

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE BRIQUETES DE RESÍDUOS DE BIOMASSA PARA UTILIZAÇÃO EM PROCESSOS METALÚRGICOS*

Marie Borowycz¹
Saulo H. Freitas Seabra da Rocha²
Tina Steinmetzger³
Daniel Bruns⁴
Leandro Rocha Lemos⁵
Guilherme B. Michelin Assunção⁶
Guilherme Liziero Ruggio da Silva⁷

Resumo

Existe uma grande quantidade de resíduos de biomassa não utilizados no Brasil e na Alemanha. Uma forma de reaproveitar esse material é utilizá-lo para a produção de biocoque. Para isso os resíduos de biomassa, quando briquetados, devem possuir uma resistência adequada. Essa resistência é obtida através dos processos de aglomeração e pirólise. O biocoque possui um potencial para atuar como substituto parcial do coque mineral utilizado na siderurgia. Esse estudo enfatiza materiais como madeira, palha e bagaço de cana-de-açúcar que são um dos principais resíduos presentes no Brasil e na Alemanha. O objetivo é avaliar a influência de diversos parâmetros com o intuito de elevar a resistência mecânica do briquete de biomassa, sem a necessidade da adição de ligante. Os valores de pressão usados na produção dos briquetes foram 100, 200, 300 MPa, as porcentagens de umidade foram 0 e 15% e a temperatura de 23, 60 e 90°C. A resistência mecânica é analisada através de testes de tamboramento e de resistência à compressão. Foi concluído que a pressão, a umidade e a temperatura possuem um grande impacto na resistência mecânica e devem ter seus valores selecionados de forma adequada, de acordo com a biomassa escolhida.

Palavras-chave: Briquetagem; Biomassa; Resistência mecânica; Teste de tamboramento, Teste de resistência a compressão.

IMPACT PARAMETERS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF BIOMASS RESIDUAL BRIQUETTES FOR FURTHER UTILIZATION WITHIN METALLURGICAL PROCESSES

Abstract

There is an enormous quantity of unused biomass residues in Brazil and Germany. A possibility is the use as biocoke for blast furnace, biomass residues need to have a high strength, achieved by agglomeration and pyrolysis. Biocoke itself has a great potential for substituting partially the mineral coke used in the iron and steelmaking industry. This study focuses on wooden and straw like materials as sugar cane bagasse that reflects the main sources of residues in Brazil and Germany. The objective is to analyze the impact of various parameters, in order to elevate the mechanical strength of a biomass briquette without addition of artificial binder. The impact parameters are the pressure utilized in the making of the briquettes (100, 200, 300 MPa), as well as the variation of the moisture content (approx. 0 – 15%) and the temperature (23 °C, 60 °C, 90 °C). The mechanical strength is tested by tumbling and by the tensile splitting strength. It was asserted, that pressure, moisture content and temperature having a great impact on the mechanical strength and must be chosen wisely according to other conditions that occur in the material.

* Contribuição técnica ao 48º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 04 de outubro de 2018, São Paulo, SP, Brasil.

Keywords: Briquetting; biomass; mechanical strength; tumbling test; tensile splitting strength.

- ¹ *Graduanda, B. Sc, Assistente de pesquisa, Departamento de Sistemas e gestão de Energia, HochschuleRuhr West, UniversityofApplied Science, Bottrop, Alemanha.*
- ² *Professor, Prof. Dr. –Ing, Departamento de Sistemas e gestão de Energia, HochschuleRuhr West, UniversityofApplied Science, Bottrop, Alemanha.*
- ³ *Mestranda, M.Sc, Assistente de Pesquisa, Departamento de Sistemas e gestão de Energia, HochschuleRuhr West, UniversityofApplied Science, Bottrop, Alemanha.*
- ⁴ *Assistente Técnico, Departamento de Sistemas e gestão de Energia, HochschuleRuhr West, UniversityofApplied Science, Bottrop, Alemanha.*
- ⁵ *Professor Adjunto, Doutor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.*
- ⁶ *Graduando, Assistente de Pesquisa, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.*
- ⁷ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Engenheiro na Área de Redução, Gerdau, Ouro Branco, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Em uma era de mudanças de condições climáticas e também de escassez de recursos, é de responsabilidade da sociedade reduzir o consumo de energia e de emissões de agentes poluidores. Mesmo com o crescimento de fontes renováveis de energia, a quantidade de energia demandada cresce e as indústrias ainda necessitam do uso de combustíveis fósseis [1].

A indústria siderúrgica é a indústria que mais consome energia. A produção de aço utiliza aproximadamente 6% de toda a energia produzida, havendo também uma crescente demanda por energia nessa indústria. Cerca de 1,61 Mt de aço bruto foram produzidos em 2016, sendo que a maior aplicação desse aço é no setor de construção [1, 2, 3, 4, 5].

No processo de produção de ferro-gusa e aço é necessária uma grande quantidade de carvão mineral para a produção do coque, que é usado como agente redutor, fonte de calor e estrutura de suporte no alto-forno [6]. O coque é obtido através da destilação do carvão mineral, processo que resulta em um material constituído principalmente de carbono fixo (~88 %), cinzas (~10 %) e material volátil (<1%) [7].

Os problemas gerados devido às emissões de poluentes pelas indústrias siderúrgicas, incluindo todos os processos realizados, são responsáveis por 7% do total de CO₂ emitido no mundo [8]. Cada tonelada de produto final de aço gera cerca de 1,5 t de CO₂, e a maior parte das emissões (cerca de 65%) ocorre nas etapas de coqueificação e produção de ferro-gusa em alto-forno [3 - 9].

O uso de combustíveis fósseis e a emissão de CO₂ podem ser drasticamente reduzidos pela utilização de biomassa na produção de coque. A maioria da biomassa é proveniente de setores da agricultura, sendo preferencialmente utilizada em processos de reciclagem. A biomassa pode ser também empregada em processos de reciclagem destinados a obtenção de energia por meios termoquímicos e bioquímicos [10, 11, 12]. As biomassas mais indicadas para uso na produção de briquetes são materiais como resto de madeira e palha, ricos em lignina, que age como um ligante orgânico [11, 13].

Na Alemanha existe cerca de 50 Mt de biomassa não utilizada, incluindo 15 Mt de palha juntamente com outros materiais como restos de madeira [14, 15]. No Brasil, a quantidade de biomassa não utilizada é muito maior, cerca de 600 Mt, no qual a grande maioria (150 Mt) são resíduos provenientes da produção de cana-de-açúcar [16, 17].

Assim, existe uma quantidade considerável de resíduos de biomassa no Brasil e na Alemanha disponível para uso na siderurgia e na utilização como substituto parcial do carvão mineral na produção de coque. A biomassa selecionada para essa aplicação deve ser aglomerada com o propósito de aumentar sua densidade. O briquete de biomassa precisa possuir a maior resistência mecânica possível, para que depois do processo de pirólise ele permaneça estável durante o armazenamento, o manuseio e utilização no alto-forno, de modo a servir o mesmo propósito do coque. Para melhorar a resistência mecânica do briquete, os parâmetros como pressão, umidade e temperatura devem ser variados de modo a identificar as condições ideais para a produção do briquete de biomassa antes da pirólise. A resistência mecânica dos briquetes é testada através de ensaios de tamboramento e de compressão.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e métodos

2.1.1 Amostragem e preparação das amostras

Os materiais utilizados foram: Aparas de madeira, lascas de madeira, bagaço de cana-de-açúcar brasileiro denominado “Maity”, e dois tipos de cana-de-açúcar provenientes do Quênia. Um dos tipos foi desfiado, lavado e secado ao ar (denominado cana-de-açúcar desfiado). O outro tipo foi desfiado, lavado, desfiado novamente e secado ao ar (denominado pedaço de cana-de-açúcar).

Todos os materiais, antes de serem utilizados para a briquetagem, foram cominuídos em um triturador para um tamanho de partícula inferior à 2 mm.

2.1.2 Equipamento

O processo de briquetagem e o posterior teste de resistência à compressão foram efetuados através de um equipamento de teste universal ou “*universal testing machine*” (UTM). As forças aplicadas podem ser ajustadas de modo que um exato valor de pressão é utilizado na produção dos briquetes. Os briquetes cilíndricos foram produzidos um por um através do uso de matrizes com 30 mm de diâmetro. A velocidade do equipamento também pode ser ajustada de modo a determinar a força que conduz à fratura do briquete no teste de compressão. Um forno muflafoi utilizado para aquecer as matrizes e o material para os testes que envolviam tratamento térmico.

2.1.3 Composição química das amostras

Os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram obtidos através de análises elementares baseadas na detecção de condutividade térmica. O teor de cinza foi analisado de acordo com a norma DIN EN ISO 18122 (550 °C). O teor de umidade e materiais voláteis foram determinados de acordo com as normas DIN EN ISO 18134 (105 °C) e DIN EN ISO 18123 (900 °C), respectivamente. Um calorímetro de isoperibol foi utilizado para identificar o poder calorífico das amostras. Para obter resultados que permitam mais fácil comparação, todas as análises, exceto a de teor de umidade, foram efetuadas com amostras totalmente secas.

2.1.4 Variação de parâmetros

Para analisar o impacto da pressão em conjunto com a variação de outros parâmetros, todos os testes foram efetuados usando três diferentes pressões: 100, 200 e 300 MPa.

O teor de umidade foi modificado de acordo com a porcentagem necessária. A variação nesse teor deve ser realizada, de modo a obter informação acerca do comportamento da resistência mecânica dos briquetes, devido à presença de umidade.

Ligantes orgânicos como lignina amolecem em temperaturas e pressões elevadas. O valor exato da temperatura de transição vítrea depende de um variável número de condições, como teor de umidade. Dois valores de temperatura foram selecionados (60 e 90°C), sendo inferiores a temperatura na qual ocorre a degradação química.

2.1.5 Teste de tamboramento

O teste de tamboramento, utilizado para determinar a resistência mecânica, é baseado na norma DIN EN ISO 17831-2, porém em menor escala e com algumas variações. O tambor utilizado possui 4 aletas internas e opera a uma velocidade de 25 +/- 1 rpm. O teste consistiu na utilização de 3 briquetes com diâmetro de 30 mm cada, submetidos a 100 rotações. Através da equação (1), é obtido o valor da resistência mecânica.

$$DU = \frac{m_A}{m_B} * 100(1)$$

Onde:

DU = Resistencia mecânica [%]

m_A = Massa passante na peneira de 16 mm após o tamboramento [g]

m_B = Massa passante na peneira de 16 mm antes do tamboramento [g]

2.1.6 Teste de resistência a compressão

O ensaio de compressão foi baseado em um método brasileiro chamado “DiametricalCompression Test” [18], “DynamicBraziliantest” ou “Dynamiccylindertest” [19]. Esses ensaios foram realizados para determinar a resistência à compressão dos briquetes, seguindo a equação (2). O briquete é posicionado entre dois discos que atuam de forma a comprimi-lo com uma velocidade de 10 mm/min até que a primeira trinca ocorra. A força responsável pelo surgimento da trinca na amostra pode ser determinada de acordo com a **figura 1**. Por fim, o briquete irá fraturar diametralmente [18].

$$\sigma_{bz} = \frac{(2 * F_{bz \max})}{(\pi * h_{briq} * d_{briq})} (2)$$

Onde:

σ_{bz} = Resistência a compressão do método brasileiro [N/mm²]

F_{bz} = Força de ruptura [N]

h_{briq} = Altura do briquete [mm]

d_{briq} = Diâmetro do briquete [mm]

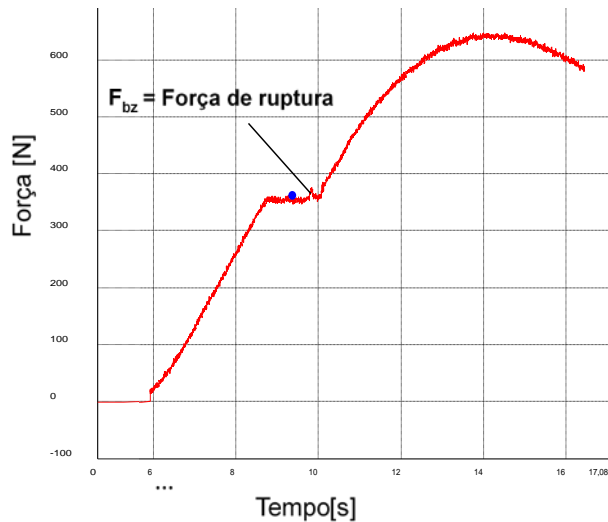


Figura 1: Força de ruptura no ensaio de compressão.

2.2 Resultados e discussões

2.2.1 Composição química das amostras

As composições químicas de todos os cinco materiais foram avaliadas e estão mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Composição química de todos os materiais utilizados

	Aparas de madeira	Lascas de madeira	Bagaço (Maity)	Cana-de-açúcar desfiada	Pedaço de cana-de-açúcar
Carbono[%]	49,070	48,932	47,160	48,178	48,054
C _{fix} [%]	14,02	16,12	15,18	14,50	13,11
Cinzas [%]	0,16	1,64	2,61	1,57	1,10
Umidade [%]	7,0	10,0	5,5	7,0	7,0
Material volátil [%]	85,82	82,24	82,21	83,92	85,79
Valor calorífico [MJ/kg]	20,06	21,16	18,69	18,89	18,76
Hidrogênio [%]	6,054	6,790	5,920	6,532	6,525
Nitrogênio [%]	0,100	0,272	0,207	0,276	0,171
Enxofre [%]	0,000	0,019	0,000	0,040	0,025

2.2.2 influência da pressão

A pressão utilizada para a produção das amostras durante o processo de briquetagem é um dos fatores que mais influenciam na resistência mecânica do briquete. O objetivo do processo de briquetagem é promover a redução do volume, gerando um aglomerado comprimido e estável. Há o rearranjo de partículas devido ao movimento do pistão, a ocorrência da deformação elástica e por fim a deformação plástica.

Pressões maiores aplicadas conduzem a um aumento na resistência, tanto na durabilidade quanto na compressão. A curva obtida não é linear, mas possui uma aproximação exponencial que tende a se estabilizar como mostrado na **figura 2**. A razão dessa estabilização é a existência de uma pressão máxima, em que qualquer valor superior não acarreta uma alteração considerável no volume [20].

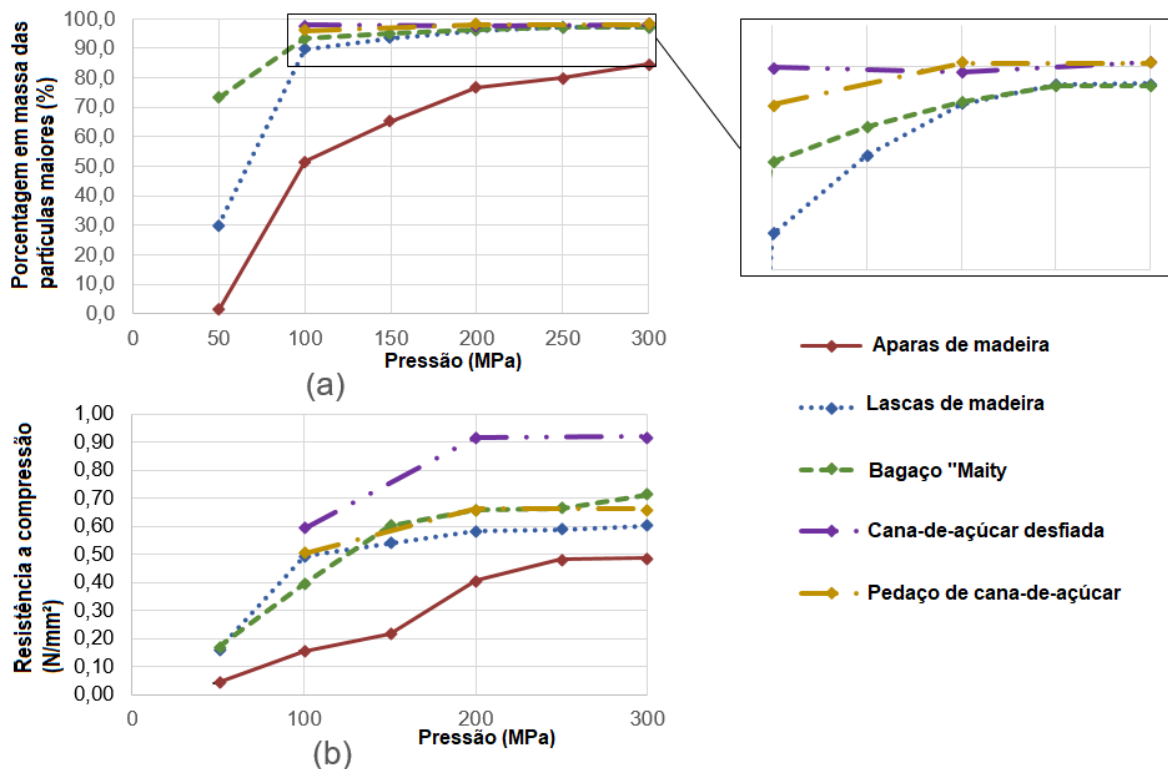


Figura 2: Resistência mecânica - variação da pressão: (a) Teste de tamboramento, (b) teste de compressão.

2.2.3 Influência do teor de umidade

A porcentagem de umidade é um parâmetro importante no processo de briquetagem, uma vez que também afeta na resistência mecânica do briquete. Os três tipos de materiais testados não se comportaram de forma semelhante, durante a variação da pressão aplicada e do teor de umidade como mostrado na **figura 3**. O bagaço "Maity" age como o material mais resistente tanto no teste de tamboramento, quanto no teste de compressão. O percentual de umidade do bagaço "Maity" não afeta consideravelmente o valor obtido para a resistência mecânica, da mesma forma que ocorre para as outras biomassas. Lascas de madeira, com teor de umidade em cerca de 10 %, se aproximou do valor obtido para o bagaço "maity", mas apresentou um grande faixa entre o melhor e o pior resultado, quando menores valores de pressão foram utilizados. Quando foi usado 100Mpa, o valor obtido pelo teste de tamboramento variou entre 0% (amostra seca) até 90% (amostra contendo umidade original) e a resistência à compressão variou de 0,075 até 0,5 N/mm².

Todos os materiais possuem um grande faixa em relação ao valor obtido para resistência mecânica quando pequenos valores de pressão são utilizados. No entanto essa faixa tende a convergir à medida que a pressão é aumentada. Com o aumento da pressão, a resistência mecânica de todos os briquetes aumenta, exceto para os materiais sem umidade. Com a ausência de interação entre a água e as partículas, não ocorrem ligações de hidrogênio, forças interfaciais e capilares e, com isso, a resistência do material é inferior. Por outro lado, se a quantidade de umidade for muito elevada, os briquetes se tornam frágeis, uma vez que há a diminuição considerável das interações do tipo Van der Waals, que decresce à medida que a distância entre as partículas aumenta.

O teor de umidade adequado depende do tipo de material, sua composição química e outros parâmetros, mas como mostrado na figura 3, a quantidade original de umidade (entre 5 a 10 %) é a que garante melhores resultados. Existe um valor ótimo entre 5 e 12%, e para materiais à base de madeira esse valor é de aproximadamente 8% [21]. Existe um máximo entre 12 a 14%, e para briquetes cilíndricos esse valor é de 15 % [22,23]. Se o percentual de umidade é superior a 15%, haverá um decréscimo na densidade e conseqüentemente na resistência mecânica dos briquetes cilíndricos produzidos com uso de pressões iguais ou inferiores a 15Mpa [24].

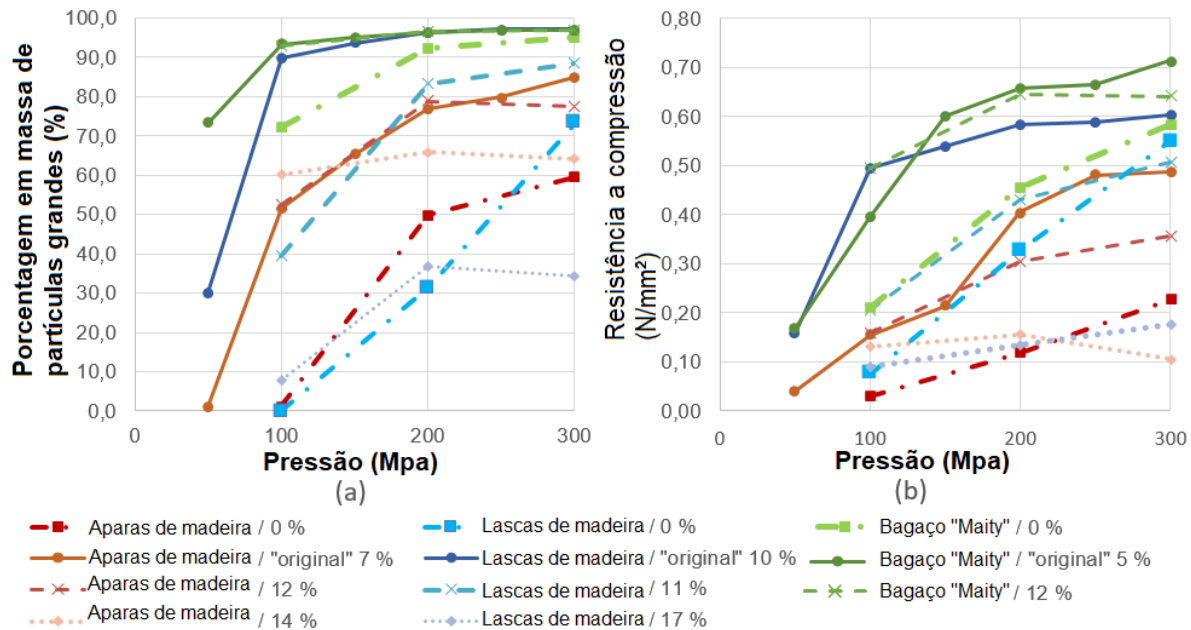


Figura 3: Resistência mecânica – variação de umidade: (a) teste de tamboramento, (b) teste de compressão.

2.2.4 Influência da temperatura

A resistência mecânica dos briquetes também foi afetada pela temperatura do material e da matriz. Um aumento na temperatura conduz aumento da resistência mecânica, como mostrado na **Figura 4**. Todos os materiais testados apresentam uma maior resistência mecânica, se a temperatura for elevada a partir da temperatura ambiente (23 °C) até 60 °C. O emprego de uma temperatura de cerca de 90 °C ocasiona menores alterações na resistência da amostra. Em alguns casos houve um pequeno decréscimo na resistência mecânica para os briquetes à base de lascas de madeira e bagaço “Maity” nos testes de tamboramento. Por outro lado, a resistência a compressão desses dois tipos de briquetes teve um pequeno aumento. Durante o teste de tamboramento, a maioria dos materiais apresentam características similares, mas durante o teste de compressão tem-se que os briquetes à base de cana-de-açúcar desfiada apresentam os melhores resultados. Tal fato se justifica devido a composição química desse material. Materiais ricos em lignina, proteína e amido são beneficiados no processo de briquetagem e aumento de resistência. Essas moléculas agem como ligantes orgânicos que são ativados em temperaturas mais altas. A lignina possui uma temperatura de transição vítrea próxima de 140 °C (esse valor decresce quando os parâmetros de pressão e

umidade são variados). Em testes realizados em estudos prévios, em temperaturas de 85 °C, utilizando 150 MPa e 9 % de umidade, uma etapa de preaquecimento anterior a briquetagem foi responsável por uma maior densificação da biomassa, havendo posterior aumento da resistência mecânica [25].

A temperatura de ativação dos ligantes naturais não é fixa, e como constatado anteriormente ela depende de um número de condições. Dessa forma o amolecimento dos ligantes naturais e a formação de pontes sólidas já ocorre na temperatura de 60 °C. Em 90 °C já não há um efeito tão significativo. Um aumento para temperaturas ainda maiores, como 110 °C, conduziram a degradação química do material, o que alteraria completamente a sua resistência mecânica [23]. Com o intuito de melhorar a produtividade, um preaquecimento em temperaturas um pouco superiores à temperatura ambiente (não muito elevadas a ponto de atingir a temperatura de transição vítrea), podem ser efetuado individualmente para cada tipo de material a ser briquetado.

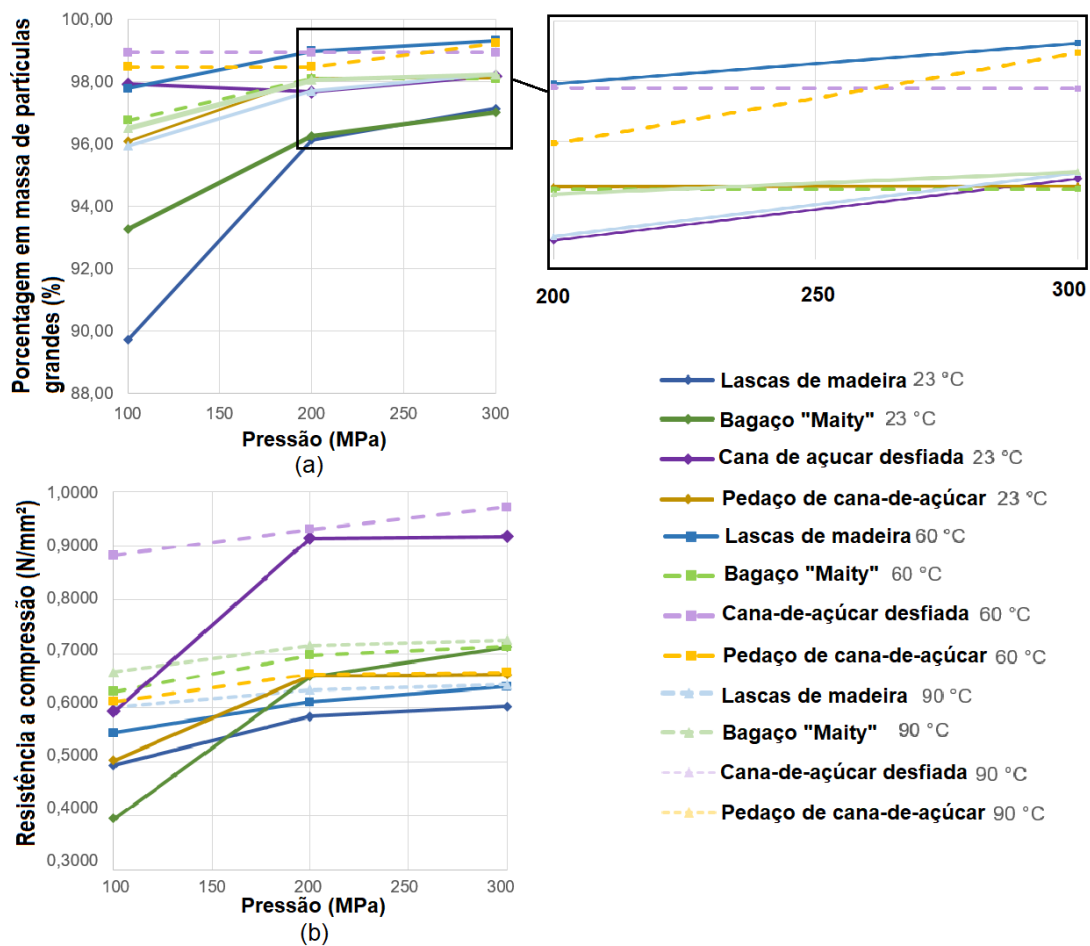


Figura 4: Resistência mecânica – variação da temperatura: (a) Teste de tamboramento, (b) Teste de compressão.

3 CONCLUSÃO

As biomassas analisadas mesmo sendo parecidas, provenientes de materiais à base de madeira e palha, apresentaram comportamentos e resultados diferentes, e vários dos seus comportamentos específicos podem ser generalizados. Os parâmetros e condições foram selecionados de acordo com seu impacto na resistência mecânica

dos briquetes. Para produzir um briquete de biomassa com maior resistência mecânica possível, os seguintes pontos devem ser levados em consideração.

- Um aumento na pressão leva a um aumento na resistência mecânica. No entanto valores de pressão que excedem 200 MPa, possuem menos influencia na resistência à compressão e pode reduzir a resistência mecânica obtida pelo teste de tamboramento.

- O teor de umidade deve estar situado na faixa entre 5 a 10%, que é definida como a faixa ideal para se obter a melhor resistência mecânica. O uso de materiais secos demonstrou efeitos negativos na resistência.

- A temperatura aplicada na matriz e no material durante o processo de briquetagem é um parâmetro fundamental que afeta a resistência mecânica do briquete. Os ligantes orgânicos ou naturais são ativados em temperaturas próximas de 60 °C, e pode aumentar substancialmente a coesão das partículas.

Para garantir uma alta produtividade, as condições citadas acima não devem ser selecionadas apenas de acordo com o seu impacto na resistência mecânica do material, mas também de acordo fatores econômicos e impactos ecológicos. Com o objetivo de reduzir o consumo de energia, tempo e aspectos financeiros uma pressão inferior a 200 MPa deve ser escolhida para a o processo de briquetagem. O percentual de umidade deve ser alterado caso o teor original não esteja na faixa entre 5 a 10 %. A temperatura utilizada no processo deve ser próxima de 60 °C (no máximo 90 °C) para que os ligantes naturais sejam ativados.

Agradecimentos

Os autores agradecem o ministério federal de pesquisa e educação da Alemanha pelo suporte no projeto “CO₂-neutral substitution of metallurgical coke in ironmaking”. Agradecimento também a Universidade Hochschule Ruhr West (Alemanha) que disponibilizou os materiais e equipamentos necessários e a Universidade Federal de Minas Gerais (Brasil). Por fim um agradecimento a Maity Bioenergia S. A., Viena Siderúrgica, Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH, Gerdau Usina Ouro Branco, RHM Rohstoffhandelsgesellschaft mbH Hand Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG.

REFERÊNCIAS

- 1 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Primärenergieverbrauch weltweit," 21 02 2017. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Internationaler-Energiemarkt/energiedaten-int-energiemarkt-46.html>. [Accessed 03 10 2017].
- 2 Wirtschaftsvereinigung Stahl, "Fakten zur Stahlindustrie - Ausgabe 2016," 01 08 2016. [Online]. Available: <http://www.stahl-online.de/index.php/service/publikationen/broschueren-und-flyer/>. [Accessed 03 10 2017].
- 3 Wirtschaftsvereinigung Stahl, Stahlinstitut VDEh, „Annual Report 2016 - Commitment for Steel,” [Online]. Available: <http://www.stahl-online.de/index.php/service/publikationen/jahresbericht-engagement-fuer-stahl/>. [Zugriff am 2016 10 03].
- 4 World Steel Association, "2008 Sustainability Report of steel industry," Brussel, 2008.
- 5 World Steel Association, "steel production Sept 2017/2016," 2017. [Online]. Available: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/monthly-crude-steel-and-iron-production.html>. [Accessed 08 11 2017].

- 6 B. Ilschner and R. F. Singer, "Herstellungs- und verarbeitungstechnische Verfahren," in *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 319-412.
- 7 A. Babich, D. Senk and M. Fernandez, "Charcoal behaviour by its injection into the modern blast furnace," *ISIJ International*, vol. 50, pp. 81-88, 2010.
- 8 World Steel Association, *Global steel industry: outlook, challenges and opportunities*, Istanbul, 2017.
- 9 S. Neugebauer and M. Prof. Dr. Finkbeiner, "Ökobilanznach ISO 14040/44 für das Multirecycling von Stahl," 21 06 2012. [Online]. Available: <http://www.stahl-online.de/index.php/service/publikationen/studien/>. [Accessed 08 11 2017].
- 10 M. Lippe, I. Lewandowski, R. Unseld, J. Pucher and K.-R. Bräutigam, "Die Herkunft der Biomasse," in *Bioökonomie für Einsteiger*, J. Pietzsch, Ed., Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2017, pp. 11-65.
- 11 H. Hartmann and M. Kaltschmitt, *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, H. Hofbauer, Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- 12 U. R. Fritsche, G. Dehoust and et al., "Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse," *Öko-Institut e. V. - Institut für angewandte Ökologie*, Freiburg, Darmstadt, Berlin, 2004.
- 13 S. Döring, *Pellets als Energieträger - Technologie und Anwendung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- 14 S. H. Freitas Seabra da Rocha, „Potenzial von brasilianischen Biomasserückständen als CO₂-neutrale Substitution von Hüttenkoks für die deutsche und brasilianische Stahlherstellung,“ *DGMK-Fachbereichstagung: Konversion von Biomassen*, Rotenburg a. d. Fulda, 2014.
- 15 V. Zeller, C. Weiser, K. Hennenberg, F. Reinicke, K. Schaubach, D. Thrän and et al, "Schriftenreihe des Förderprogramms "Energetische Biomassenutzung" Band 02 Basis für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung," *Programmbegleitung des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“*, Berlin, 2011.
- 16 V. Ferreira-Leitão, L. M. F. Gottschalk, M. A. Ferrara, A. L. Nepomuceno, H. B. C. Molinari and E. P. S. Bon, "Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses," *Waste and Biomass Valorization*, vol. Volume 1, pp. 65-77, 03 2010.
- 17 "FAOSTAT," [Online]. Available: <http://www.fao.org/faostat/en/#compare>. [Accessed 04 10 2017].
- 18 S. H. Freitas Seabra da Rocha, *Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung - Untersuchungen zur Brikettierung von Hüttenreststoffen zum erneuten Einsatz im Hochofen zur Eisen- und Stahlerzeugung*, vol. 33, T. Univ.-Prof. Dr.-Ing Pretz, J. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heil and H. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wotruba, Eds., Aachen: Shaker Verlag, 2009.
- 19 G. Ruiz, M. Ortiz and A. Pandolfi, "Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic brazilian test on concrete cylinders," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, pp. 963-994, 2000.
- 20 C. Ndiema, P. N. Manga and C. R. Ruttouh, "Influence of die pressure on relaxation characteristics of briquetted biomass," *Energy Conversion and Management*, vol. 43, no. 16, pp. 2157-2161, November 2002.
- 21 Y. Li and H. Liu, "High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel," *Biomass and Bioenergy*, vol. 19, no. 3, pp. 177-186, September 2000.
- 22 A. Muntean, T. Ivanorva, P. Hutla and B. Havrland, *Influence of raw material properties on the quality of solid biofuel and energy consumption in briquetting process*, Prague, 2017.
- 23 J. S. Tumuluru, C. T. Wright, J. R. Hess and K. L. Kenny, "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 5, no. 6, pp. 683-707, November/December 2011.

- 24 S. Mani, L. G. Tabil and S. Sokhansanj, "Specific energy requirement for compacting corn stover," *Bioresource Technology*, vol. 97, no. 12, pp. 1420-1426, August 2006.
- 25 N. Kaliyan and R. V. Morey, "Densification characteristics of corn cobs," *Fuel Processing Technology*, vol. 91, no. 5, pp. 559-565, May 2010.