

## **Melhoria das propriedades mecânicas à verde de briquetes de bauxita através do uso de aditivos orgânicos e metodologias para sua avaliação.**

**(Improvement of the mechanical properties of green body bauxite briquettes through the addition of organic binders and methodologies for their evaluation.)**

V. G. Oliveira<sup>1,2</sup>, P. M. Nakachima<sup>1</sup>, R. V. Fernandes<sup>1,2</sup>, M. A. Reis<sup>1,2</sup>, A. L. Pereira<sup>1</sup>, L. L. H. C. Ferreira<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Mineração Curimbaba LTDA

Rodovia Poços de Caldas – Caldas km 10, Poços de Caldas – MG, 37701-970

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alfenas

Rodovia José Aurélio Vilela 11.999, Poços de Caldas – MG, 37715-400

<sup>3</sup>Elfusa Geral de Eletrofusão LTDA

Rua Júlio Michelazzo 501, Vila N. Senhora de Fátima, S. João da Boa Vista – SP, 13872-900

[vitor.oliveira@curimbaba.com.br](mailto:vitor.oliveira@curimbaba.com.br)

### **Resumo**

*A briquetagem é um processo de aglomeração de partículas finas que favorece operações de transporte e estocagem. O objetivo deste trabalho foi realizar a briquetagem da bauxita com auxílio de aditivos orgânicos e quantificar a resistência mecânica à verde por meio do desenvolvimento de metodologias adequadas. Os aditivos orgânicos melhoraram a resistência à verde do briquete de bauxita, enfatizado nos resultados obtidos principalmente com os aditivados com lignosulfonatos. No ensaio de queda, foi notório o incremento na resistência do briquete, visto que o aditivado com lignosulfonato de magnésio apresentou perda de massa de 3,44%, com diâmetro médio inferior a 9,50 mm, em relação à massa inicial, enquanto o briquete não aditivado obteve 52,2% de perda de massa. Portanto, aditivos orgânicos melhoram terminantemente a resistência à verde de briquetes de bauxita e facilitam seu manuseio durante o beneficiamento.*

*Palavras-chave: Briquetagem, Bauxita, Aditivos orgânicos, Partículas finas, Caracterização.*

### **Abstract**

*Briquetting is a fine particle agglomeration process that favors transport and storage operations. The aim of this paper was to perform the briquetting of bauxite with organic binders and to evaluate the mechanical strength of green bodies by methodologies that evaluate the strength of the bauxite briquettes. Organic binders improved the briquettes strength, mainly with the use of lignosulfonate as binder. In the drop test, the results were outstanding. While for the magnesium lignosulfonate the mass loss was 3.44% when sieved on 9.50 mm mesh, for briquettes without binder the mass loss was 52.2%. Thereby, the use of organic binders increases the strength of bauxite briquettes and facilitates their handling in a factory.*

*Keywords: Briquetting, Bauxite, Organic binders, Fine particles, Characterization.*

## INTRODUÇÃO

O manuseio de partículas finas no beneficiamento de minérios tende a ser complexo, além de sofrer constante pressão de cunho ocupacional e ambiental. Somadas a estas, fatores econômicos e questões de ordem técnica se fundem, tornando o cenário ainda mais preocupante. No aproveitamento de uma jazida mineral, por exemplo, parte do mineral-minério presente na fração fina pode não ser recuperado. Já dentro de uma planta de processamento, a dificuldade de transporte e da disposição de matérias-primas em granulometrias específicas para determinadas operações podem gerar ainda mais perdas [1]. No entanto, processos térmicos e reações em altas temperaturas são beneficiados se as partículas estiverem finamente divididas e intimamente compactadas, sendo um grande desafio para a equipe de engenharia garanti-las.

Nessa condição, a briquetagem apresenta-se como opção promissora para facilitar o manuseio e aproveitar os benefícios de uma granulometria mais fina. O processo de briquetagem consiste na prensagem de um material composto por fases sólida e líquida, reduzindo os espaços vazios e atribuindo-lhe uma forma geométrica conhecida [1, 2]. A resistência do corpo compacto, ou briquete, deve ser suficiente para suportar as solicitações mecânicas às quais ele venha a ser exposto. Eventualmente, é adicionado um aditivo com propriedade aglutinante para aumentar a resistência mecânica à verde do briquete e aumentar a eficiência de operações de transporte e estoque [1, 2, 3].

O briquete possui propriedades que variam de acordo com as características de seus componentes. Sua densidade é influenciada principalmente pela distribuição granulométrica das partículas sólidas. Quanto mais bem distribuída a granulometria, melhor será o empacotamento do briquete durante a prensagem. Ou seja, a redução de espaços vazios será mais eficiente quando houver uma distribuição granulométrica mais aberta e controlada [1, 4]. Alguns autores citam a importância da presença de grãos maiores, atuando como sítios de nucleação, enquanto os grãos menores agem propiciando uma camada aderente a estes [4]. A água tem a função de fornecer plasticidade à mistura, sendo que um baixo teor de umidade do briquete promove geração de pó e o excesso resulta num briquete fraco. Em ambos os casos, as resistências à abrasão, ao impacto e à compressão ficam comprometidas [1, 2].

Quando a mistura da matéria-prima sólida com água não garante uma resistência mecânica à verde adequada, aditivos passam a ser considerados. A decisão por qual aditivo escolher é específica de cada material e depende do controle da qualidade exigido para o produto final e do seu custo. Os aditivos podem ser divididos em orgânicos, inorgânicos ou compósitos. O aditivo orgânico fornece aos briquetes altas resistências à compressão e ao

impacto, mas em alta temperatura tende a se volatilizar e decompor. Isto pode ser uma desvantagem do ponto de vista físico, porém uma vantagem do ponto de vista químico, uma vez que não apresentam propriedades fundentes e não formam compostos com a matéria-prima principal [5, 6]. Alguns exemplos de aditivos desta natureza são o amido de milho, o lignosulfonato e o melão [5].

O objetivo geral de obter um briquete com resistência à verde adequada às solicitações durante seu manuseio é evitar a geração de pó e a fragmentação excessiva. Neste sentido, é necessário quantificar grandezas como as resistências à abrasão e ao impacto. Há diferentes metodologias na literatura descrevendo a forma de se quantificar estas propriedades. A norma sérvia SPRS 15210-2 descreve o ensaio de tamboreamento e a norma ASTM D440-07 o teste de queda [7, 8]. Luttrell e sua equipe produziram um minucioso estudo estatístico propondo uma modificação no teste de queda para sua adequação à escala de laboratório, pois na forma original da norma, a quantidade de briquete necessária é de 23 kg e, ao invés de trabalhar com quantidade mássica, a principal modificação proposta sugere uma quantidade numérica fixa de briquetes ensaiados [9].

A maioria dos trabalhos testados para avaliar as propriedades dos briquetes com ou sem aditivos foi desenvolvida pensando no aproveitamento das frações finas do carvão e do minério de ferro, contudo, pouco se encontra sobre a briquetagem da bauxita [1, 2, 4, 5, 7, 8, 9]. A única informação relevante foi quanto ao uso de Cimento Portland como aditivo [1].

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência de aditivos orgânicos na resistência mecânica à verde de briquetes de bauxita e apresentar metodologias para quantificar a sua durabilidade a fim de comparar diferentes misturas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A bauxita utilizada neste trabalho foi fornecida pela Mineração Curimbaba LTDA., localizada no município de Poços de Caldas – MG, e sua análise química é apresentada na Tabela I. Os aditivos utilizados foram o amido de milho, o lignosulfonato de amônio, o lignosulfonato de cálcio/sódio e o lignosulfonato de magnésio. A Tabela II apresenta algumas características de cada aditivo com seus respectivos códigos adotados no corpo do texto.

**Tabela I: Análise química da bauxita fornecida pela Mineração Curimbaba LTDA.**

SiO <sub>2</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	MnO (%)	ZrO <sub>2</sub> (%)	MgO (%)	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P.F. (%)
3,65	0,30	3,48	61,4	0,03	0,01	0,01	0,05	0,05	0,02	30,8

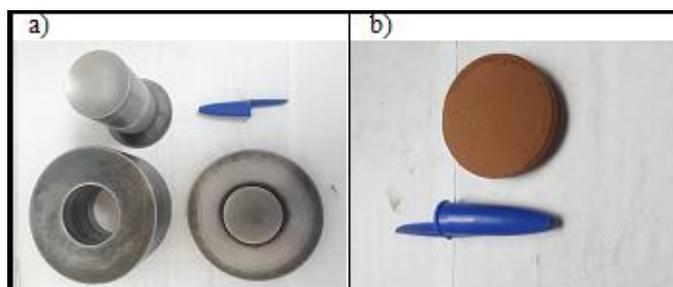
**Tabela II: Características dos aditivos utilizados.**

Aditivo (Código)	Estado	Teor de Sólidos (%)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
Amido de Milho (AM)	Sólido	88	500
Lignosulfonato de Amônio (LNH)	Sólido	93	500
Lignosulfonato de Cálcio/Sódio (LCS)	Líquido	52	1275
Lignosulfonato de Magnésio (LMG)	Líquido	52	1300

A bauxita foi cominuída via seca em moinho de bolas de laboratório (sistema fechado), sob 3 diferentes tempos de residência, visando obtenção de 3 classes granulométricas distintas: fina (A), intermediária (B) e grossa (C). Os três produtos da moagem foram secados em estufa à 110°C durante 24 horas. A caracterização se deu por peneiramento via úmida através da tela #325 padrão Tyler (diâmetro de abertura = 45 µm).

A preparação das misturas dos briquetes para as três granulometrias supracitadas foi realizada em sacos plásticos vedados. O teor de umidade definido foi de 10% para cada mistura. Foi considerado o teor de sólidos dos aditivos para definir a sua concentração mássica em relação à bauxita. Sendo assim, as concentrações para os aditivos sólidos foram de 1%, 2% e 3%; e para os aditivos líquidos, 2%, 3,5% e 5%, mas houve a necessidade de adequar a quantidade de água a ser adicionada com a já presente nos aditivos líquidos e, separadamente para cada concentração, foi adicionada quantidade suficiente de água objetivando 10% de umidade na mistura. Além dessas, foram preparadas misturas sem aditivo a fim de comparação (contemplando a granulometria). Os sacos plásticos foram deixados em descanso por pelo menos 2 dias para homogeneizar o teor de umidade por toda a mistura.

Para a confecção do briquete, parte-se da mistura preparada em saco plástico e retira-se 15 g desta mistura. Essa quantidade é então inserida em uma matriz cilíndrica e prensada uniaxialmente a um patamar de 500 kgf/cm<sup>2</sup> (49 MPa) em uma prensa manual. A Figura 1-a apresenta a matriz utilizada e a Figura 1-b mostra um briquete depois de conformado. Os briquetes prensados foram deixados em descanso durante dois dias em temperatura ambiente e depois secados em estufa à 110°C durante 24 horas.



**Figura 1: a) Fotos da matriz cilíndrica e b) de um briquete de exemplo.**

O código referente a um briquete no corpo deste trabalho segue o seguinte sistema: X(Código do Aditivo)-Y(H<sub>2</sub>O)-(Código da Granulometria), onde X é a concentração do aditivo e Y é o teor de umidade medido. Por exemplo, para uma mistura contendo 2% de amido de milho, 11% de teor de umidade e trabalhado com a bauxita na granulometria intermediária, o código do briquete ficaria “2(AM)-11(H<sub>2</sub>O)-(B)”.

A primeira caracterização mecânica foi com o Agitador Dry-Beat, desenvolvido na Mineração Curimbaba. Este equipamento possui um recipiente cilíndrico (7 x 12 cm) de plástico, que está acoplado a um braço metálico por onde é transferida a energia de um rotor, fazendo com que este recipiente se movimente seguindo uma trajetória elíptica. Os briquetes são submetidos a solicitações abrasivas entre si e o recipiente, além de solicitações de impacto com as extremidades do recipiente. A Figura 2 apresenta este equipamento e mostra o percurso que o centroide do recipiente realiza. Neste ensaio, denominado durabilidade Dry-Beat, 5 briquetes de uma mesma mistura são colocados no recipiente do equipamento e esse opera em uma frequência de 160 RPM durante 20 minutos. A perda de massa é definida como a diferença em porcentagem entre a massa inicial dos 5 briquetes e a massa final de material retido na peneira #4 padrão Tyler (4,75 mm).



**Figura 2: Agitador Dry-Beat e o circuito realizado pelo recipiente durante o ensaio.**

Com os resultados do ensaio Dry-Beat correlacionados aos custos dos aditivos, selecionou-se uma configuração de mistura para cada aditivo, além do melhor resultado sem aditivo (considerando a granulometria), para análise por meio do ensaio de queda seguindo as recomendações de Luttrell [9], mas com alterações para solicitar ainda mais os briquetes ao impacto e destacar a influência dos aditivos na resistência mecânica à verde. Neste ensaio, 20 briquetes são abandonados simultaneamente da extremidade superior de uma calha com extensão de 1,50 m e inclinação de 45°, sendo a sua cota superior localizada a 3 m do chão e a outra a 2 m. Os briquetes impactam em uma caixa com fundo de aço. O produto deste impacto é recolhido e repetido o procedimento de abandonar os briquetes da calha por mais 3 vezes, ou seja, o ensaio consta de 4 quedas sequenciais. A Figura 3 apresenta a estrutura utilizada neste

ensaio. A perda de massa é definida como a diferença em porcentagem entre a massa inicial dos 20 briquetes e a massa final após as 4 quedas considerando duas malhas dessa vez, #4 padrão Tyler (4,75 mm) e 3/8" (9,50 mm) padrão ASTM.



**Figura 3: Estrutura para o ensaio de queda.**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises granulométricas da bauxita baseadas na fração retida na malha #325 estão apresentadas na Tabela III. Analisando esta tabela é natural que a granulometria A tenha uma área específica maior do que a C. Neste sentido e de forma indutiva, uma área específica maior exigiria uma maior quantidade de aditivo orgânico para ter o mesmo efeito de uma área específica menor, pois o aditivo age na superfície da partícula como uma camada adesiva e aumenta a resistência à verde de um corpo compacto composto por várias dessas partículas em contato entre si.

**Tabela III: Porcentagem retida na peneira #325 para as granulometrias de bauxita.**

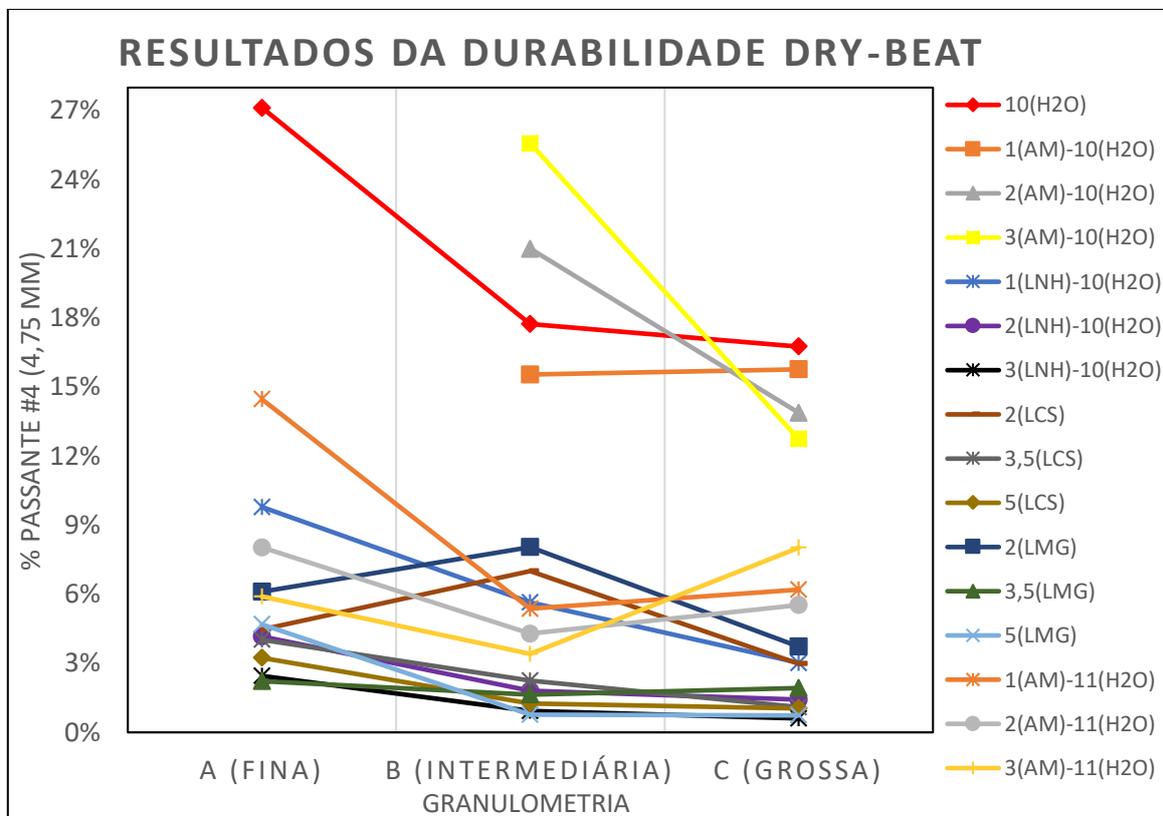
Granulometria	% Retido na Malha #325 (45 µm)
A (Fina)	23,9
B (Intermediária)	29,0
C (Grossa)	41,7

A Figura 4 mostra um comparativo visual dos briquetes, antes e depois do ensaio no Agitador Dry-Beat. Os aditivos melhoraram os resultados de durabilidade dos briquetes quando comparados com a configuração sem aditivo. Quando se utiliza aditivo da família dos lignosulfonatos a perda de massa nos briquetes é significativamente reduzido de forma que o produto deste ensaio é o briquete quase intacto.



**Figura 4: Comparativo entre o briquete antes (à esquerda) e o produto (à direita) do ensaio Dry-Beat. Na seqüência: 10(H<sub>2</sub>O)-(B); 3(AM)-10(H<sub>2</sub>O)-(B); e 5(LCS)-8(H<sub>2</sub>O)-(B).**

A Figura 5 apresenta a perda de massa dos briquetes para todas as configurações de mistura estudadas neste trabalho no ensaio Dry-Beat. De modo geral, quanto maior for a concentração do aditivo e maior for a granulometria, menor é a perda de massa do briquete, mas em termos relativos, os valores variam de aditivo para aditivo. Em nenhum dos casos a granulometria A forneceu o melhor resultado e na maioria foi a C quem gerou os melhores, mostrando que o empacotamento das partículas foi melhor nesse caso.



**Figura 5: Granulometria X Concentração de aditivos no ensaio de durabilidade Dry-Beat.**

Um fato que ilustra a complexidade de individualizar apenas a variável influência do aditivo na resistência dos briquetes é quando analisamos as amostras aditivadas com amido de milho e teor de umidade em 10%. Neste caso, deixou-se de trabalhar com a granulometria A

porque as amostras não resistiram ao desmolde, fragmentando-se conforme mostra a Figura 6, além do fenômeno de aumentar a perda de massa com o aumento da concentração de amido de milho para a granulometria B. Já para a granulometria C, o efeito do amido de milho foi quase nulo nessas condições, sendo os resultados parecidos com a perda de massa dos briquetes sem aditivo. Este fato estimulou o estudo de novas configurações de mistura aditivada com amido de milho. Sendo assim, os resultados foram melhores quando se eleva o teor de umidade para mais de 10%, principalmente para a bauxita na granulometria B, reduzindo a perda de massa para quase metade, quando comparada com os briquetes sem aditivo, o que mostra uma dependência da eficiência do amido de milho como aglutinante com o nível de água na mistura, visto sua necessidade em ser solubilizado, para poder formar, depois da evaporação da água, pontes de cadeias carbônicas aderidas à superfície das partículas da bauxita, aumentando a resistência à verde dos briquetes. Como parte da água é absorvida pelas partículas da bauxita, menos água está disponível no sistema para a solubilização do amido de milho em misturas com teor de umidade menor do que 10%.

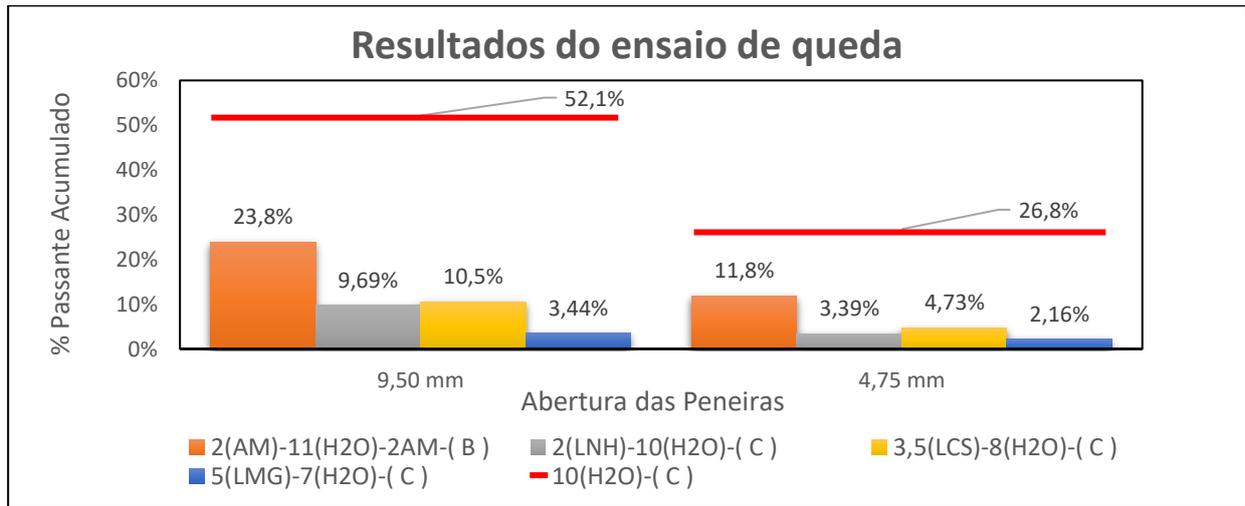


**Figura 6: Fotografia da fragmentação do briquete aditivado com amido de milho na bauxita da granulometria A e com teor de umidade em 10%.**

Para a família dos lignosulfonatos, todos apresentaram resultados consideráveis para a redução de perda de massa dos briquetes, mesmo que por vezes o teor de umidade tenha sido entre 7% e 9% para os aditivos líquidos. O melhor resultado foi para o briquete aditivado com 3% de lignosulfonato de amônio na bauxita da granulometria C, com 0,60% de perda de massa, enquanto o briquete sem aditivo para a mesma granulometria apresentou perda de massa na ordem de 16,8%. Os briquetes com lignosulfonato de magnésio apresentaram o segundo e terceiro melhor resultado, com 0,73% e 0,78%, respectivamente. Por fim, os briquetes aditivado com lignosulfonato de cálcio/sódio apresentaram bons resultados na mesma ordem do que os outros lignosulfonatos, variando de 7,00% a 1,04% de perda de massa a depender da configuração da mistura.

Para o ensaio de queda, foram escolhidas as seguintes configurações: 10(H<sub>2</sub>O)-(C); 2(AM)-11(H<sub>2</sub>O)-(B); 2(LNH)-10(H<sub>2</sub>O)-(C); 3,5(LCS)-8(H<sub>2</sub>O)-(C); e 5(LMG)-7(H<sub>2</sub>O)-(C). A

escolha se baseou nos resultados obtidos no ensaio Dry-Beat e no custo dos aditivos. Assim, a Figura 7 apresenta a perda de massa considerando dois tamanhos (aberturas: 9,50 e 4,75 mm).



**Figura 7: Resultados de perda de massa no ensaio de queda.**

Neste ensaio ficou ainda mais evidente a influência do aditivo na resistência dos briquetes. Todos os aditivos melhoraram a resistência ao impacto dos briquetes à verde. Perante a classificação na malha de 9,50 mm, os briquetes sem aditivo apresentaram perda de 52,1%, enquanto os aditivados com lignosulfonato de magnésio apenas 3,44%, já com lignosulfonato de amônio, lignosulfonato de cálcio/sódio e amido de milho, as perdas foram de 9,69%, 10,5% e 23,8%, respectivamente. Novamente, a família dos lignosulfonatos apresentou os melhores resultados do que o amido de milho, sendo que esse manteve a ordem de redução de perda de massa pela metade quando comparado com o briquete sem aditivo.

## CONCLUSÕES

A adição de aditivos orgânicos em briquetes de bauxita produziu melhoras excepcionais na resistência mecânica à verde por abrasão e impacto. A família dos lignosulfonatos apresentou os melhores resultados, reduzindo para quase nula a perda de massa em algumas misturas. Na concentração de 3% de lignosulfonato de amônio no ensaio de durabilidade Dry-Beat, a perda de massa foi de apenas 0,60%, enquanto sem aditivo houve resultado de até 27,1%.

No ensaio de queda, a adição de 5% de lignosulfonato de magnésio desenvolveu consideravelmente a resistência ao impacto dos briquetes de bauxita, onde houve apenas 3,44% de perda considerando a malha de 9,50 mm, enquanto o briquete sem aditivo apresentou uma perda de 52,1%, uma diferença absoluta de 48,7%.

O destaque na influência da umidade ficou para o aditivo amido de milho, sendo observada excepcional melhora ao aumentar o teor de 10% para 11% de umidade. Em contrapartida, a adição de lignosulfonato mostrou ser mais robusta às variações de água, pois com menor teor de umidade ainda se obteve bons resultados. Quanto à granulometria, a mais grossa apresentou os melhores resultados, enquanto a mais fina apresentou os piores de forma geral.

Por fim, conclui-se que o teor de umidade, a granulometria do material e o aditivo influenciam nos resultados de resistência de um briquete de bauxita à verde. De forma geral, quanto mais grosseira for a granulometria e quanto maior for a concentração do aditivo em combinação com uma umidade ótima, melhor serão os resultados de resistência à verde. Tais fatores devem ser considerados e ajustados em um processo de briquetagem.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi realizado graças à estrutura e material fornecido pela Mineração Curimbaba LTDA., a qual é expressado agradecimento junto à sua equipe de colaboradores.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] E. G. Carvalho, V. Brinck, in: A. B. Luz, J. A. Sampaio, S. C. A. França, Tratamento de Minérios, 5th Edition ed., CETEM, Rio de Janeiro, Brasil (2010) p. 683-701.
- [2] J. M. Dias, D. T. Souza, M. Braga, Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais, Embrapa Agroenergia, Brasília, Brasil (2012).
- [3] M. Temmerman, F. Rabier, P. D. Jensen, H. Hartmann, T. Böhm, Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes, Biomass and Bioenergy, 2006, v. 30, p. 964-972.
- [4] T. BY, Briquetting of Manganese Oxide Fines with Organic Binders, Norwegian University of Science and Technology, Gjøvik, Noruega (2017).
- [5] G. Zhang, Y. Sun, Y. Xu, Review of briquette binders and briquetting mechanism, Renewable and Sustainable: Energy Reviews, Northern Ireland, 2018, v. 82, p.477-487.
- [6] A. Bernardi, N. M. Perez, Ligantes Inorgânicos x Ligantes Orgânicos – Diferentes Mecanismos de Aumento de Resistência Mecânica, in: 7º Congresso da Indústria Cerâmica do Revestimento, Santa Gertrudes – SP (2017).
- [7] Institute for Standardization of Serbia, Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 2: Briquettes, Sérvia (2010).
- [8] American Society for Testing and Materials, Standard Test Method of Drop Shatter Test for Coal, Estados Unidos (2012).
- [9] G. Luttrell, N. Riperi, D. N. Taulbee, E. Dohm, R. Bratton, Evaluation of methods used to quantify the durability of coal-biomass briquettes, International Pittsburgh Coal Conference in University of Pittsburgh, Estados Unidos (2012).