

As alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno: uma revisão

Alternatives for the use of blast furnace dust: a review

Nayane Oliveira Chaves^{1*}, Rosane Maria Pessoa Betânio Oliveira¹

¹Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, CEP: 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil.

* Autor para correspondência: nayane_chaves@hotmail.com

Recebido em: 03/09/2020, Aceito em: 23/11/2020, Publicado em: 06/12/2020.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.188-198>

RESUMO

A indústria siderúrgica produz uma quantidade elevada de resíduos durante os seus processos produtivos. Dessa forma, tendo em vista a redução dos impactos causados ao meio ambiente, o setor siderúrgico incentiva a transformação desses resíduos em coprodutos que podem ser utilizados em substituição aos recursos naturais e com isso reduzir os custos na produção, melhorar o desempenho dos materiais produzidos e diminuir os impactos ambientais. Os principais coprodutos gerados pela siderurgia são os pós, as lamas, as escórias e as carepas. O pó do alto-forno é um coproduto obtido no sistema de limpeza a seco dos gases do alto-forno produzidos no processo de fabricação do ferro-gusa. A composição do pó do alto-forno depende das matérias-primas utilizadas no alto-forno, mas é basicamente composto de óxidos metálicos e materiais carbonosos. Pesquisas recentes apresentam alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno na sinterização, na indústria cerâmica, na fabricação de briquetes, na produção de pigmentos, na indústria de cimento, no tratamento de águas residuais, entre outros. Assim, este trabalho tem por finalidade expor uma visão geral sobre as alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno, apresentando os resultados dos estudos realizados com esse coproduto. Os resultados apontam que o uso do coproduto se mostrou vantajoso na maioria das aplicações.

Palavras-chave: alto-forno, ferro-gusa, coproduto, pó do alto-forno.

ABSTRACT

The steel industry produces a high amount of waste during its production processes. Thus, owing to reducing the impacts caused to the environment, the steel sector encourages the transformation of these residues into co-products that can be used to replace natural resources and thereby reduce production costs, improve the performance of the materials produced and decrease environmental impacts. The main co-products generated by the steel industry are dust, sludge, slag and mill scale. The blast furnace dust is a co-product obtained in the dry-cleaning system of blast furnace gases produced in the pig iron manufacturing process. The composition of the blast furnace dust depends on the raw materials used in the blast furnace, but it is composed of metallic oxides and carbonaceous materials. Recent research presents alternatives for the use of blast furnace dust in sintering, in ceramic industry, in the manufacture of briquettes, in the production of pigments, in the

cement industry, in the treatment of wastewater, among others. Therefore, this work aims to expose an overview of the alternatives for using blast furnace dust, presenting the results of studies carried out with this co-product. The results show that the use of the co-product proved to be advantageous in most applications.

Keywords: blast furnace, pig iron, co-product, blast furnace dust.

INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de consumo e a produção em larga escala acarretam a geração de várias toneladas de resíduos anualmente. O descarte incorreto desses resíduos causa danos ao meio ambiente e prejudica a saúde e o bem-estar da população.

Nos últimos anos, a indústria siderúrgica vem adotando uma política que incentiva a transformação de seus resíduos em coprodutos que podem ser aproveitados em diversos setores reduzindo o consumo de recursos naturais não renováveis. Além de diminuir os impactos ambientais, a utilização de coprodutos é uma forma de reduzir o uso de matérias-primas e os custos de produção.

Segundo o INSTITUTO AÇO BRASIL (2019), o Brasil é o 9º maior produtor de aço bruto no mundo e, em 2018, foi responsável pela produção de 35 milhões de toneladas de aço e a geração de 22 milhões de toneladas de coprodutos. Os principais coprodutos gerados pela siderurgia são os pós, as lamas, as escórias e as carepas.

Os pós são obtidos no sistema de limpeza a seco dos gases. Entre os principais pós gerados na siderurgia estão o pó de aciaria elétrica e o pó do alto-forno. O pó de aciaria elétrica é rico em metais, tais como zinco, cromo, cádmio e chumbo (SILVA *et al.*, 2019). Já o pó do alto-forno é composto basicamente de óxidos metálicos e materiais carbonosos. O pó do alto-forno, também conhecido como pó de balão, pó de coletor ou charcok, é um coproduto oriundo da limpeza dos gases gerados no interior do alto-forno. Aproximadamente, são gerados de 10 a 15 quilos de pó do alto-forno por tonelada de ferro-gusa (MOURÃO *et al.*, 2011).

O descarte inadequado desse coproduto pode apresentar riscos ambientais, poluindo o solo, os corpos d'água e o ar. Além disso, existem restrições rigorosas para sua disposição e, portanto, estudos recentes buscam utilizar o pó do alto-forno em diversas aplicações (ZHAO *et al.*, 2016). Portanto, o objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sobre as alternativas de aproveitamento do pó do alto-forno.

A GERAÇÃO DO PÓ DO ALTO-FORNO

Redução de minério de ferro em altos-fornos

As indústrias siderúrgicas podem ser classificadas em dois tipos de acordo com a rota adotada para produção do aço: integrada e semi-integrada. Nas usinas integradas ocorrem as três etapas básicas: redução, refino e laminação, ou seja, produzem aço a partir do minério de ferro. As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, utilizando ferro-gusa ou sucata ferrosa de terceiros para produção do aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

A etapa de redução do minério de ferro ocorre no alto-forno, onde é produzido o ferro-gusa líquido em uma temperatura em torno de 1500 °C. Para isso, utiliza como matérias-primas básicas a

carga metálica (pelotas, sinter e minério granulado) e o combustível sólido (coque ou carvão vegetal), além de fundentes e injeções auxiliares (gás natural, carvão pulverizado etc.). O ferro-gusa é composto de ferro (92-95%), carbono (3,5-5,0%) e mais alguns elementos como silício, manganês, fósforo e enxofre (MOURÃO *et al.*, 2011).

A redução dos óxidos de ferro ocorre à medida que a carga desce no interior do alto-forno e os gases formados pela combustão do coque ou carvão vegetal sobem pela coluna de carga. Dessa forma, o oxigênio se desprende do ferro com a alta temperatura e liga-se ao carbono. Nesse processo, são produzidos também a escória de alto-forno e o gás de alto-forno (MALARD, 2009).

O gás do alto-forno contém monóxido de carbono (21-25%), dióxido de carbono (18-22%) e hidrogênio (2-5%), além de possuir poder calorífico em torno de 700-800 kcal/Nm³. Portanto, o gás é recuperado e utilizado como combustível no restante da usina, para aquecimento de fornos, panelas, regeneradores e outros equipamentos (MACHADO *et al.*, 2003).

Limpeza dos gases do alto-forno

O gás que sai do alto-forno arrasta partículas finas da carga em torno de 5-20 g/Nm³ de gás, devendo ser reduzido para valores menores que 0,01 g/Nm³ após a operação de limpeza, de modo a atender as especificações dos setores consumidores de gás. Então, o gás passa por duas etapas de limpeza: a seco e a úmida (MOURÃO *et al.*, 2011).

A limpeza a seco é realizada no coletor (balão) de pó, do tipo gravimétrico, onde devido ao alargamento da seção, os gases perdem velocidade e depositam as partículas mais grosseiras. A outra etapa da limpeza é úmida e realizada em dois venturis posicionados em série. No primeiro venturi, o gás é resfriado e parcialmente limpo através da pulverização de água. No segundo venturi, é realizada a limpeza final do gás para eliminar o restante das partículas de pó. As partículas molhadas decantam no fundo do equipamento sob a forma de lama e o gás segue para a distribuição (SILVA, 2016).

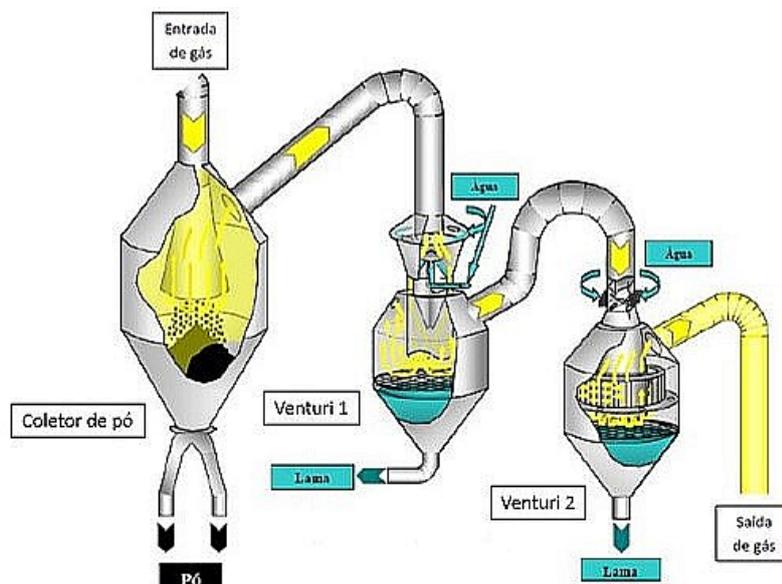


Figura 1. Sistema de limpeza do gás de alto-forno. Fonte: SILVA, 2016.

O pó do alto-forno

O pó recolhido no coletor (balão) do sistema de limpeza dos gases é denominado de pó do alto-forno ou pó de balão do alto-forno.



Figura 2. Pó do alto-forno. Fonte: Autores.

De acordo a norma brasileira NBR 10004 (ABNT, 2004a), o pó do alto-forno é classificado como um resíduo classe I – perigoso, já que possui fenóis em sua composição. Dessa forma, é necessário ter cuidados especiais em seu manuseio e estocagem (JACOMINO *et al.*, 2002).

AMORIM *et al.*, (2012) estudaram a composição química do pó do alto-forno de uma siderúrgica brasileira. A Tabela 1 apresenta os resultados dessa análise química.

Tabela 1. Composição química do pó do alto-forno de uma siderúrgica brasileira.

CONSTITUINTES	COMPOSIÇÃO (%)
FeT	54,2
C	14,0
SiO ₂	4,2
CaO	2,3
Al ₂ O ₃	1,2
MnO	0,6
K ₂ O	0,5
Na ₂ O	0,5
MgO	0,3
S	0,3
P	0,07
ZnO	0,06
Ni	0,05
Outros (O ₂ , H ₂ O, etc.)	21,7

Fonte: AMORIM *et al.*, 2012.

Na pesquisa realizada por SHEN *et al.*, (2010), na cidade de Tiajun (China), a composição química do pó do alto-forno apresentou Fe₂O₃ (43,38%), FeO (20,37%), C (16,25%), álcalis (13,38%) e pequenas quantidades de enxofre, fósforo e outros óxidos metálicos.

Tabela 2. Composição química do pó do alto-forno de uma siderurgia da China.

CONSTITUINTES	COMPOSIÇÃO (%)
Fe ₂ O ₃	43,38
FeO	20,37
C	16,25
Álcalis	13,38
S	0,37
P	0,02
CaO	2,06
MgO	0,26
Si ₂ O	2,82
Al ₂ O ₃	0,68
K ₂ O	0,04
Na ₂ O	0,14

Fonte: SHEN *et al.*, 2010.

Segundo MALARD (2009), a composição do pó do alto-forno vai variar de acordo com a quantidade de finos e a composição química dos fundentes alimentados no alto-forno. Visto que seus elementos constituintes são procedentes da matéria-prima utilizada na produção do ferro-gusa. A quantidade de pó do alto-forno, na pesquisa realizada por MALARD (2009), oscilou de 10 a 80kg/t de ferro-gusa, com média de 35kg/t de ferro-gusa.

O APROVEITAMENTO DO PÓ DO ALTO-FORNO

FRANCIS (2006) transformou uma mistura de pó do alto-forno e escória de alto-forno em um produto vitrocerâmico magnético. Os mecanismos de cristalização foram investigados através de análise térmica diferencial (DTA), difração de raios X (DRX) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras vitrocerâmicas exibiram propriedades magnéticas relacionadas à presença da fase magnetita/maghemita, além de fases cristalinas do piroxênio Ca (Mg, Fe, Al) (Si, Al)₂ O₆. Os resultados indicaram que as amostras vitrocerâmicas apresentaram boa durabilidade química e resistência ao desgaste, especialmente em ambientes alcalinos.

LI *et al.*, (2010) utilizaram o pó do alto-forno como material principal para a produção de partículas cerâmicas. Essas partículas foram usadas como suportes de biofilme em filtros biológicos aerados (FBA), e sua eficácia no tratamento de águas residuais da cervejaria foi comparada com partículas cerâmicas comerciais. A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicou que as partículas cerâmicas produzidas com o pó do alto-forno apresentaram maior porosidade e maior superfície total em comparação com as partículas cerâmicas comerciais, como

também, maior quantidade de microorganismos. Dessa forma, o material mostrou que pode ser utilizado como meio suporte em FBA no tratamento de águas residuais.

Em um trabalho realizado por EL-HUSSINY & SHALABI (2010) produziram pellets com pó do alto-forno utilizando o melaço como ligante orgânico e investigaram sua aplicação na sinterização de minério de ferro. Os pellets de pó do alto-forno foram utilizadas em substituição ao coque breeze (finos de coque). Os resultados revelaram que a resistência aumentou nos pellets produzidos com o pó do alto-forno, porém a produtividade da máquina de sinterização diminuiu.

EL-HUSSINY & SHALABI (2011), em outro trabalho, produziram briquetes autorredutores utilizando pó do alto-forno e carepa com diferentes proporções em massa. Os resultados indicaram que as propriedades mecânicas dos briquetes melhoraram com o aumento da carepa na mistura, enquanto as porcentagens de redução diminuíram com a diminuição da temperatura. A adição de finos de coque à mistura de briquete (1 carepa: 1 pó do alto-forno) melhorou a resistência à compressão do briquete produzido.

AMORIM *et al.*, (2012) utilizaram a redução controlada com hidrogênio para transformar o pó do alto-forno em um redutor de contaminantes orgânicos e metais tóxicos. As amostras de pó do alto-forno foram utilizadas sem qualquer tratamento. A redução controlada com H₂ foi realizada por aquecimento a 10 °C min⁻¹, a 400 °C, 600 °C e 800 °C por 2 h. Após redução, os materiais foram resfriados sob uma corrente de H₂ a temperatura ambiente, e, em seguida, armazenada numa atmosfera de nitrogênio para evitar a oxidação a longo prazo. O pó do alto-forno foi utilizado como fonte de ferro na reação de Fenton para descolorização do corante Reactive Red 195. Os resultados mostraram que o pó do alto-forno tem potencial para ser utilizado como redutor de contaminantes orgânicos. Os materiais reduzidos a 400 °C, 600 °C e 800 °C removeram 32%, 21% e 5% do carbono orgânico total (COT), respectivamente.

SHEN *et al.*, (2013) realizaram um trabalho sobre o reaproveitamento do pó do alto-forno na produção de pigmento preto à base de óxido de ferro (Fe₃O₄) em escala nanométrica. Os resultados mostraram que pigmento de Fe₃O₄ resultante do pó do alto-forno sob condições otimizadas, possui reflectância menor que 4%, o que significa que o pigmento é totalmente preto, e uma boa absorção de óleo visto que o valor encontrado foi 23% e os pigmentos pretos possuem um desempenho pronunciado quando a absorção de óleo está entre 15% e 25%.

YAKOVLEV *et al.*, (2014) adicionaram o pó do alto-forno na massa de gesso com nanoestruturas de carbono, na quantidade de 0,5% do peso, para a melhoria das propriedades mecânicas. Os resultados indicaram que a adição do pó provocou uma mudança significativa na microestrutura do gesso e um aumento na resistência à compressão em 80%.

HAN *et al.*, (2014) produziram briquetes com pó do alto-forno e diferentes aglutinantes. Depois de seco e torrado, os briquetes sem aglutinante apresentaram resistência muito baixa. Os resultados mostraram que aglutinantes diferentes possuem diferentes mecanismos de ligação dos briquetes. O estudo concluiu que os aglutinantes de amido de milho podem melhorar a resistência à baixa temperatura dos briquetes e os aglutinantes contendo silício podem melhorar a resistência à alta temperatura dos briquetes. Assim, devem ser utilizados juntos para desenvolver o aglutinante composto apropriado.

SANTOS *et al.*, (2015) utilizaram lama de aciaria, lama do alto-forno e pó do alto-forno como adsorventes de baixo custo para a emulsão de óleo lubrificante e corante RR195. Os resultados obtidos indicaram que a lama de aciaria foi o melhor adsorvente para a emulsão de óleo, atingindo 97% de eficiência de remoção do COT em pH = 3. Para o corante RR195, foi observada

uma remoção de cor superior a 90%, em 24 horas, para todos os adsorventes. Já a remoção do COT foi baixa, os resultados com o pó e a lama do alto-forno foram inferior a 10% e com a lama de aciaria foram inferior a 37%.

ZHANG *et al.*, (2015) buscaram parâmetros ideais para a preparação do coagulante de cloreto férrico de polialumínio (PAFC) utilizando o pó do alto-forno. O mecanismo de coagulação do PAFC para remoção de turbidez e cor foi comparado. Os resultados mostraram que o PAFC superou o cloreto de polialumínio (PAC) comercial na remoção de turbidez e cor, e teve maior adaptabilidade ao pH.

ANDRADE *et al.*, (2015) utilizaram o pó do alto-forno no tratamento de águas residuais da indústria metalúrgica. O estudo mostrou que a desemulsificação das águas residuais e a remoção do COT são fortemente afetadas pelo pH, e os melhores resultados foram obtidos para um pH menor que 7. Assim, os resultados indicaram que o pH tem um efeito significativo na remoção do COT, uma vez que o pH da solução afeta fortemente a interação das partículas do pó do alto-forno e do óleo emulsionado. Os resultados sugeriram que o processo de remoção de óleo é uma combinação de dois processos: uma captura eletrostática das gotículas de óleo carregadas negativamente pelas partículas positivas do pó do alto-forno e por uma forte interação do óleo hidrofóbico com a superfície do carbono hidrofóbico.

LEMOS *et al.*, (2015) prepararam briquetes autorredutores a frio utilizando pó e lama de alto-forno. Os índices de desintegração sob redução dos briquetes foram comparados com cargas metálicas convencionais como: pelotas, sinter e minério de ferro. Para garantir o bom funcionamento dos altos-fornos, o valor de índice de desintegração sob redução deve ser menor que 30%, o que é considerado o padrão para uso de briquetes nos altos-fornos. Os resultados mostraram que os briquetes com o teor de pó do alto-forno superior a 40% tiveram índices de desintegração sob redução maior que 30%.

CASTRO *et al.*, (2016) produziram blocos de solo-cimento para uso em alvenaria sustentável com a incorporação dos seguintes coprodutos siderúrgicos: pó do alto-forno, pó de aciaria elétrica e escória granulada de forno elétrico a arco em substituição parcial ao solo. Além dos coprodutos, as formulações incluem adições simultâneas de blocos de solo-cimento defeituosos finamente granulados. Os resultados apontaram a possibilidade de utilização dos coprodutos siderúrgicos em blocos de solo-cimento. Os melhores resultados foram observados quando se utilizou 20% de pó do alto-forno junto com 10% de reuso do bloco solo-cimento; 10% de escória de aciaria ou 20% de escória de aciaria junto com 10% de reuso do bloco solo-cimento; e 2,5% de pó de aciaria junto com 20% de reuso do bloco solo-cimento.

SINGH *et al.*, (2017) realizaram um estudo sobre o aproveitamento de coprodutos siderúrgicos: o pó e a lama do alto-forno para aglomeração e sua utilização na sinterização. Os pellets desses coprodutos foram preparados com três tipos de ligantes como melão, dextrina e bentonita. Os estudos concluíram que as propriedades de aglomeração do pó e da lama do alto-forno são mais apropriadas quando os coprodutos são utilizados juntos. Os pellets com boa resistência foram os que utilizaram 50% de cada coproduto, pó e lama do alto-forno, e o aglutinante de bentonita. A produtividade da máquina de sinterização também foi aumentada com o aumento da porcentagem de adição de coprodutos.

DÍAZ *et al.*, (2018) estudaram a viabilidade do uso do pó do alto-forno e da escória de aciaria a oxigênio como agregado miúdo e graúdo, respectivamente, em misturas asfálticas a quente para pavimentos. Para a análise, foram realizados três tipos de misturas asfálticas. Além da mistura de

referência, utilizando somente os agregados convencionais: a brita calcária e a areia, formulou-se duas novas misturas: a primeira substitui parcialmente (na proporção de 50%) e a segunda substitui totalmente os agregados convencionais pelos coprodutos siderúrgicos. Os resultados mostraram que o pó do alto-forno e a escória de aciaria a oxigênio podem substituir parcialmente os agregados convencionais na pavimentação de estradas.

BAIDYA *et al.*, (2019) avaliaram a viabilidade tecnoeconômica e o potencial do coprocessamento do pó do alto-forno em uma fábrica de cimento na Índia, usando um ensaio experimental de um mês. O estudo buscou segregar o pó do alto-forno em uma fração rica em ferro e outra rica em carbono, utilizando o separador magnético, mas essa segregação não foi eficaz. A análise de custo mostrou que o pó do alto-forno pode ser utilizado pela indústria de cimento se o seu custo variar em uma faixa de US\$ 35–39/t.

YANG *et al.*, (2019) aplicaram o pó do alto-forno em uma manta de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB) para aprimorar o processo anaeróbico. Os resultados experimentais mostraram que o pó do alto-forno melhorou a taxa de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) e a produção de biogás, especialmente metano e hidrogênio.

ZHANG *et al.*, (2020) analisaram a viabilidade e eficiência do pó do alto-forno na preparação de filtros catalíticos cerâmicos para tratamento de águas residuais contendo ciprofloxacina. O trabalho mostrou que o custo com a preparação do filtro utilizando o pó do alto-forno foi menor quando comparado com os filtros catalíticos cerâmicos tradicionais. Os resultados mostraram que em combinação com a microeletrolise catalítica, o filtro alcançou alta eficiência na remoção de ciprofloxacina, carbono orgânico total e fósforo total. Em condições operacionais ideais, foram removidos 97% do ciprofloxacina, 90% do carbono orgânico total (COT) e 99% do fósforo total (PT).

Tabela 3. Resultados das aplicações do pó do alto-forno segundo a literatura referenciada.

APLICAÇÃO	RESULTADO	REFERÊNCIA
Material vitrocerâmico magnético	O material apresentou boa resistência ao desgaste e durabilidade química	(FRANCIS, 2006)
Produção de partículas cerâmicas usadas como suportes de biofilme em filtros biológicos aerados	O material tem potencial para uso como meio suporte em filtro biológico aerado para tratamento de águas residuais	(LI <i>et al.</i> , 2010)
Produção de pellets	Aumento na resistência dos pellets produzidos, porém a produtividade da máquina de sinterização diminuiu.	(EL-HUSSINY & SHALABI, 2010)
Fabricação de briquetes autorredutores	A adição do pó do alto-forno junto com a carepa melhorou a resistência à compressão dos briquetes	(EL-HUSSINY & SHALABI, 2011)
Redutor de contaminantes orgânicos e metais tóxicos	Os resultados mostraram que o pó do alto-forno tem potencial para ser utilizado como redutor de contaminantes orgânicos	(AMORIM <i>et al.</i> , 2012)
Produção de pigmento preto à base de óxido de ferro	O pigmento apresentou reflectância menor que 4% e uma boa absorção de óleo (23%)	(SHEN <i>et al.</i> , 2013)

Tabela 3. Resultados das aplicações do pó do alto-forno segundo a literatura referenciada (Continuação).

APLICAÇÃO	RESULTADO	REFERÊNCIA
Aditivo para gesso	A adição do pó do alto-forno causou um aumento na resistência à compressão em 80%	(YAKOVLEV <i>et al.</i> , 2014)
Produção de briquetes	A resistência dos briquetes sem aglutinantes é muito baixa. Portanto, utilizou-se diferentes aglutinantes para melhorar as propriedades dos briquetes.	(HAN <i>et al.</i> , 2014)
Produção de adsorventes para a emulsão de óleo lubrificante e corante RR195	Emulsão de óleo: remoção de COT (42%) Corante RR195: remoção de cor (93%) e remoção de COT (<10%)	(SANTOS <i>et al.</i> , 2015)
Preparação de coagulante de cloreto férrico de polialumínio (PAFC)	O PAFC foi melhor na remoção de turbidez e cor do que o cloreto de polialumínio (PAC) comercial	(ZHANG <i>et al.</i> , 2015)
Tratamento de águas residuais	Mostrou que o coproduto pode ser usado para a demulsificação eficiente de águas residuais da indústria metalúrgica	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2015)
Fabricação de briquetes autorredutores a frio	A maioria das amostras de briquetes apresentou valores de RDI < 30% (valor de referência). Porém, o teor de pó (>40%) eleva os valores de RDI dos briquetes	(LEMOS <i>et al.</i> , 2015)
Produção de blocos de solo-cimento	Verificou-se a possibilidade de bons resultados confrontando os valores exigidos por norma (absorção de água < 20% e resistência mecânica > 2,0 MPa)	(CASTRO <i>et al.</i> , 2016)
Sinterização	O uso do pó do alto-forno combinado com a lama do alto-forno apresentou melhores resultados nas propriedades de aglomeração	(SINGH <i>et al.</i> , 2017)
Agregado miúdo em mistura asfáltica	Confirmou a viabilidade do uso como substituto parcial do agregado fino	(DÍAZ <i>et al.</i> , 2018)
Coprocessamento em uma fábrica de cimento	Revelou que o pó do alto-forno pode ser coprocessado com lucro na fábrica de cimento como combustível e matéria-prima alternativa	(BAIDYA <i>et al.</i> , 2019)
Digestão anaeróbica de lodo anaeróbico de fluxo ascendente (UASB)	Mostrou eficiência na remoção de demanda química de oxigênio (DQO)	(YANG <i>et al.</i> , 2019)
Preparação de filtros catalíticos cerâmicos para tratamento de águas residuais	Os filtros apresentaram alta eficiência na remoção de ciprofloxacina, carbono orgânico total e fósforo total	(ZHANG <i>et al.</i> , 2020)

CONCLUSÕES

A operação de uma usina siderúrgica gera uma série de coprodutos durante seus processos produtivos, entre eles estão: os pós, as lamas, as escórias e as carepas. Esses coprodutos podem possuir características similares a outros recursos naturais, se tornando uma alternativa econômica para utilização em diferentes setores.

O pó do alto-forno é um coproduto obtido a partir do processo de redução que ocorre nas siderúrgicas. Geralmente, é composto de óxidos metálicos e materiais carbonosos. Conforme ilustrado em diferentes publicações, o pó do alto-forno pode ser utilizado de várias maneiras como na produção de pigmentos, no tratamento de águas residuais, na fabricação de briquetes, na confecção de blocos de solo-cimento, na produção de misturas asfálticas, no coprocessamento de cimento, entre outros.

O aproveitamento no próprio setor ou em outras atividades oferece um destino nobre a esse coproduto, além de diminuir o uso de recursos naturais não renováveis e conseqüentemente, reduzir os custos de produção. Os resultados das pesquisas apontam que a utilização do pó do alto-forno traz melhorias para o material produzido em grande parte dos processos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Sinobras (Siderúrgica Norte Brasil S.A.) e ao CNPq pelo processo nº 458216/2014-3. Nayane Oliveira Chaves agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, CC; DUTRA, PR; LEÃO, MMD; PEREIRA, MC; HENRIQUES, AB; FABRIS, JD; LAGO, RM. Controlled reduction of steel waste to produce active iron phases for environmental applications. **Chemical Engineering Journal**, **209**, 645-651, 2012.
- 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**, **271**, 281-286, 2015.
- BAIDYA, R; GHOSH, SK; PARLIKAR, UV. Blast furnace flue dust co-processing in cement kiln – A pilot study. **Waste Management & Research**, **37**(3), 261-267, 2019.
- CASTRO, MAM; COSTA, FG; BORBA, SC; NETO, EL; RABELO, AA. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de blocos de solo-cimento formulados com coprodutos siderúrgicos. **Revista Matéria**, **21**(3), 666-676, 2016.
- DÍAZ, AL; DÍAZ, RO; LEÓN, GEG. Use of BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements. **Dyna**, **85** (206), 24-30, 2018.
- EL-HUSSINY, NA; SHALABI, MEH. Effect of Recycling Blast Furnace Flue Dust as Pellets on the Sintering Performance. **Science of Sintering**, **42** (3), 269-281, 2010.
- EL-HUSSINY, NA; SHALABI, MEH. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process. **Powder Technology**, **205**(1), 217-223, 2011.
- FRANCIS, AA. Crystallization kinetics of magnetic glass-ceramics prepared by the processing of waste materials. **Materials Research Bulletin**, **41** (6), 1146-1154, 2006.
- HAN, H; DUAN, D; YUAN, P. Binders and Bonding Mechanism for RHF Briquette Made from Blast Furnace Dust. **ISIJ International**, **54** (8), 1781-1789, 2014.
- IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. Aço & sustentabilidade. (Folder). Rio de Janeiro, 2019.
- IAB - INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade 2018. Rio de Janeiro, 2018.
- JACOMINO, VMF; CASTRO, LFA; RIBEIRO, EDL; LEÃO, MMD; SOUZA, CM; GOMES, AM; ALMEIDA, MLB; LOPES, LEF. **Controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

- LEMOS, LR; ROCHA, SHFS; CASTRO, LFA. Reduction disintegration mechanism of cold briquettes from blast furnace dust and sludge. **Journal of Materials Research and Technology**, **4** (3), 278-282, 2015.
- 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**, **258** (1), 12-18, 2010.
- MACHADO, MLP; MARQUES SOBRINHO, VPF; ARRIVABENE, LF. *Siderurgia para não siderurgistas*, Vitória, ABM, 2003.
- MALARD, AAM. Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais. Dissertação de M.Sc., UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2009.
- MOURÃO, MB; YOKOJI, A; MALYNOWSKYJ, A; LEANDRO, CAS; TAKANO, C; QUITES, EEC; GENTILE, EF; SILVA, GFBL; BOLOTA, JR; GONCALVES, M; FACO, RJ. Introdução à siderurgia, 1 ed., São Paulo, ABM, 2011.
- SANTOS, SV; AMORIM, CC; ANDRADE, LN; CALIXTO, NCZ; HENRIQUES, AB; ARDISON, JD; LEÃO, MMD. Steel wastes as versatile materials for treatment of biorefractory wastewaters. **Environmental Science and Pollution Research International**, **22** (2), 882-893, 2015.
- SHEN, L; QIAO, Y; GUO, Y; TAN, J. Preparation of nanometer-sized black iron oxide pigment by recycling of blast furnace flue. **Journal of Hazardous Materials**, **177** (1), 495-500, 2010.
- 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**, **39** (1), 737-744, 2013.
- SILVA, HPS. Efeito da adição de pó de balão na combustibilidade do carvão pulverizado injetado no alto-forno. Dissertação de M.Sc., UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil, 2016.
- SILVA, VS; SILVA, JS; COSTA, BS; LABES, C; OLIVEIRA, RMPB. Preparation of glaze using electric-arc furnace dust as raw material. **Journal of Materials Research and Technology**, **8** (6), 5504-5514, 2019.
- SINGH, PK; KUMAR, AL; KATIYAR, PK; MAURYA, R. Agglomeration behaviour of steel plants solid waste and its effect on sintering performance. **Journal of Materials Research and Technology**, **6** (3), 289-296, 2017.
- YAKOVLEV, G; KHOZIN, V; POLYANSKIKH, I; KERIENE, J; GORDINA, A; PETROVA, T. Utilization of blast furnace flue dust while modifying gypsum binders with carbon nanostructures. In: *The 9th International Conference "Environmental Engineering"*, eISBN 978-609-457-640-9, 2014.
- YANG, G; FANG, H; WANG, J; JIA, H; ZHANG, H. Enhanced anaerobic digestion of up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) by blast furnace dust (BFD): Feasibility and mechanism. **International Journal of Hydrogen Energy**, **44** (33), 17709-17719, 2019.
- ZHAO, D; ZHANG, J; WANG, G; CONEJO, AN; XU, R; WANG, H; ZHONG, J. Structure characteristics and combustibility of carbonaceous materials from blast furnace flue dust. **Applied Thermal Engineering**, **108**, 1168-1177, 2016.
- ZHANG, L; GAO, Y; YUE, Q; ZHANG, P; WANG, Y; GAO, B. Preparation and application of novel blast furnace dust based catalytic-ceramic-filler in electrolysis assisted catalytic micro-electrolysis system for ciprofloxacin wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**, **383**, 121215, 2020.
- 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**, **154**, 345-350, 2015.