

Potencial uso de pó de balão em briquetes e bloquetes para a siderurgia

Jean Philippe Santos Gherardi de Alencar ^{1*} 

Resumo

O pó de balão é um importante coproduto da indústria siderúrgica da rota Alto-Forno e isso se deve a dois fatores principais: o volume gerado por tonelada de produto final e sua qualidade química rica em ferro e carbono. Normalmente, a utilização do pó de balão é feita através da sua recirculação no processo de sinterização de uma usina integrada. Contudo, podem existir algumas situações operacionais e/ou ambientais que limitem essa recirculação de forma plena. Várias outras aplicações já foram cogitadas, como por exemplo, em processamento de cerâmicas, indústria de pigmentos, tratamento de água, indústrias de química e energia e até mesmo na rota siderúrgica por meio de outros processos de aglomeração. Nesse contexto, o estudo em questão focou em avaliar o uso de pó de balão em rotas de briquetagem e bloquetagem, seguida de caracterizações físicas e metalúrgicas que pudessem apontar quais rotas e formulações seriam viáveis para uso em alto-forno. Pode-se encontrar uma configuração de briquete com 88% de pó de balão e configurações de bloquetes com misturas parciais de pó de balão e minério de ferro que demonstraram resultados viáveis de propriedades físicas e metalúrgicas para uso industrial.

Palavras-chave: Briquetes; Bloquetes; Pó de balão; Coprodutos.

Potential use of blast furnace dust in briquettes and blocks for the steel industry

Abstract

Blast furnace dust is a relevant byproduct of the steel industry via the blast furnace route, and this is due to two main factors: the volume generated per ton of final product and its chemical quality rich in iron and carbon. Typically, the use of blast furnace dust is made through its recirculation in the sintering process of an integrated plant. However, there may be some operational and/or environmental situations that limit this full recirculation. Several other applications have already been considered, such as in ceramics processing, pigment industry, water treatment, chemical and energy industries, and even in the steelmaking route through other agglomeration processes. In this context, the study in question focused on evaluating the use of blast furnace dust in briquetting and block-making routes, followed by physical and metallurgical characterizations that could indicate which routes and formulations would be viable for use in a blast furnace. A briquette configuration with 88% blast furnace dust and block configurations with partial mixtures of blast furnace dust and iron ore that demonstrated viable results of physical and metallurgical properties for industrial use were found.

Keywords: Briquettes; Blocks; Blast furnace dust; Byproducts.

1 Introdução

O setor da indústria siderúrgica encontra-se diante de um grande desafio de descarbonização devido às metas do Acordo de Paris e as respectivas NDCs (*Nationally Determined Contribution*). Diante dessa pressão por se tornar uma indústria mais limpa, insere-se também a perspectiva de economia circular e o foco de tentar reaproveitar ao máximo os coprodutos gerados ao longo da cadeia produtiva.

De acordo com o relatório anuário do Instituto Aço Brasil [1] a produção de aço do Brasil em 2020 foi de 31,4 Mt, número um pouco inferior aos dos anos anteriores

e isso se deveu ao efeito da pandemia de Covid-19 no mundo. Nesse mesmo ano, foi apurado que a geração de coprodutos siderúrgicos na indústria nacional foi de 622 kg/t aço [2]. Tal número demonstra a relevância do assunto da recirculação desses resíduos, os quais apresentam uma grande diversidade, sendo os principais os pós, as lamas, as escórias e as carepas [3].

Ainda nesse contexto, o Instituto Aço Brasil também mostra que mais de 90% dessa geração de coprodutos consegue ser reaproveitada de alguma maneira. Um grande exemplo

¹Área de Marketing Técnico, Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil.

*Autor correspondente: jeanpga@gmail.com



disso, é o pó de balão que devido ao seu alto teor de carbono e ferro consegue ser majoritariamente reutilizado no processo de sinterização. Contudo, existem algumas situações em que o uso de pó de balão na sinterização pode ser restrito como, por exemplo, em função de sua granulometria demasiadamente fina ou devido ao balanço de elementos traços que podem se acumular no processo acarretando outros problemas operacionais. Sob esse aspecto, outras formas de aproveitamento do pó de balão já foram discutidas como o processamento para obtenção de cerâmicas [4,5], produção de pigmento [6], preparação de aditivo para tratamento de água [7,8] e, principalmente, para a produção de Briquetes para reuso na cadeia metalúrgica [9-12].

A configuração desse processo de briquetagem com resíduos ainda não é um ponto dominado pela indústria e muitas experiências tendem a apresentar entraves para o uso em larga escala como a degradação em altas temperaturas que leva à diminuição de permeabilidade do forno e eficiência de processo.

Nesse sentido, o presente estudo visou buscar rotas de aglomeração de pó de balão em conjunto com minério de ferro que fossem aceitáveis do ponto de vista de requerimentos técnicos de um alto-forno convencional. As variáveis proporção de minério e coproduto, ligante e processo (briquetagem e bloquetagem) foram exploradas para entender quais seriam as melhores configurações de um potencial processo produtivo.

2 Desenvolvimento

2.1 Testes de bloquetagem

A primeira rota avaliada para a aglomeração do pó de balão foi a Bloquetagem. Esse processo consiste

na fabricação de blocos a partir da aglomeração e a compactação dos materiais através da vibração de uma matriz especial, seguida da ação de um ligante que forma uma pasta e promove a união entre os grãos do aglomerado. Esse tipo de processo é muito comum na fabricação de blocos intertravados que são usuais em aplicações de pavimentação em geral devido a sua boa competitividade econômica e qualidade [13].

Contudo, no presente estudo a estrutura utilizada para a fabricação dos bloquetes é de uma planta que produz aglomerados sextavados para posterior redução em fornos de ferro liga.

As duas principais matérias-primas utilizadas nessa etapa do estudo foram: uma amostra de Pó de Balão industrial e um *Sinter Feed* comercial. A caracterização química desses insumos pode ser vista nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Nota-se que a amostra de Pó de Balão coletada apresenta percentual de carbono próximo a 40% e ferro em torno de 30%, valores típicos das condições industriais de um alto-forno a coque. Ao passo que o *Sinter Feed* possui teor de Fe igual a 62% e sílica próximo a 6%, que também condiz com os valores históricos dos minérios de ferro utilizados pela siderurgia nacional.

De posse dessas informações iniciais, foi gerado um plano de experimentos com misturas binárias entre o *Sinter Feed* e o Pó de Balão a fim de se avaliar em qual composição haveria melhor compactação e resistência mecânica. Além disso, foi replicado um ponto experimental com dois níveis de ligante para apenas estimar o quanto poderia trazer de incremento de resistência. A Tabela 3 apresenta as configurações de cada ponto experimental.

Tabela 1. Análise química da amostra de Pó de Balão utilizada no estudo

Química Amostra Base Seca			Química Amostra Bruta									
C Fixo (%)	Volátil (%)	Cinzas (%)	C (%)	S (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	CaO (%)	Mn (%)	PF (%)	P (%)
25,25	13,62	61,13	41,30	0,35	33,00	6,31	1,76	0,61	2,87	0,23	38,47	0,048

Tabela 2. Análise química da amostra de *Sinter Feed* utilizada no estudo

Amostra	Fe (%)	FeO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	Mn (%)	CaO (%)	PF (%)	MgO (%)
Sinter feed	62,74	-	5,93	1,03	0,056	0,15	0,03	2,22	0,04

Tabela 3. Composição dos bloquetes fabricados

Formulação	Composição do Mix		%Aglomerante	%Umidade Inicial do Aglomerado
	%Pó de Balão	%Sinter Feed		
Bloquete 01	50	50	10	15,3
Bloquete 02	50	50	12	15,0
Bloquete 03	40	60	10	13,9
Bloquete 04	60	40	10	16,6
Bloquete 05	70	30	10	18,0

O aglomerante utilizado nos testes foi um cimento de cura rápida do tipo CP-V e sua dosagem foi estipulada a partir de conhecimento prévio a partir do processo de materiais utilizados na fabricação de ferro ligas. O molde do bloquete produzido foi de um prisma sextavado cuja distância entre duas paredes opostas é de 85 mm. Após a saída da matriz, os bloquetes eram destinados a um galpão onde ficavam armazenados até a estabilização do ligante, período em que não ocorria mais variação de massa, que foi em torno de 8 dias. A massa de bloquetes de cada ponto experimental destinada para a caracterização foi de 100 kg.

2.2 Testes de briquetagem

O processo de briquetagem é constituído por quatro etapas principais que consistem na preparação, mistura, compactação e tratamento térmico. No estudo em questão, o processo foi feito a frio e utilizou-se de ligante inorgânico (cimento CP-V) e orgânico (melaço da cana de açúcar). Neste tipo de processo o material é conformado pelas cavidades dos dois rolos paralelos que estão girando em sentidos contrários e com a mesma velocidade e, pela pressão exercida, forma-se o briquete [14].

Ao todo foram fabricados 10 pontos experimentais de briquetes que continham misturas de Pó de Balão, *Sinter Feed*, finos de briquete, aglomerante orgânico e/ou aglomerante inorgânico, conforme Tabela 4.

Todos os briquetes foram fabricados utilizando a mesma prensa de rolos e os mesmos parâmetros operacionais, a saber: pressão de compactação a 2400 psi, velocidade dos rolos de 2,8 RPM e velocidade de alimentação de 90 kg/h.

Há de se ressaltar ainda que os briquetes cuja composição continha ligante inorgânico que necessitavam de tempo de cura, eram armazenados num ambiente isolado durante 7 dias antes de sofrerem caracterização física. Enquanto, os briquetes que não apresentavam ligante inorgânico foram submetidos à secagem em estufa durante 3h a 110 °C.

A forma dos briquetes fabricados era de “egg shape” cujo tamanho de comprimento era de aproximadamente 15 mm e altura 8 mm. Analogamente aos bloquetes, foi destinado à caracterização, aproximadamente, 100 kg de cada configuração de briquetes.

3 Resultados e discussão

3.1 Caracterização preliminar dos aglomerados

Todas as configurações de bloquetes e briquetes foram desenhadas visando à máxima utilização do pó de balão. Todavia, já se esperava que algumas condições de testes pudessem não atingir os requisitos mínimos de qualidade. Nesse sentido, foi proposto um crivo de qualidade física e aspecto de conformabilidade para selecionar as configurações de maior potencial que seriam posteriormente avaliadas nos testes metalúrgicos de alto-forno.

No caso dos briquetes os testes de seleção foram o Shatter (JIS M8711 [15]) e o teste de briquetabilidade. Um ponto importante de se notar é que a briquetabilidade é um fator qualitativo, num lote de 100 briquetes, inspeciona-se quais briquetes estão “perfeitos” e este número passa a ser o fator. Entende-se por perfeito os briquetes que não possuem grandes trincas ou rebarbas em demasia. Por experiência prática acredita-se que uma briquetabilidade igual ou superior a 96 é excelente. Na Tabela 5 pode se observar os valores obtidos nessas avaliações para cada uma das configurações de briquetes.

À luz do anteriormente exposto, foram selecionados os briquetes 7, 8, 9 e 10 para a continuidade da caracterização física e metalúrgica uma vez que estes foram os que respeitaram o limite de briquetabilidade e ao mesmo tempo tiveram os melhores resultados de *shatter*.

De maneira análoga ao que foi feito com os briquetes, os bloquetes também tiveram como crivo o aspecto de qualidade física, que foi o valor de finos gerados no shatter e um teste de resistência à compressão axial. Ambos resultados são apresentados na Tabela 6.

Com exceção da última formulação de bloquete, todas as formulações apresentaram conformabilidade semelhantes e decidiu-se levar adiante nos testes os pontos 02 e 03 por se tratar de bloquetes com melhor resultado de *shatter* e resistência à compressão.

Um fator interessante é que as melhores formulações de briquetes aconteceram com a entrada apenas do Pó de Balão, enquanto os bloquetes apresentaram melhores resultados quando a participação de *Sinter Feed* estava

Tabela 4. Composição dos briquetes fabricados

Formulação	%Pó de Balão	% <i>Sinter Feed</i>	% Lig. Orgânico	%Lig. Inorgânico	% Finos de Retorno
BQT 01	96	-	4	-	-
BQT 02	96	-	1	3	-
BQT 03	90	-	-	10	-
BQT 04	48	48	4	-	-
BQT 05	48	48	1	3	-
BQT 06	45	45	-	10	-
BQT 07	76	-	4	-	20
BQT 08	76	-	2	2	20
BQT 09	90	-	-	10	-
BQT 10	88	-	-	12	-

no nível superior. Essa diferença de comportamento, provavelmente, se deve ao fato de que no processo de bloquetagem a heterogeneidade de tamanho das partículas é mais relevante para o empacotamento e, conseqüentemente, para a geração da devida resistência.

3.2 Caracterização física e metalúrgica dos aglomerados

Uma vez conhecida as configurações de briquetes e bloquetes de maior potencial foram providenciados outros testes físicos e metalúrgicos como: tamboramento (ISO3271 [16]), resistência à compressão (para os briquetes), desintegração estática (ISO4696-2 [17]) e redutibilidade (ISO7215 [18]).

Todavia, observa-se aqui que, apesar das normas serem as mesmas utilizadas em outros tipos de carga como sínter e pelota, o tamanho médio dos materiais em questão

era diferente. Sendo o comprimento do briquete em torno de 15mm (forma achatada) e o bloquete com 85 mm de distância entre as faces. Sendo assim, para a utilização dos bloquetes nas retortas do laboratório metalúrgico foi-se adotado o procedimento de seccionar os bloquetes em prismas menores de aproximadamente 35 mm.

Na Figura 1 é apontado o resultado consolidado de *shatter* dos aglomerados. Observa-se que 4 configurações: bloquete 03, bloquete 02, briquete 08 e briquete 10, obtiveram resultados acima de 90% que é um valor alvo comum de exigência para outras cargas do alto-forno. Há de ressaltar que o BQT 08, apesar de ter uma dosagem total ligante inferior aos BQT09 e BQT10, apresentou um bom desempenho.

Na Figura 2, por sua vez, são colocados os resultados de resistência à compressão (RC) dos aglomerados.

Primeiramente, há de se frisar que o valor de RC representa qual foi a força avaliada pela prensa quando houve a ruptura do material e, portanto, é um valor que depende da área de contato entre a prensa e o corpo de prova. Assim sendo, é desejável comparar os valores obtidos entre briquetes em separado dos bloquetes. Logo, o briquete mais resistente à compressão é o briquete 10 enquanto o bloquete 02 mostrou-se mais resistente à aplicação de força.

Com relação aos resultados de Tamboramento (TI), a Figura 3 demonstra os resultados aferidos para cada formulação de briquetes. Os bloquetes não foram ensaiados nesta norma, pois não foi possível ajustar seu tamanho e quantidade para a granulometria desejada no ensaio.

Os testes de Tamboramento mostraram mais uma vez a grande resistência física do briquete 10 que foi 25% superior ao segundo melhor resultado. Contudo, os briquetes 08 e 09 atingiram patamares satisfatórios, próximos aos valores de Tamboramento de sínteres, que é uma carga de comum uso em altos-fornos.

Com o auxílio da Figura 4, pode-se notar os valores de desintegração sob redução dos aglomerados. Percebe-se que algumas composições como o BQT 07, BQT 08 e BQT 09 apresentaram desintegrações significativas. Tal fato pode estar associado à alta quantidade de carbono nessas formulações advinda do elevado percentual de pó de balão, mas também está associada à fragilidade e dosagem dos ligantes utilizados nesses pontos. Ligantes orgânicos tendem

Tabela 5. Resultados de *shatter* e briquetabilidade

Formulação	Briquetabilidade (%)	% Finos > 10mm
BQT 01	95	75
BQT 02	96	42
BQT 03	90	18
BQT 04	97	71
BQT 05	93	41
BQT 06	92	27
BQT 07	97	81
BQT 08	100	92
BQT 09	96	89
BQT 10	97	96

Tabela 6. Resultados de *shatter* e compressão dos bloquetes

Formulação	% Finos > 10mm	Resistência à Compressão (kgf)
Bloquete 01	97,3	39,2
Bloquete 02	98,1	57,5
Bloquete 03	98,2	53,2
Bloquete 04	95,3	30,0
Bloquete 05	92,5	18,6



Figura 1. Resultados de *Shatter* das configurações selecionadas.

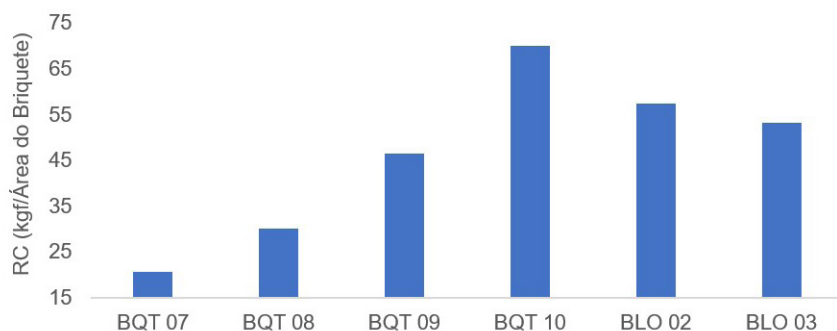


Figura 2. Resultados de resistência à compressão das configurações selecionadas.

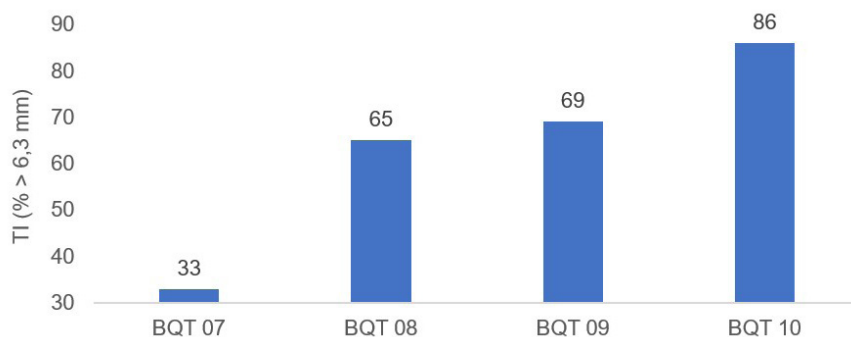


Figura 3. Resultados de tamboramento dos briquetes selecionados.

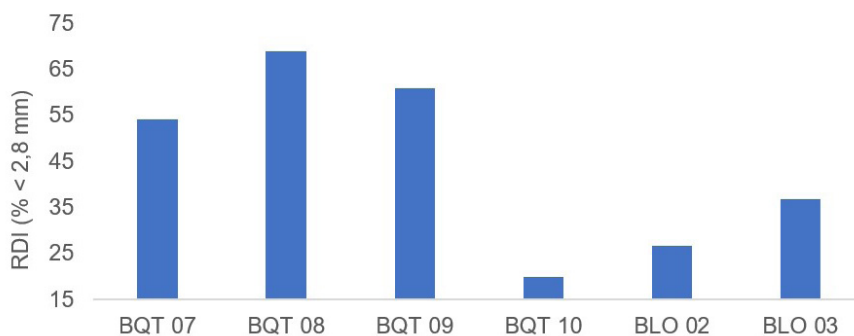


Figura 4. Resultados de desintegração estática das configurações selecionadas.

a se volatilizar em altas temperaturas ao passo que o cimento tem seus principais compostos (CaO , SiO_2 , H_2O e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$) desidratados [19]. Por outro lado, os bloquetes 02 e 03 e o briquete 10 apresentaram valores melhores de RDI (*Reduction Desintegration Index*). No caso dos bloquetes, além de possuírem menos teor de C, eles possuem estruturas mais porosas que podem melhor acomodar e aliviar as tensões de ruptura do aglomerado.

Na Figura 5, encontram-se os valores de Grau de Redução (GR) para as amostras BQT10 e BLO02 e BLO03. As amostras de BQT07, 08 e 09 foram excluídas desse último ensaio, uma vez que seus resultados de degradação sob redução já os colocavam como incompatíveis para uso na rota Alto-Forno.

O que pode se notar nas demais amostras é que os resultados de redutibilidade dos Bloquetes foram superiores

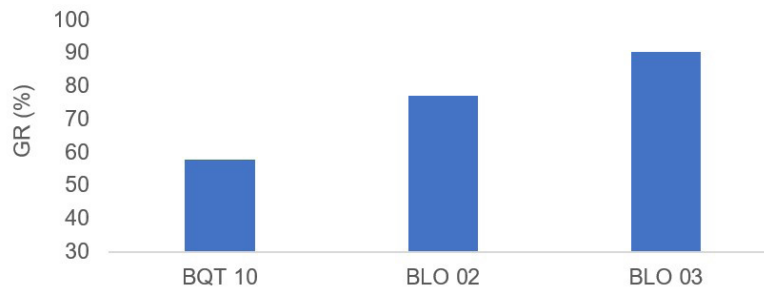


Figura 5. Resultados de redutibilidade das configurações selecionadas.

ao do Briquete nº 10 e isso pode estar associado ao fato de que nos Bloquetes havia minério de ferro *in natura* com óxidos de Fe_2O_3 ao passo que no Briquete havia apenas pó de balão, onde a presença de FeO é majoritária e esta fase é mais difícil de se reduzir. Além disso, era possível se observar macroscopicamente que a estrutura e superfície dos Bloquetes era mais porosa que as do Briquete, o que se justificava pela menor compactação do material na Bloquetagem em relação à Briquetagem.

4 Conclusões

Com o intuito de avaliar as rotas de briquetagem e bloquetagem como potenciais alternativas para alocação do pó de balão, 15 diferentes configurações de misturas foram fabricadas. Seguem abaixo os principais pontos constatados pelo trabalho:

- De todas as 15 configurações fabricadas, apenas 6 apresentaram condições preliminares de resistência e conformabilidade para serem avaliadas em todos os testes físicos e metalúrgicos. Dentre os briquetes, aquelas formulações com maior quantidade de finos de retorno e ligante inorgânico foram as selecionadas

para a caracterização completa, enquanto que os bloquetes com maior percentual de *Sinter Feed* e ligante foram os que se comportaram melhor nos testes iniciais.

- Os materiais BQT 10 e BLO 02 e 03 foram os aglomerados que apresentaram melhor desempenho de qualidade física e metalúrgica. Os briquetes BQT 07, 08 e 09 demonstraram resultados razoáveis de Shatter, porém, no que diz respeito aos testes de Resistência à Compressão, Tamboramento e, principalmente, RDI essas amostras se mostraram abaixo do esperado para cargas aglomeradas de uso em alto-forno.
- Na comparação entre o Briquete 10 e Bloquetes 02 e 03, pode-se verificar que o Briquete 10 foi superior em alguns requisitos físicos como RC e RDI, porém inferior aos Bloquetes na Redutibilidade. Tal comportamento físico pode ser justificado pelo seu processamento mais compactador do que a Bloquetagem e, do ponto de vista de redutibilidade, além do processamento entende-se que a maior presença de minério de ferro *in natura* nos Bloquetes é que tenha favorecido o maior Grau de Redução desses casos.

Referências

- 1 Instituto Aço Brasil. A siderurgia em números. Rio de Janeiro: IAB; 2021. (Folder).
- 2 Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade 2020. Rio de Janeiro: IAB; 2020.
- 3 Chaves NO, Oliveira RMPB. As alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno: uma revisão. Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia. 2020;12:188-198.
- 4 Li S, Cui J, Zhang Q, Fu J, Lian J, Li C. Performance of blast furnace dust clay sodium silicate ceramic particles (BCSCP) for brewery wastewater treatment in a biological aerated filter. Desalination. 2010;258(1):12-18.
- 5 Francis AA. Crystallization kinetics of magnetic glass-ceramics prepared by the processing of waste materials. Materials Research Bulletin. 2006;41(6):1146-1154.
- 6 Shen L, Qiao Y, Guo Y, Tan J. Preparation and formation mechanism of nano-iron oxide black pigment from blast furnace flue dust. Ceramics International. 2013;39(1):737-744.
- 7 Andrade LN, Amorim CC, Santos SV, Teixeira IF, Leão MMD, Lago RM. Efficient demulsification of wastewater by steel furnace dust with amphiphilic and surface charge properties. Chemical Engineering Journal. 2015;271:281-286.

- 8 Zhang Y, Li S, Wang X, Li X. Coagulation performance and mechanism of polyaluminum ferric chloride (PAFC) coagulant synthesized using blast furnace dust. *Separation and Purification Technology*. 2015;154:345-350.
- 9 Silva RT, Fernandes TLA, Flores IV, Bagatini MC. Avaliação em alta temperatura de briquetes compostos por carepa e pó de balão, p. 192-201. In: 18º ENEMET, São Paulo, 2018.
- 10 El-Hussiny NA, Shalabi MEH. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process. *Powder Technology*. 2011;205(1):217-223.
- 11 Lemos LR, Rocha SHFS, Castro LFA. Reduction disintegration mechanism of cold briquettes from blast furnace dust and sludge. *Journal of Materials Research and Technology*. 2015;4(3):278-282.
- 12 Han H, Duan D, Yuan P. Binders and Bonding Mechanism for RHF Briquette Made from Blast Furnace Dust. *ISIJ International*. 2014;54(8):1781-1789.
- 13 Ribeiro KCC. Viabilidade do bloquete ecológico feito por uma forma manual [Trabalho de Conclusão de Curso]. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná; 2016.
- 14 Manfredi GVP. Aplicação de resíduo de palma como fonte de carbono em briquetes autorredutores de minério de ferro [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2022.
- 15 Japanese Industrial Standard. JIS M 8711 – Method for measuring the shatter strength of iron ore sinter. Tokyo: Japanese Industrial Standard; 1977.
- 16 Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 3271: Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – Determinação dos índices de tamboramento e abrasão. Rio de Janeiro: ABNT; 2009.
- 17 International Organization for Standardization. ISO 4696-2 – Iron ores – Static test for low temperature reduction disintegration – Part 2: Reaction with CO. Genebra: ISO; 1998.
- 18 International Organization for Standardization. ISO 7215 – Iron ores – Determination of relative reducibility. Genebra: ISO; 1995.
- 19 Qi Z, Ye G. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2012;110(1):153-158.

Recebido em: 29 Set. 2022

Aceito em: 29 Abr. 2024