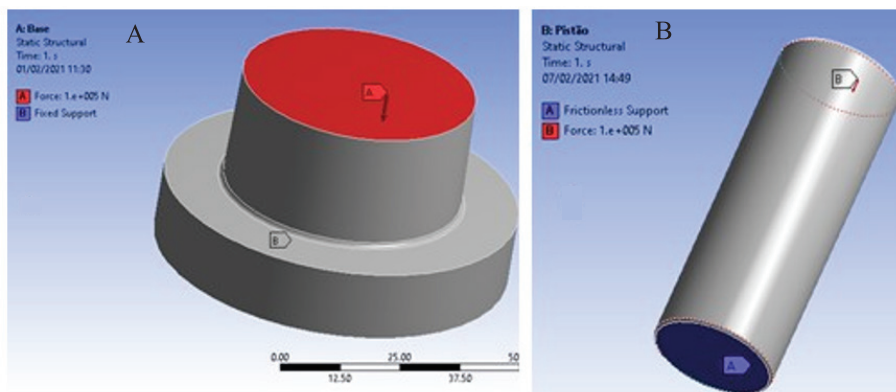


Figura 6. Organização das peças para a simulação: A, base; e B, pistão.

A carga que a camisa metálica recebe nas paredes laterais internas vem do material compactado que forma o briquete. Uma possibilidade para se calcular essa carga é considerar o briquete como um material elástico que, seguindo a constante de Poisson, quando é pressionado e tem sua altura reduzida, expande para as laterais. Com essa deformação, é possível utilizar o módulo de elasticidade para estimar uma tensão que o briquete realiza nas paredes da camisa metálica.

Para avaliação das propriedades mecânicas dos briquetes, utilizaram-se as propriedades de blocos de MDF (*medium density foam*), que são placas formadas por resíduos de madeira com a adição de um aglomerante, as quais são compactadas à alta temperatura e pressão. No trabalho de Ganev et al. (2005), o módulo de elasticidade foi obtido para amostras de MDF em razão da densidade e umidade. A biomassa utilizada como referência nos ensaios experimentais foi o bagaço de cana-de-açúcar, com 10% de umidade. Os briquetes produzidos tinham massa de 10 g, 5 mm de altura e 50 mm de diâmetro, perfazendo uma densidade de 1.018,6 kg m⁻³. O dado mais próximo encontrado na literatura (Ganev et al., 2005) foi o MDF com densidade de 800 kg m⁻³ e umidade de 9,5%, que apresenta módulo de elasticidade de 1.868 MPa para o sentido longitudinal, e 0,26 como coeficiente de Poisson.

A densidade do bagaço de cana in natura é de 160 kg m⁻³ (Silva et al., 2015), logo, a massa de 10 g tem volume de 62,50 cm³, o que para o diâmetro de 50 mm representa a altura de 3,18 cm. Por hipótese, considerou-se que o material antes da compactação tinha as propriedades mecânicas do MDF e que toda a deformação ocorreu na fase elástica.

Sabendo-se que a altura diminuiu de 31,8 mm para 5 mm, foi possível estimar a deformação de engenharia, representada pelo termo ϵ , que é a razão entre a variação de comprimento (Δl) sobre o comprimento inicial (l_0) (Norton, 2013) conforme a equação 2 a seguir:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (2)$$

Na equação 3, está apresentado o coeficiente de Poisson (ν), que é a razão entre a deformação lateral e axial (Norton, 2013). Assim, é possível fazer uma relação entre a deformação na altura do briquete e no diâmetro. Os termos ϵ_x e ϵ_z representam a deformação radial e na altura, respectivamente. A deformação na altura (ϵ_z) foi cerca de 0,84.

$$\nu = \frac{-\epsilon_x}{\epsilon_z} \quad (3)$$

A partir do coeficiente de Poisson proposto (0,26), a deformação no diâmetro (ϵ_x) foi de aproximadamente -0,22. Quando o material se deforma elasticamente numa compressão, a tendência é de que ele se alargue perpendicularmente à carga (Figura 7A e 7B). Comportamento semelhante ocorre com a biomassa ao ser compactada.

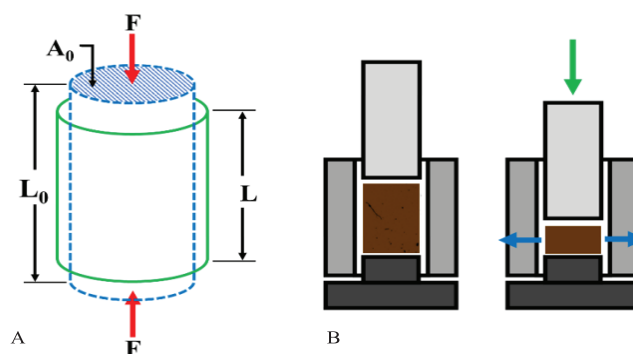


Figura 7. Contração longitudinal e alongação radial ocasionadas por uma carga compressiva (A) e esquema do comportamento do molde (B).

A tensão que o material faz nas paredes laterais pode ser obtida por meio do módulo de elasticidade e da deformação, conforme a equação 4 (Tavares, 1998). A deformação calculada é relativa ao diâmetro; assim, a deformação no raio (ϵ_r) foi de aproximadamente -0,11.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \tag{4}$$

Obteve-se a tensão de 204,7 MPa, na região lateral da camisa metálica em contato com o briquete (Figura 8). No programa, é possível aplicar esse valor de pressão numa área predefinida.

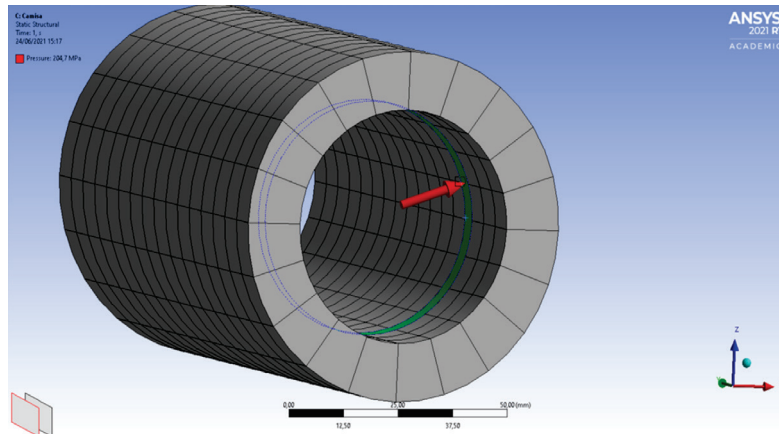


Figura 8. Área lateral interna da camisa metálica tensionada pelo briquete ao sofrer a carga.

Após o cálculo das tensões, os fatores de segurança foram obtidos para cada peça, o que resultou na razão com a tensão de escoamento. Considerou-se o limite de escoamento para o aço inox ASTM 304 com barras recozidas de 241 MPa (Norton, 2013).

Fabricação das peças

A fabricação das peças foi feita com barras redondas de aço inox ASTM 304. As máquinas utilizadas foram um torno mecânico e uma serra elétrica. As matérias-primas, os insumos e a estimativa do tempo de serviço estão descritos para cada etapa (Tabela 1).

Tabela 1. Matérias-primas, insumos e estimativa do tempo de serviço para cada etapa da fabricação do molde briquetador.

Molde inox
Material
Prensa Marcon 15 t
Barra redonda de aço inox 304 Ø3”x180 mm (camisa metálica e base)
Barra redonda de aço inox 304 Ø2”x110 mm (pistão)
Insumos
Broca de centro de 1/8” (3,175 mm)
Broca helicoidal de 1/4” (6,35 mm)
Broca helicoidal de 1/2” (12,7 mm)
Broca helicoidal de 3/4” (19,05 mm)
Broca helicoidal de 1” (25,4 mm)
Lâmina de serra de aço rápido RS-1810-6
Inserto para fresamento SPMT 120408
Serviços
1 hora de corte
5 horas de usinagem

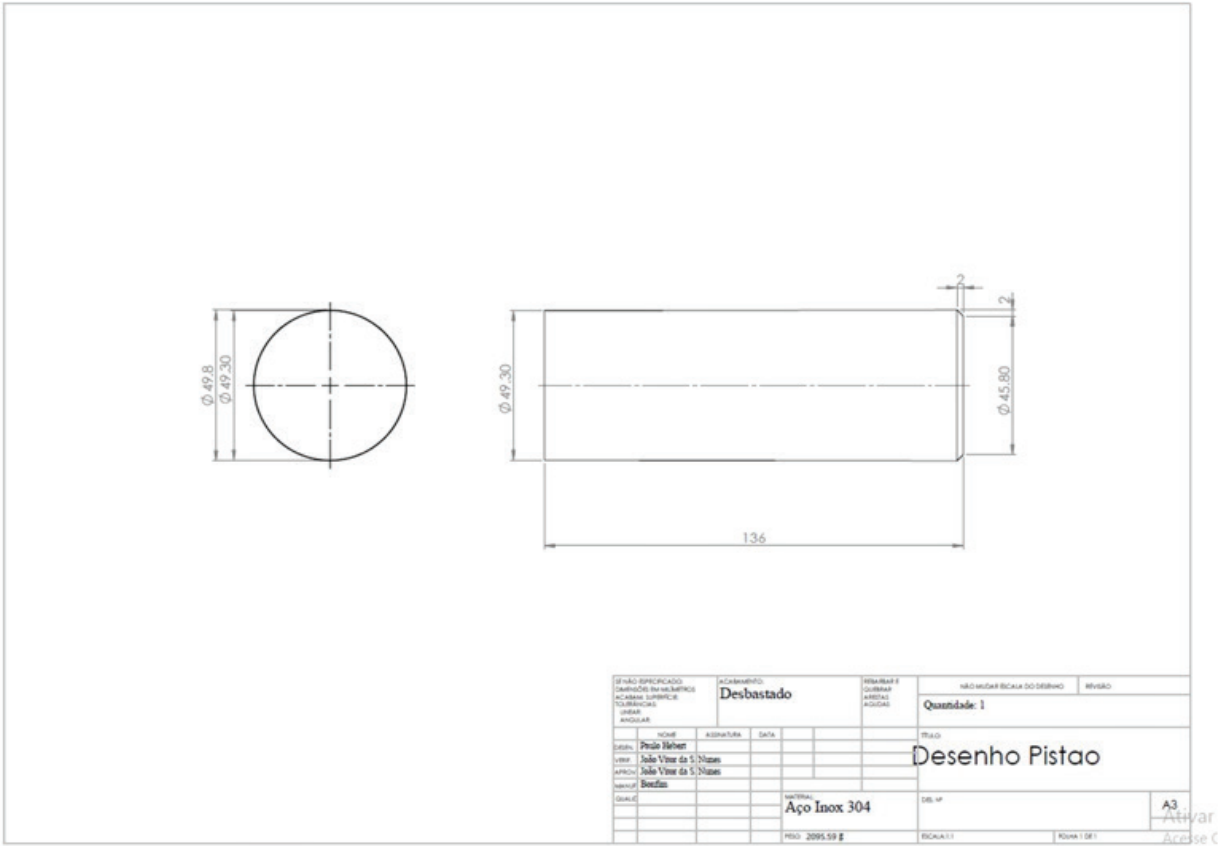


Figura 11. Desenho técnico do pistão.

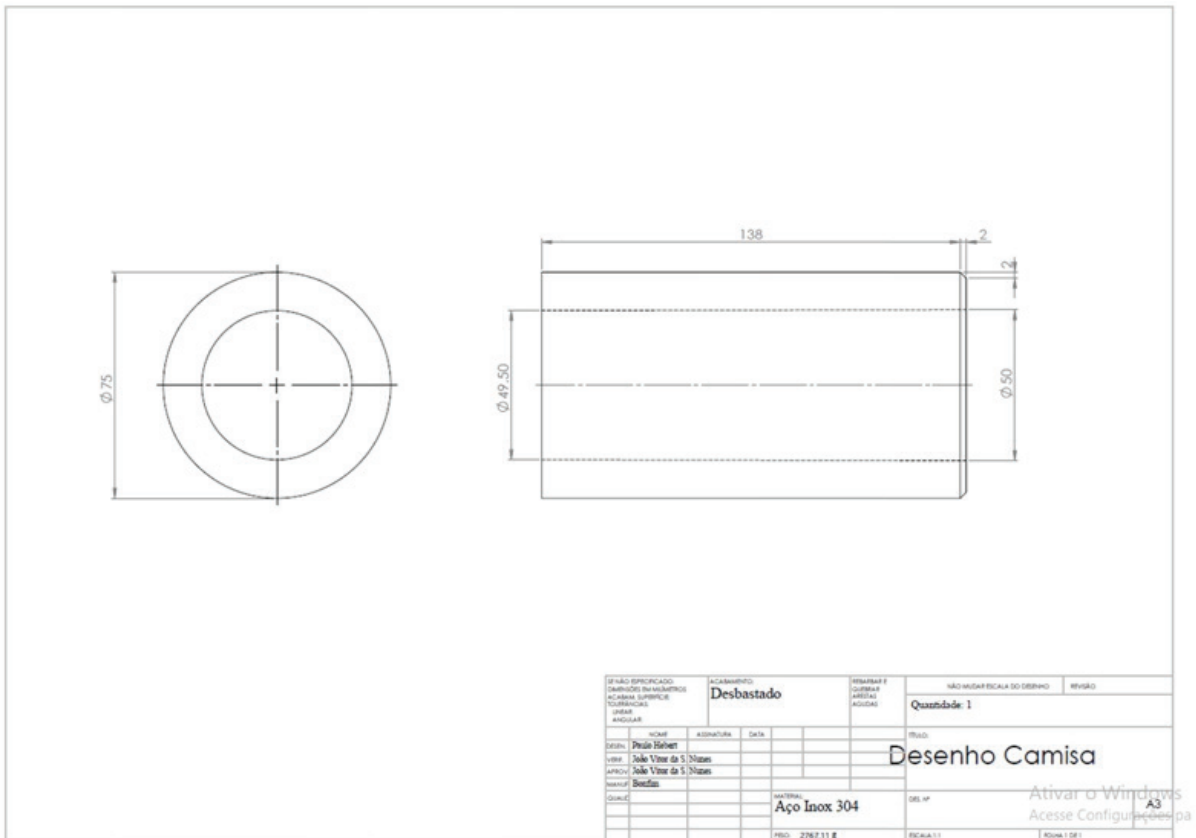


Figura 12. Desenho técnico da camisa metálica.

Simulações em Elementos Finitos

Em todas as peças, foram feitas simulações para a carga estática com convergência de malha, para se obter a tensão máxima de von Mises e o coeficiente de segurança.

Base

Para a base, a tensão de von Mises convergiu próximo à malha de 3 mm, tendo-se obtido 135,55 MPa (Figuras 13 A e 13 B). O fator de segurança foi de 1,7779.

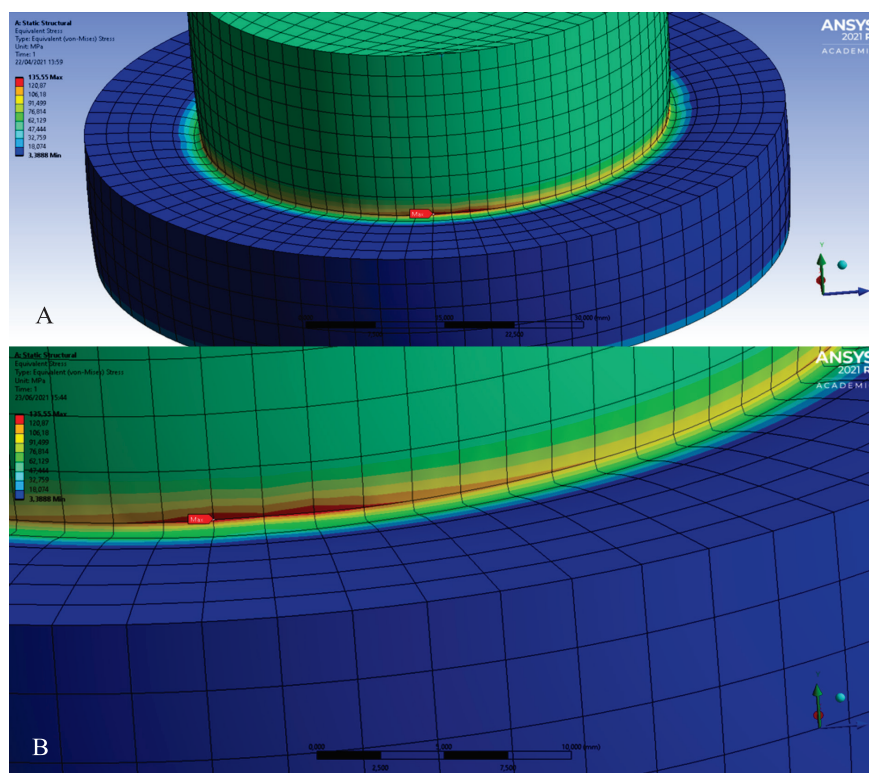


Figura 13. Análise estática da base do molde para malha de 3 mm, com indicação da região com maior concentração de tensão (seta vermelha): A, região completa; e B, expansão da região de maior concentração de tensão.

Seguem exemplos de como é feita a convergência de malha na base (Tabela 2; e Figura 14).

Tabela 2. Resultados da tensão de von mises para a base do molde briquetador.

Malha (mm)	Tensão de von Mises (MPa)
10	115,93
9	120,36
8	123,99
7	128,98
6	130,70
5	135,16
4	132,93
3	135,55

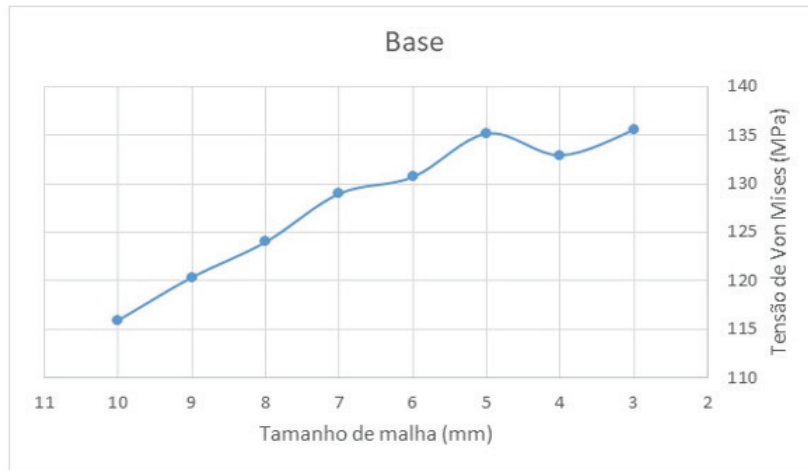


Figura 14. Tensão de von Mises *versus* malha para a base do molde briquetador.

Para o pistão, obteve-se a convergência na malha de 2 mm, com 127,110 MPa (Figura 15 A e 15 B). O fator de segurança foi de 1,8959.

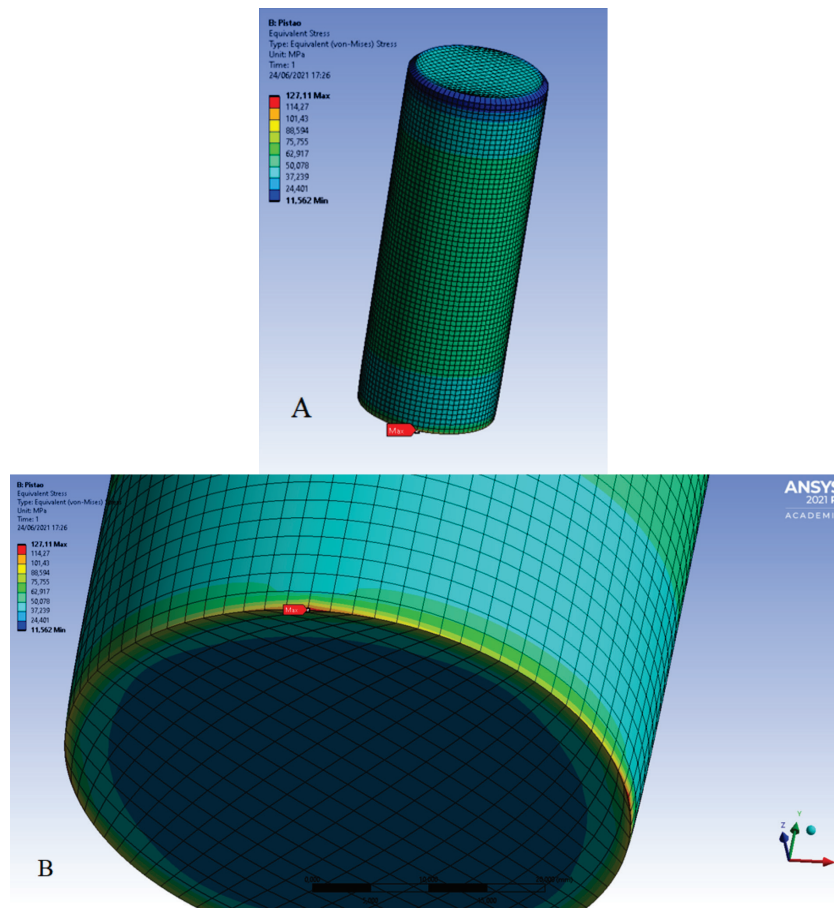


Figura 15. Análise estática do pistão do molde briquetador para malha de 2 mm, com indicação da região com maior concentração de tensão (seta vermelha): A, região completa; e B, expansão da região de maior concentração de tensão.

Para a camisa metálica, obteve-se a convergência na malha de 3 mm, com 182,820 MPa (Figura 16 A e 16 B). O fator de segurança foi de 1,3182.

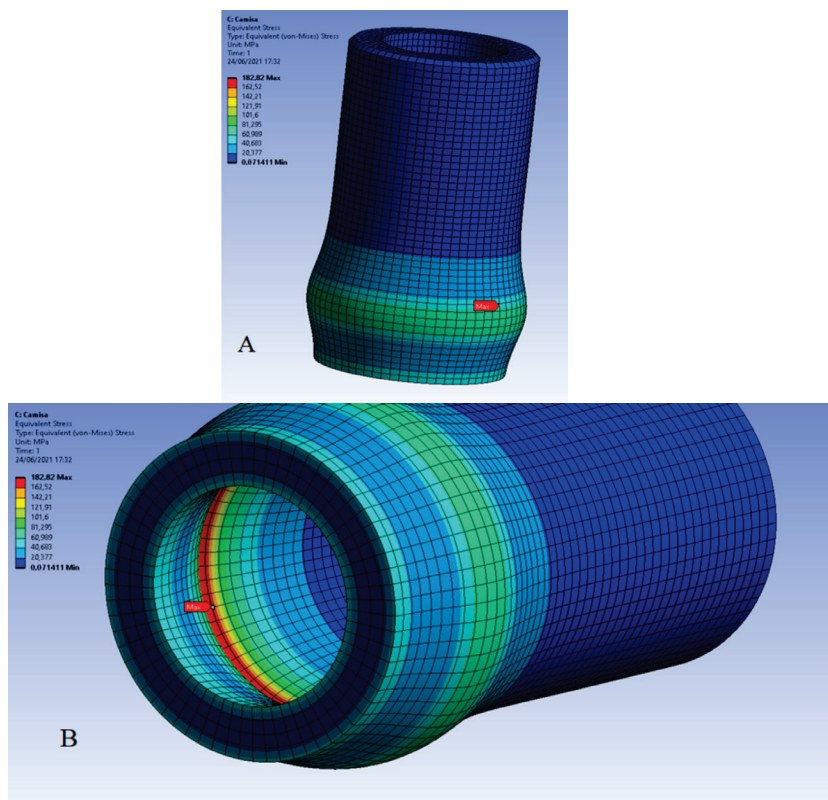


Figura 16. Análise estática da camisa metálica do molde briquetador para malha de 3 mm, com indicação da região com maior concentração de tensão (seta vermelha): A, região completa; e B, expansão da região de maior concentração de tensão.

O fator de segurança considerado para o molde briquetador foi o menor obtido, ou seja, o fator da camisa metálica (1,3182).

Manuseio e cuidados com o molde briquetador

Foram feitos testes com materiais como casca de castanha de caju e bagaço de cana-de-açúcar para atestar a funcionalidade do molde briquetador. A matéria-prima foi previamente seca em estufa até umidade próxima a 10%, parâmetro que assegura uma boa qualidade do briquete (Figura 17A e 17B) estão apresentados.

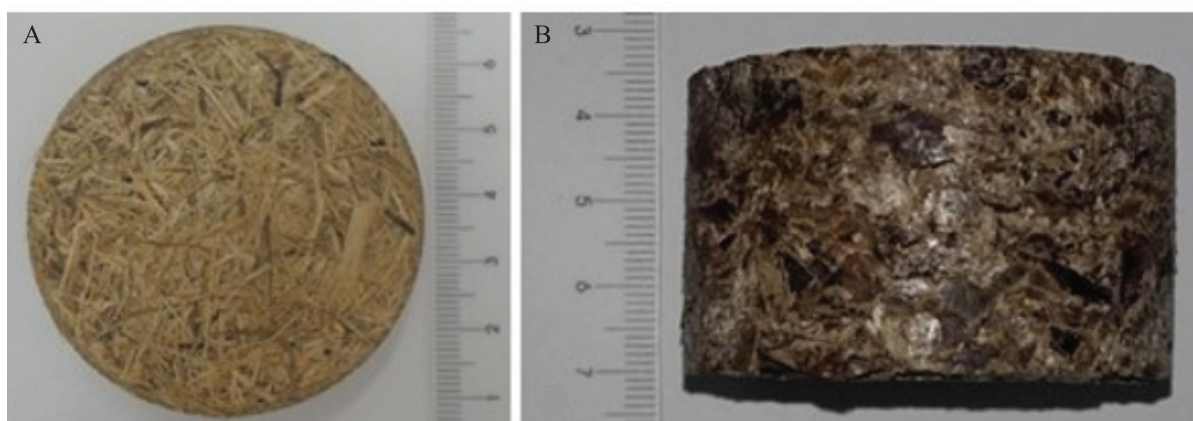


Figura 17. Vista superior de um briquete de bagaço de cana-de-açúcar (A), e vista lateral de um briquete de casca de castanha de caju (B).

Foto: João Vitor da Silveira Nunes

Após alguns testes, elaborou-se um passo a passo para utilização do molde briquetador. Percebeu-se que um período de prensagem maior influenciava a consistência dos briquetes. É provável que, durante a compactação, o atrito do material, ao aumentar a temperatura, tenha causado a diminuição da viscosidade da lignina, que se espalhou pelo material agindo como um aglomerante que se solidificou na retirada do briquete do molde ao resfriar. Utilizou-se o tempo de compactação apresentado no trabalho de Barros (2012), que foi 5 min de prensagem, seguido do resfriamento após remover o briquete do molde. Um resumo do passo a passo elaborado está descrito para o molde briquetador (Figura 18).

• **Passo a passo briquetagem:**



Figura 18. Etapas para utilização do molde briquetador.

Fotos: João Vitor da Silveira Nunes

Após a utilização do molde briquetador, convencionou-se limpar as peças com álcool etílico e papel toalha. Assim foram removidos quaisquer resíduos de óleo que poderiam contaminar as próximas amostras e partículas que entrassem nas folgas, que são bastante estreitas, principalmente em razão do encaixe cônico.

Manutenções do molde briquetador

Além da limpeza após cada utilização, indica-se não ultrapassar a carga de 10 t estipulada nas simulações. Caso seja alterada a geometria da peça, indica-se realizar o mesmo procedimento para obter o novo fator de segurança e a carga máxima permitida. Como consequência do ajuste estreito das peças, pancadas ou quedas, principalmente nas bordas, podem impedir o encaixe ou arranhar as faces cilíndricas durante o uso.

Além disso, como o encaixe do pistão e a camisa metálica são cônicos, as peças devem ser encaixadas com os lados corretos, conforme apresentado (Figura 3). Uma vantagem do formato cilíndrico das peças é que, além de facilitar a fabricação, a manutenção das peças é mais simples, pois a maioria das falhas podem ser resolvidas com o uso da própria prensa ou o de um torno mecânico.

As falhas que ocorreram ao longo do uso do molde briquetador, suas possíveis causas e os procedimentos de manutenção corretiva estão descritos a seguir (Tabela 3).

Tabela 3. Falhas que ocorreram ao longo do uso do molde briquetador, possíveis causas e procedimentos de manutenção corretiva.

Falha	Possível causa	Procedimento de manutenção corretiva
- Peças não se encaixam.	- Carga excessiva. - Quedas e pancadas nas peças.	- Rotacionar a peça em um torno mecânico; usar um papel lixa para desbastar levemente os diâmetros das peças até que elas se encaixem novamente.
- Peças travadas.	- Entrada de material entre as peças. - Usar o tubo e a camisa metálica nas posições contrárias das indicadas. - Pressionar o pistão no tubo além do necessário, quando remover o briquete.	- Não se deve martelar materiais duros diretamente sobre as peças, pois isso poderá danificá-las. - Fixar a camisa metálica em uma morsa. Em seguida, usar uma barra de technyl ou nylon, com diâmetro menor do que o pistão, e um martelo. Usar a barra como estaca e, com o martelo, empurrar a peça para remover da camisa, no sentido contrário ao movimento que causou a interferência. O pistão deverá sair pela parte de cima da camisa. No caso da base travada esse procedimento resolve a maioria dos casos. - Caso não se solucione para o pistão, posicioneo na prensa, de cabeça para baixo, deixando as sapatas separadas com espaço para saída do pistão e, usando a barra de plástico como apoio, pressione gradualmente o pistão até removê-lo da camisa metálica.

CONCLUSÃO

Desenvolveu-se um molde briquetador em escala de bancada, de fácil manuseio e de baixo custo em comparação aos equipamentos de briquetagem para laboratório comercializados. A descrição apresentada mostra de modo simples a reprodução do projeto construtivo do molde, inclusive com a possibilidade de alterações das medidas e pressões de briquetagem. Por meio das simulações de elementos finitos atestou-se a segurança do molde dentro das cargas estipuladas. Assim, entende-se que o presente trabalho poderá contribuir para a expansão da pesquisa na temática briquetes e na investigação do potencial de biomassas, para o desenvolvimento de biocombustíveis sólidos.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 406697/2013-2, 459355/2014-7, 308280/2017-2 e 313647/2020-8), à Coordenação de Pessoal de Nível Superior (Capes, Código 001), à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento (Funcap - AEP-0128-00220.01.00/17 e DEP0164-00195.01.00/19) e à Financiadora de Estudos e Projetoo (Finep), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, INC. **Ansys 17.0**. [Canonsburg], 2016.
- ARÉVALO, J.; QUISPE, G.; RAYMUNDO, C. Sustainable energy model for the production of biomass briquettes based on rice husk in low-income agricultural areas in Peru. **Energy Procedia**, v.141, p.138-145, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.026>.
- BARROS, L. de O. **Densidade energética de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas**. 2012. 37p. Trabalho (Graduação) - Universidade de Brasília, Brasília.
- BONFATTI JÚNIOR, E.A.; LENGOWSKI, E.C.; TAKAHASHI, V.M.; ADUR, G.M.; SILVA, D.A. da; KLOCK, U.; ANDRADE, A.S. de; VENSON, I.; MUÑIZ, G.I.B. de. Briquetagem dos resíduos dos processamentos mecânico e químico de *Pinus* spp. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v.36, e26522, 2019. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2019.v36.26522>.
- BUDYNAS, R.G.; NISBETT, J.K. **Elementos de máquinas de Shigley**. 10.ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- CALLISTER JR., W.D.; RETHWISCH, D.G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 9th ed. New York: J. Wiley & Sons, 2009.
- DASSAULT SYSTÈMES S.A. **SolidWorks 2014**. Version 22. [Vélizy-Villacoublay], 2013.
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.30, p.219-230, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2003.10.004>.
- GANEV, S.; GENDRON, G.; CLOUTIER, A.; BEAUREGARD, R. Mechanical properties of MDF as a function of density and moisture content. **Wood and Fiber Science**, v.37, p.314-326, 2005.
- GIODA, A. Residential fuelwood consumption in Brazil: environmental and social implications. **Biomass and Bioenergy**, v.120, p.367-375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.014>.
- LIMA, R.N.; PAIXÃO, R.L.; MARQUES, R.B.; MALVEIRA, J.Q.; FURTINI, J.A.O.; RIOS, M.A. de S. Investigação do potencial do talo e da palha da carnaúba para utilização como biocombustível. **Matéria**, v.24, e12375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0690>.
- MASULLO, L.S.; SANT'ANNA, A.L.; SILVA, D.A. da; QUADROS, T.M.C.; PÁDUA, F.A. de; YAMAJI, F.M. Uso de blendas contendo diferentes proporções de palha e bagaço de cana-de-açúcar para produção de briquete. **Revista Virtual de Química**, v.10, p.641-654, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180047>.
- MITCHELL, E.J.S.; GUDKA, B.; WHITTAKER, C.; SHIELD, I.; PRICE-ALLISON, A.; MAXWELL, D.; JONES, J.M.; WILLIAMS, A. The use of agricultural residues, wood briquettes and logs for small-scale domestic heating. **Fuel Processing Technology**, v.210, art.106552, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106552>.
- NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- PONTE, M.R.; GADELHA, A.M.T.; MACHADO, Y. de L.; LOPES, A.A.S.; MALVEIRA, J.Q.; MAZZETTO, S.E.; LOMONACO, D.; RIOS, M.A. de S. Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos. **Matéria**, v.24, e12372, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0687>.
- PUROHIT, P.; TRIPATHI, A.K.; KANDPAL, T.C. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues. **Energy**, v.31, p.1321-1331, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.06.004>.
- RAJU, CH.A.I.; PREM, K.; SUNIL, K.; SRIKANTH BHIMAREDDY, K.; RAMYA, CH. Studies on densification and conversion of wastes as fuel briquettes for power generation. **Materials Today: Proceedings**, v.44, part 1, p.1090-1107, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.184>.
- SHUMA, R.; MADYIRA, D.M. Production of loose biomass briquettes from agricultural and forestry residues. **Procedia Manufacturing**, v.7, p.98-105, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.026>.
- SILVA, C.A. **Estudo técnico-econômico da compactação de resíduos madeireiros para fins energéticos**. 2007. 68p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SILVA, D.A. da; YAMAJI, F.M.; BARROS, J.L. de; ROZ, A.L. da; NAKASHIMA, G.T. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Revista Floresta**, v.45, p.713-722, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5380/rev.v45i4.39700>.
- SOUZA, F. de; VALE, A.T. do. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.36, p.405-413, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879>.
- TAVARES, J.M.R.S. **Comunicação interna: introdução ao Método de Elementos Finitos**. Porto: Universidade do Porto, 1998. 103p.