

Potencial reutilização dos resíduos provenientes da indústria de ferrossilício: revisão sistemática e aprofundada da literatura

A geração de resíduos sólidos é uma preocupação por todos os segmentos de processamento mineral, metalúrgico e siderúrgico. De modo que a sustentabilidade para a indústria é um quesito essencial que implica em aliar desenvolvimento econômico à preservação ambiental e à responsabilidade social. Assim, os resíduos sólidos industriais, devem ser tratados, respeitando as leis ambientais, buscando sempre priorizar a sua reutilização. Dentro desta problemática, tecnologias vêm sendo desenvolvidas, entre elas a aglomeração dos finos utilizando a técnica de briquetagem por terem como base a compressão mecânica e assim, serem assimiláveis no processo produtivo como carga complementar nos fornos de redução. Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma revisão sistemática em bases de pesquisa on-line sobre a potencialidade de utilização dos finos em formato de briquetes autorredutores para estes serem introduzidos com as matérias-primas em fornos elétricos a arco submerso (SAF) para produção de ferrossilício (FeSi). Nesta perspectiva, os briquetes devem possuir resistência mecânica adequada para manter sua integridade nas altas temperaturas presentes no decorrer do processo, pois a degradação dos aglomerados e a consequente formação de finos podem comprometer a permeabilidade da carga e a eficiência dos reatores. Sendo assim, avaliar o comportamento dos aglomerados autorredutores (redução e resistência) quando submetidos a altas temperaturas é fundamental para determinar se o mesmo está adequado ou não para ser utilizado em processos industriais.

Palavras-chave: Briquetes; Finos; Resíduos; Indústria de FeSi; Processos metalúrgicos ferroligas.

Potential reuse of waste from the ferroalloy industry: systematic and in-depth literature review

The generation of solid waste is a concern to be resolved by all segments of mineral, metallurgical and steel processing. So, sustainability for the industry is an essential issue that implies combining economic development with environmental preservation and social responsibility. Thus, industrial solid waste must be treated, respecting environmental laws, always seeking to prioritize its reuse. Within this problem, technologies have been developed, including the agglomeration of fines using the briquetting technique, as they are based on mechanical compression and, thus, can be assimilated in the production process as a complementary charge in the reduction furnaces. This research aimed to conduct a systematic review in online research databases on the potential use of fines in the form of self-reducing briquettes for these to be introduced with the raw materials in submerged arc electric furnaces (SAF) for the production of ferrosilicon (FeSi). In this perspective, briquettes must have adequate mechanical strength to maintain their integrity at the high temperatures present during the process, as the degradation of agglomerates and the consequent formation of fines can compromise the permeability of the load and the efficiency of the reactors. Therefore, evaluating the behavior of self-reducing agglomerates (reduction and strength) when subjected to high temperatures is essential to determine whether it is suitable or not for use in industrial processes.

Keywords: Briquettes; Fine; Waste; FeSi industry; Ferroalloy metallurgical processes.

Topic: **Engenharia Ambiental**

Received: **08/10/2021**

Approved: **27/10/2021**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Aline da Luz Pascoal Rossoni 

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2520279232634991>
<http://orcid.org/0000-0003-3835-7235>
alineluzpascoal@gmail.com

Higor Aristides Victor Rossoni 

Universidade Federal de Viçosa, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/5963315112031411>
<http://orcid.org/0000-0002-6088-6144>
rossoni@ufv.br

Andréia Bicalho Rodrigues 

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3082875534964549>
<http://orcid.org/0000-0001-5212-6527>
abicalho@demin.ufmg.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0031

Referencing this:

ROSSONI, A. L. P.; ROSSONI, H. A. V.; HENRIQUES, A. B.. Potencial reutilização dos resíduos provenientes da indústria de ferrossilício: revisão sistemática e aprofundada da literatura. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.10, p.385-398, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.010.0031>

INTRODUÇÃO

A preocupação com a geração de resíduos sólidos nos diversos tipos de segmentos produtivos tem se tornado a agenda atual de diversas pesquisas científicas, em respostas aos impactos ambientais e econômicos referentes à sua destinação e devido às pressões da sociedade em âmbito mundial. Assim, em relação às indústrias de transformação (metalúrgicas e siderúrgicas) medidas ou devem ser tomadas de modo a minimizar esse passivo em prol do atendimento às legislações vigentes. De maneira que, para o surgimento de técnicas para o reaproveitamento dos resíduos gerados no processo produtivo corroboram-se ao quesito da promoção de um ciclo sustentável de utilização dos recursos minerais.

A geração de resíduos no processo produtivo minero-metalúrgico está muitas vezes relacionado à geração de finos, estes obtidos devido aos processos de manipulação e/ou transformação desses materiais. Em consonância, no processo metalúrgico de produção de ferrossilício (FeSi), as matérias primas utilizadas são o quartzo como fonte de sílica, o minério de ferro como fonte de ferro e como fonte de carbono a utilização mais frequente é o carvão vegetal (KERO et al., 2017).

Efetivamente é desejável remover tais finos pelo peneiramento antes da dosagem da carga, pois estes afetam marcadamente à permeabilidade nos fornos e assim causam uma inadequada distribuição e perdas elevadas dos gases devido a porosidade da carga. Em decorrência, as frações mais finas do agente redutor bem como as do minério de ferro e do quartzo são geradas por prévia classificação, sendo que, para os fornos elétricos a arco submerso (SAF) estas frações são segregadas para promover a permeabilidade dos gases entre os materiais constituintes da carga. Enfim, cada fabricante de FeSi irá estabelecer o *undersize* das matérias primas mediante pesquisas de melhor desempenho em seu processo produtivo, geralmente em torno de 10,00mm (SLOMAN et al., 2017; HASANNEZHAD et al., 2018).

Nessa perspectiva a reintrodução dos resíduos sólidos (finos) gerados durante o processo de fabricação de FeSi pode representar uma alternativa possível para o reprocessamento dos mesmos. No entanto é preciso uma forma conveniente de elaboração e inclusão do conjunto no SAF, pois é necessário que esse equipamento tenha sua carga flexibilizada para receber esses resíduos (NEMCHINOVA et al., 2017).

Decerto a possível utilização de briquetes autorredutores como carga no processo metalúrgico de produção de FeSi, almejou tornar o processo mais sustentável, evidentemente observando a dinâmica dos fornos aglomeração de partículas finas por meio de compressão pela técnica de briquetagem, com auxílio ou não de um aglutinante, com objetivo de se ter um produto compactado, com a forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados para introdução nos fornos (COETSEE, 2018).

Dessa forma, elencou-se a ideia de reaproveitamento dos finos de minério de ferro, finos de carvão vegetal e sílica ativa, como componentes para fabricação de briquetes autorredutores, pois estes resíduos gerados apresentam baixo valor econômico e apresentam pouca aplicação no mercado.

Assim, justifica-se o reaproveitamento dos finos gerados e assim, busca-se uma solução sustentável utilizando a reciclagem dentro do próprio processo produtivo através da fabricação de briquetes autorredutores. Portanto, objetiva-se nesse trabalho, explicitar o reaproveitamento dos finos com o

desenvolvimento e aplicação de briquetes autorredutores como carga complementar na produção de FeSi, tendo o produto final características sustentáveis e que promova melhorias ao processo produtivo, dando enfoque na importância e vantagens que estes possuem.

REVISÃO TEÓRICA

O segmento industrial de ferrossilício

O ferrossilício (FeSi) é produzido industrialmente pela redução carbotérmica do dióxido de silício e do carbono em fornos elétricos de arco submerso, onde o quartzo (SiO_2) e óxidos de ferro (Fe_xO_y) são reduzidos a silício e ferro respectivamente com diferentes materiais de carbono como agentes redutores. As composições mais comuns de produção de FeSi tem 15%, 45 %, 75 %, ou 90 % de silício (SILVEIRA et al., 1988; AASLY, 2008; KADKHODABEIGI et al., 2011; HUSTAD, 2018).

O setor de ferroligas e silício metálico tem bastante relevância na economia mineira e brasileira. O Brasil se destaca como o 5º maior produtor e dentre os principais exportadores mundiais. Segundo o IABR (2019), no ano de 2018 o consumo de ferroligas no mercado interno para produção de aço foi de 528.820t e as exportações em torno de 495.605t.

Adicionalmente, é importante relatar que o ferrossilício atua como fonte de silício para reduzir metais de respectivos óxidos e como agente desoxidante para a produção de aço e outros tipos de ferroligas. Da mesma forma, também é uma matéria-prima na fabricação de ligas resistentes à corrosão e a altas temperaturas, usado em eletromotores e núcleos de transformadores (RAY et al., 2018)

As matérias-primas para fabricação de FeSi

A rota tecnológica mais comum para a produção metalúrgica de silício é alimentar quartzo e uma fonte de carbono (por exemplo, carvão, coque ou carvão vegetal) em fornos de arco submerso, que usam eletrodos como condutores elétricos. Assim, será realizada uma breve descrição das matérias-primas utilizadas na indústria metalúrgica objeto de estudo para uma melhor compreensão sobre este tema.

O quartzo

Na natureza, o silício combina-se com oxigênio e outros elementos para formar óxidos e silicatos, o silício (Si) é um elemento químico leve com características metálicas e não metálicas. O silício sob a forma de silicatos constitui mais de 25% da crosta terrestre. O quartzo (SiO_2) é usado para produzir ferroligas de silício (SCHEI et al., 1998).

Tabela 1: Composição química para matéria-prima portadora de silício.

Composição quantitativa (%)	Óxidos				
	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	CaO	TiO_2
	≥ 98,00	≤ 0,50	≤ 0,01	≤ 0,50	≤ 0,10

Fonte: Adaptado de Silveira et al. (1988).

Segundo, Silveira et al. (1988) e Schei et al. (1998) a matéria-prima fornecedora de silício deve possuir

as características do ponto de vista físico (elevada resistência mecânica), metalúrgico (baixa degradação e elevada reatividade), elétrico (elevada resistividade elétrica) e granulometria (usualmente 10,00 – 150,00 mm). Do ponto de vista químico, para produção das ligas de FeSi será utilizado matéria-prima com baixo nível de impurezas, logo como retrata Tabela 1, descrita por Silveira et al. (1988).

O minério de ferro

De acordo com Dana et al. (1984) e Souza (2005), os principais representantes de minerais portadores de ferro e em maior concentração nos depósitos brasileiros são a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e a limonita ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Assim, para Walde (1986) a maioria dos minérios de ferro brasileiros são formados predominantemente por óxidos e hidróxidos de ferro.

Segundo, Silveira et al. (1988) as exigências para a matéria-prima fornecedora da carga metálica são similares àquelas feitas para o quartzo, deve possuir as características do ponto de vista físico (elevada resistência mecânica), metalúrgico (baixa crepitação ou baixa degradação e elevada redutibilidade), elétrico (elevada resistividade elétrica), granulometria de tamanho médio, por exemplo, 15,00 - 45,00 mm, 18,00 - 32,00 mm ou 20,00 - 40,00 mm. A composição química com baixo nível de impurezas, logo como retrata a Tabela 2.

Tabela 2: Composição química do minério de ferro hematítico e seus principais contaminantes.

Composição quantitativa (%)	Óxidos					
	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	P_2O_5	CaO	TiO_2
	≥ 64,00	≤ 1,00	≤ 0,50	≤ 0,04	≤ 0,50	≤ 0,10

Fonte: Adaptado de Silveira et al. (1988); Ananina et al. (2009).

Carvão vegetal

O carvão vegetal é proveniente da pirólise da madeira, e por ser um material friável, durante as etapas de produção, estocagem, peneiramento e transporte, poderá vir ocorrer geração de finos em quantidade variável, devido ao processamento e às características físicas dessa matéria-prima (BUZIN, 2009).

Conforme, descreveu Silva (2016) toda esta movimentação provoca fragmentações produzindo cerca de 25,00% de finos com granulometria inferior a 9,00 mm, denominada de moinha de carvão vegetal.

Alguns ensaios já realizados indicam que o carvão vegetal e cavacos de madeira apresentam uma alta reatividade, contra uma média reatividade do coque metalúrgico, devido a sua estrutura bem porosa e com alta superfície específica do carvão vegetal (FLORES et al., 2017).

Tabela 3: Composição percentual da análise imediata do carvão vegetal.

Composição quantitativa (%)	Análise imediata de carvão			
	Umidade	Materiais Voláteis	Cinzas	Carbono Fixo
	8,00	24,00	4,00	72,00

Fonte: Adaptado de Silveira et al. (1988).

Já em relação a granulometria para sua utilização como redutor no forno elétrico a arco submerso, Schei et al. (1998) descreveram que poderá variar de 1,00 mm a 30,00 mm. Em contrapartida, Johansen et al. (1991), relataram que o tamanho mínimo crítico para partículas de carvão pode ser de 1,50 mm. A

composição percentual de uma amostra de carvão vegetal descrita por Silveira et al. (1988) encontra-se na Tabela 3.

Preparação da carga e seleção das matérias-primas para introdução no SAF

A maior parte das matérias-primas chega às usinas em caminhões, sendo descarregadas nas pilhas de estocagem. As matérias-primas são conduzidas para as pilhas de estocagem por meio de correias transportadoras ou pás carregadeiras. As correias transportadoras constituem a melhor opção de transporte de matérias-primas dentro das usinas, pois permitem uma maior velocidade no transporte aliada a uma menor geração de finos (CHAVES, 2013).

A preparação da carga exerce uma influência decisiva sobre o desempenho dos fornos. A obtenção de elevados rendimentos das matérias-primas, acompanhados por baixo consumo de energia e eficácia de produtividade, podem ser alcançados por meio de uma correta prática de carregamento em relação a parâmetros químico, metalúrgico e físico, aliada a uma eficaz supervisão das operações. Como uma preparação de carga implica normalmente em custos adicionais nas matérias-primas, um novo balanço técnico econômico que deve ser previamente realizado, sempre que aprimoramentos da carga forem realizados (SCHEI et al., 1998; KADKHODABEIGI et al., 2011; HUSTAD, 2018).

Para Schei et al. (1998) do ponto de vista metalúrgico deve-se exigir das matérias-primas: i) elevado grau de pureza e ausência em sua composição química de elementos prejudiciais ao processo ou à qualidade do produto final; iii) estabilidade de teor nos constituintes; iii) reatividade adequada.

Para Schei et al. (1998) do ponto de vista físico deve-se exigir das matérias-primas: i) faixa granulométrica estrita com diâmetro médio de grão adequado para cada componente; ii) elevada resistência à degradação sob os pontos de vista de abrasão, queda, crepitação e redução; iii) elevada resistividade elétrica mesmo em altas temperaturas.

De maneira que a natureza física dos materiais da carga com relação à granulometria e conteúdo de finos tem um significativo efeito sobre as condições de operações e rendimento do forno, as propriedades físicas das matérias-primas são provavelmente mais importantes que suas propriedades químicas. Assim, a utilização de matérias-primas com alto teor de finos resultará em insatisfatórias condições de operação do forno (JOHANSEN, 1997; SILVEIRA et al., 1988; SCHEI et al., 1998; BUZIN, 2009).

Tal como no estudo de Coetsee (2018), que relatou que também para a produção industrial de ligas de ferromangânese utilizando mais amplamente o forno de arco submerso, na maioria das plantas industriais a carga é inserida sob a forma de minério granulado. Lembrando, que em longo prazo o suprimento é limitado devido ao esgotamento das reservas minerais e assim elevadas quantidades de finos são geradas no processamento de minerais. Portanto o desenvolvimento de processos alternativos usando finos de minério (<10,00 mm) é importante.

Os finos baixam marcadamente a porosidade ou permeabilidade da carga, causando uma inadequada distribuição dos gases, perdas elevadas nos gases e formação elevada de fumos, bem como formação de crostas ou pontes de carga, as quais podem resultar em sérias erupções e explosões durante a

operação. Portanto, as matérias-primas devem ser adquiridas com baixo conteúdo de finos e em granulagem tão próxima quanto possível daquela requerida pela carga, para minimizar geração de resíduos sólidos. Embora as matérias-primas possam ser peneiradas no fornecedor, a formação de finos no manuseio/embarque e no transporte é inevitável. Assim é desejável remover tais finos pelo peneiramento na usina tão perto quanto possível do forno, antes da dosagem da carga (SILVEIRA et al., 1988; MOON et al., 2003; 2006; D'ABREU et al., 2008).

A geração de resíduos metalúrgicos

Os resíduos sólidos provenientes do processamento e fabricação de FeSi geram subprodutos ou resíduos sólidos que podem ser divididos em categorias tais como escórias, finos de quartzo, minério de ferro, carvão vegetal e sílica ativa (SILVEIRA et al., 1988; SCHEI et al., 1998). Os finos gerados em qualquer indústria de transformação ocasionam poluição ambiental, custos, problemas de manuseio, transporte e estocagem. Assim, conforme descrito no trabalho de Baptista (2016) sempre haverá geração de resíduos provenientes da indústria (Figura 1).

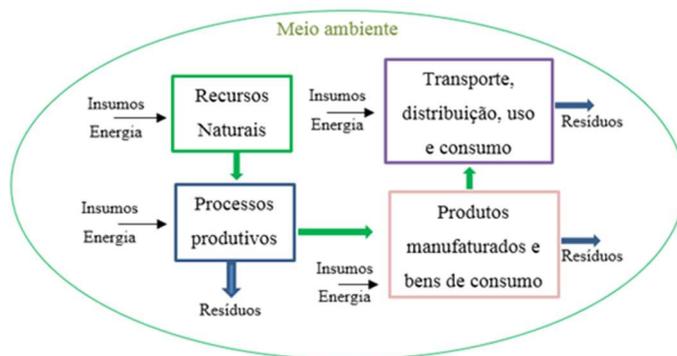


Figura 1: Relação entre meio ambiente e indústria da transformação. **Fonte:** Baptista (2016).

Os resíduos de sílica ativa são produzidos dos fornos são captados pelo sistema de tratamento de emissões atmosféricas, usualmente são utilizados sistema de tratamento de emissões atmosféricas. Esses resíduos sólidos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), não são perigosos, mas podem causar danos ao meio ambiente quando não gerenciados adequadamente. Na Tabela 4, encontra-se a classificação definida para estes resíduos, conforme laudos descritos durante visitas técnicas em indústrias de ferroligas em Minas Gerais (FEAM, 2010).

Tabela 4: Classificação de resíduos sólidos das indústrias de ferroligas e silício metálico do Estado de Minas segundo a norma ABNT NBR 10004:2004.

Resíduo	Classificação	Características
Finos de carvão vegetal	IIA	Não perigosos/Não inertes
Sílica Ativa	IIA	Não perigosos/Não inertes
Finos de quartzo	IIB	Não perigosos/ Inertes
Escória	IIA/IIB	Não perigosos/ Não inertes/ Inertes

Fonte: FEAM (2010).

Em decorrência da imposição da indústria siderúrgica e de legislações ambientais mais rigorosas, surgem as oportunidades para a inserção de novas tecnologias visando aproveitamento de resíduos. A demanda por materiais sustentáveis na indústria metalúrgica e a busca por alternativas para as cargas dos

fornos pautam-se nas possíveis tecnologias aplicáveis à sua reutilização, reciclagem ou recuperação de sua carga metálica, apontando assim tendências e/ou estratégias tecnológicas que possibilitem contribuir para aumentar a sustentabilidade deste setor industrial (LEMOS et al., 2019).

Finos de minério de ferro

Os finos de minério de ferro são gerados devido a degradação da matéria-prima proveniente de seu *lump ore* (minério granulado), relativo às características tecnológicas da matéria-prima e agravadas pela movimentação da carga no próprio processo produtivo (carga, descarga, peneiramento e queda) (SILVEIRA et al., 1988; SCHEI et al., 1998; MOON et al., 2003; 2006).

Segundo Ray et al. (2018), os rejeitos silicosos de baixa granulometria gerados durante o beneficiamento dos minérios de ferro de baixa qualidade pode ser considerado um recurso valioso para a produção de liga de FeSi.

Sílica ativa

A sílica ativa (microssílica) é um resíduo da reação entre quartzo de alta pureza e carvão na produção de silício metálico e ligas de ferrosilício. Também é obtida na produção de outras ligas, tais como ferrocromo e ferro-manganês sendo esta, constituída por finas partículas amorfas e esféricas de dióxido de silício, massa unitária entre 150,00 – 350,00 kg/m³, com diâmetro médio de 0,10 µm e com área superficial específica próxima a 20.000 m²/kg (MYHRE, 1994; NBR 13956-2/ABNT, 2012).

Na sílica ativa, tem-se como principal característica, a grande quantidade de SiO₂ presente, que, invariavelmente, fica em patamares superiores a 80%, sendo que este teor está diretamente relacionado com a forma de produção existente. As indústrias que adotam o teor de silício na ordem de 75% produzem um rejeito com teores entre 85% e 90% de SiO₂ não cristalina (MALHOTRA, 1996).

Segundo Sensale (2000) e a NBR 13956-2 (ABNT, 2012) as principais impurezas são os álcalis K₂O e Na₂O, onde o primeiro encontra-se em teores de 1% a 5%. Impurezas como CaO e MgO ocorrem em teores inferiores a 2%. Os teores típicos dos principais elementos que constituem a sílica ativa segundo Malhotra et al. (1996) estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5: Composição química típica da sílica ativa proveniente de algumas indústrias metalúrgicas.

Composição elementar (%)	Sílica ativa (indústria Silício metálico)	Sílica ativa (indústria FeSi 75%)	Sílica ativa (indústria FeSi 45%)
SiO ₂	94,00	90,00	83,00
Fe ₂ O ₃	0,03	2,90	2,50
Al ₂ O ₃	0,06	1,00	2,50
CaO	0,50	0,10	0,80
MgO	1,10	0,20	3,00
Álcalis	0,10	2,20	2,30
PPC	2,50	2,70	3,60

Fonte: Adaptado de Malhotra et al. (1996).

O termo, sílica ativa é aplicado a partículas extremamente finas e esféricas de matéria silicosa removidas dos gases, usualmente por filtros de mangas em usinas produtoras de silício metálico ou liga de

ferrossilício. O SiO gasoso produzido durante a redução de quartzo oxida em contato com o ar e partículas constituídas essencialmente por sílica não cristalina são geradas (RTR, 1988; NÆSS et al., 2014).

As partículas de sílica ativa são removidas e coletadas pelos filtros de tratamento dos gases efluentes dos fornos. Assim, em conformidade à legislação ambiental no país, pois o material particulado presente na atmosfera é considerado um poluente primário. Já em relação a sua disposição final como resíduo, a sílica ativa é considerada um subproduto inerte e mediante atribuições da Resolução do CONAMA nº 313 (BRASIL, 2002) e da NBR 10004 (ABNT, 2004), deve-se propor a gestão da sua utilização em relação às finalidades de reciclagem, reaproveitamento e disposição final.

Entretanto, devido a baixa granulometria de suas partículas haverá necessidade de acondicioná-las em sacarias, tanto para sua comercialização como para a sua disposição final. De modo que, o custo do invólucro para acondicionamento também será adicionado ao custo de recuperação e a disposição deste produto. Porventura, o mercado consumidor da região em que se encontra localizada a indústria metalúrgica, não incorporar a sílica ativa, haverá necessidade de seu encaminhamento em aterro industrial, o que impacta em recursos de gestão ambiental e econômicos (BARATA, 1998).

Finos de carvão vegetal

Os finos de carvão vegetal consistem nas frações resultantes do *undersize* do peneiramento na área dos fornos. Diversas pesquisas promoveram a utilização de finos de carvão vegetal, como alternativa sustentável e econômica no processo produtivo siderúrgico ou metalúrgico.

Buzin (2009) propôs o desenvolvimento de briquetes autorredutores com carepa de aciaria e finos de carvão vegetal, com possibilidade de utilização em forno elétrico a arco. O comportamento dos briquetes foi avaliado qualitativamente em altas temperaturas, o desempenho e os resultados obtidos permitiram concluir a potencialidade da utilização dos briquetes autorredutores com parte da carga de forno elétrico a arco.

Silva (2016) avaliou a adição de pneus inservíveis e moinha de carvão vegetal como aditivos alternativos e por outro lado, Silva (2018) pesquisou a injeção de finos de carvão nas ventaneiras dos altos-fornos, assim estudou quatro combustíveis: carvão mineral australiano, carvão mineral norte-americano, moinha de carvão vegetal e coque verde de petróleo, realizando a caracterização química, física, mineralógica e a avaliação da eficiência de queima. Em seus resultados os finos de carvão vegetal apresentou um melhor desempenho de queima e combustibilidade.

METODOLOGIA

Este trabalho se trata de uma revisão bibliográfica, baseada na busca por artigos científicos em português, inglês e espanhol que abordassem do assunto Engenharia Metalúrgica e Sustentabilidade Ambiental sendo o tema central a reutilização dos resíduos de finos das matérias-primas do processo de produção de FeSi no formato de briquetes autorredutores.

Foram utilizados bancos de dados que possuem renome na área acadêmica como *Scientific Electronic*

Library Online (SciELO), Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Google Acadêmico; limitando o período de publicação de 2000 a 2021.

Para restrição da pesquisa utilizou-se as palavras-chaves: Briquetes; finos; resíduos; indústria de FeSi; processos metalúrgicos ferroligas. Dentro dessas especificações, reuniu-se 53 trabalhos de interesse, que foram catalogados e após leitura e discussão elencou-se 11 artigos para serem explicitadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme, descreveu Zhdanov et al. (2015) a resolução eficiente do problema de reciclagem de resíduos requer o máximo coleta e disposição dos resíduos e análise de usos alternativos para eles com base em uma avaliação de suas características físico-químicas (químicas, fracionárias e mineralógica composições, além de várias outras características).

O desperdício de qualquer produção metalúrgica está associado à limitação de pesquisas que gerenciem a utilização mais efetiva de matérias-primas no processo. Além disso, a deterioração da qualidade das matérias-primas minerais naturais, diminuindo os elementos principais nas mesmas, leva a um aumento na perda de materiais e resíduos. Isso se aplica à produção de ferroligas onde o baixo grau de aproveitamento de elementos valiosos das ligas está associado às suas perdas em todas as etapas de produção das matérias-primas (ZHUCHKOV et al., 2021).

Assim, conforme estudaram Cherednichenko et al. (2019) as condições da economia de mercado, as industriais enfrentam agudamente os problemas de energia e conservação de recursos. A refusão metalúrgica de resíduos não é apenas economicamente rentável, mas também diminui o número e a área dos aterros industriais, diminuindo assim ecologicamente estresse.

Os registros contidos na literatura apontam eficiência na utilização de partículas de finos para potencial aglomeração e utilização no processo produtivo de diferentes setores da indústria de transformação, com o intuito de promover reutilização de resíduos e portanto, sustentabilidade no processo. A Tabela 6 elenca dez estudos sobre aglomeração de resíduos e sua utilização em fornos elétricos realizados a partir das pesquisas de diversos setores da indústria.

Tabela 6: Relação das pesquisas científicas levantados no presente estudo.

Item	Título do artigo	Periódico	Autores	Qualis/Capes (Área: Engenharia II; Quadriênio: 2013 - 2016)
1	Ferroalloy industry waste processing	Materials Science and Engineering	CHEREDNICHENKO et al. (2019)	B3
2	Flexibilidade de matérias-primas no processo TecnoRed	Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração	NOLDIN et al. (2007)	B2
3	Silicon Carbide Production from Steel Plant Wastes	Steel in Translation	POLYAKH et al. (2014)	B1
4	Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency.	Journal of Cleaner Production	SUETENS et al. (2014)	A1
5	MnO reduction in high carbon ferromanganese production: practice and theory	Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review	COETSEE et al. (2018)	A1

6	Briquetting conditions for Australian hematite-goethite iron ore fines	ISIJ International	VINING et al. (2017)	A2
7	The Using of Technogenic Waste from Ferroalloy Production	KnE Materials Science	ZHUCHKOV et al. (2021)	B3
8	Mechanical strength of briquettes for use in blast furnaces	REM - International Engineering Journal	LEMOS et al. (2019)	B1
9	Utilization of Dust from Silicon Production	Steel in Translation	NEMCHINOVA et al. (2017)	B1
10	Development of agglomeration process to utilize the ferromanganese fines in steel making process	ISIJ International	SINGH et al. (2011)	A2
11	Problems with waste generation and recycling in the ferroalloys industry	Metallurg	ZHDANOV et al. (2015)	B1

Em relação à granulometria adequada à briquetagem dos minérios com densidade elevada é recomendada como sendo inferior a 3,30mm, como foi descrito por Carvalho e Brinck (2010). Além do que como descreveu Lemos et al. (2019) a granulometria da mistura a ser briquetada é importante, pois o aumento da área superficial das partículas eleva a área de contato entre elas.

Pois, conforme descreveu Coetsee (2018) as partículas mais finas são preferidas para briquetagem, corroborando com Vining et al. (2017) que afirmaram ser um processo alternativo prospectivo para aglomerar finos, em se tratando de aglomeração por pressão. Embora ser desejável uma mistura que apresente uma distribuição granulométrica mais ampla, evidenciando a presença de partículas de diferentes tamanhos, desde as maiores até as menores partículas.

Sampaio et al. (2007) declaram que a análise preliminar da viabilidade técnica para elaboração dos briquetes em projeto de instalação industrial é fundamental, portanto, deve-se avaliar a granulometria da matéria-prima; composição; utilização ou não de aglomerantes; ajuste dos teores de umidade da mistura em relação a resistência mecânica necessária; a pressão dentre outros.

Por outro lado, Noldin Júnior et. al (2007) descreveram em seu trabalho que no interior do aglomerado, após atingir a temperatura de reatividade, o carbono sólido presente produz os gases redutores que são responsáveis pela redução dos óxidos em um ambiente livre de gases inertes. Assim, possivelmente qualquer material fino e com elevado teor de carbono fixo (> 50%) pode ser utilizado como agente redutor nos aglomerados autorredutores devido às ótimas condições cinéticas presentes no processo.

Por outro lado, Narita (2015) fabricou aglomerados autorredutores de minério de ferro e carvão mineral em processo a frio seguido de tratamento térmico e mensurou a qualidade dos briquetes em relação à qualidade de resistência mecânica, onde foram identificadas variáveis de processos: tamanho da partícula, pressão de conformação, proporção de componentes, temperatura de tratamento térmico dentre outras. Evidenciando-se que a necessidade de se impor aos briquetes características de alta resistência mecânica se deve ao fato de se evitar a desintegração e quebra dos aglomerados devido a rigorosas forças aplicadas ao manuseio e transporte (LEMOS et al., 2019).

Outra propriedade importante para produção de briquetes com parâmetros que atendam a viabilidade técnica é o teor de umidade do material antes da adição do aglutinante. A umidade ideal depende do material e do tipo de aglutinante utilizado, além de influenciar no valor da pressão a ser aplicada. Para estabilizar e aperfeiçoar a umidade nos briquetes é importante que sejam tomados cuidados especiais com

o controle do processo, pois a mistura deve possuir característica homogênea e que promova a compactação (SAMPAIO et al., 2007).

De forma que, a utilização de aglutinantes no processo de fabricação dos briquetes se justifica quando o material a ser compactado não possui características intrínsecas de aglutinação (SAMPAIO et al., 2007; OLIVEIRA, 2013).

Por outro lado, Al'perovich et al. (2008) e Nemchinova et al. (2017), verificaram através de extensivos ensaios em laboratório e testes industriais que as partículas de finos agregadas deveriam atender os seguintes requisitos: força mecânica adequada (a capacidade de resistir à abrasão e ao desgaste em transporte e carregamento); tamanho uniforme (para permitir permeabilidade uniforme de gás); alta reatividade; resistividade elétrica; estabilidade térmica adequada (a capacidade de resistir mudanças bruscas de temperatura); e porosidade adequada (permitindo a penetração de reagentes gasosos, com aumento correspondente na superfície de reação). Além, de que para atingir a resistividade necessária do agregado ($0,130 \Omega/m$) a $1200^{\circ}C$, a densidade adequada e a porosidade são $950,00 - 1250,00 \text{ kg/m}^3$ e $45,00\% - 55,00\%$, respectivamente.

Inclusive, Suetens et al. (2014) declararam que o material de carbono deve ser selecionado para alcançar a maior eficiência do forno, pois duas propriedades são relevantes: resistência elétrica e porosidade.

Os estudos realizados por Polyakh et al. (2014) avaliaram a utilização da microssilica como promissor matéria-prima para a produção de nanocarbeto de silício e nanocompósitos. Corroborando em pesquisas, que vem sendo discutidas por mais de 25 anos e que demonstram através da síntese de carbeto de silício (SiC) no forno e sua produção metalúrgica, que podem ser convenientes produzir SiC a partir de microssilica industrial por síntese em forno e metalurgia de plasma.

Por outro lado, Nemchinova et al. (2017) estudaram a reutilização de pequenas frações de microssilica em agregados (*pellets*) que poderiam ser adicionados à carga principal para produção de silício metálico. Assim, estes pesquisadores obtiveram para formulação desses *pellets*, com base na reação simplificada de produção de Silício(s), a proporção de 24 - 27% de sílica; 51 - 53% de agente de redução de carbono (uma mistura 1: 1 de coque de petróleo e carvão vegetal); 4 - 5% de finos de silício(s); 14 - 15% aglutinante (uma mistura 4: 1 de silicato de sódio e pó de eletrofiltro da produção de alumínio). Portanto, para esse lote de agregados produzidos, a resistência nos testes de queda foi de 82,5%, em média; obtiveram uma estrutura porosa (45,50%) para a formação de uma superfície ativa bem desenvolvida e a densidade aparente correspondente ($1100,00 \text{ kg/cm}^3$), demonstrando que esses agregados suportariam uma operação estável do forno.

De maneira que, visando à redução do custo com destinação e contribuir para a minimização do impacto ambiental e do desperdício de matérias-primas há aplicação de tecnologias emergentes, que se sobressaem na utilização de aglomerados autorredutores como insumo de carga nos fornos elétricos a arco (BUZIN, 2009).

Em suma, como pesquisado por Singh et al. (2011) que desenvolveram um processo de aglomeração para utilização de finos de FeMn com granulometria $<3,00 \text{ mm}$ e produziram briquetes para serem utilizados

no processo de fabricação de aço líquido. A mistura de ligantes e finos para produção dos briquetes foi em uma matriz cilíndrica e curado a 150°C durante 1 h. Os briquetes foram produzidos com 30 mm de diâmetro e 20 mm de comprimento e com pressões de compactação de 1,00t; 3,00t e 5,00t. Posteriormente testaram as propriedades de resistência mecânica dos briquetes, sendo o índice de tamboramento e o índice de quebra dos briquetes foram de 95,00% e 98,00%, respectivamente e a resistência à compressão radial foi de 55,00 MPa.

Além disso, como citaram Sampaio et al. (2007) quanto menor for a quantidade de partículas finas, menor será o percentual de aglomerante necessária para gerar um briquete de boa qualidade. Os autores exemplificaram que para briquetagem do carvão, a mistura não pode conter mais de 20,00% das partículas com tamanho menor do que 0,50mm e não mais do que 5,00% de partículas com tamanho menor do que 90µm.

Na verdade, os índices de resistência mecânica dos briquetes são um fator importante - e muitas vezes o principal fator - que determina seu valor comercial e a viabilidade de usá-los em diferentes plantas metalúrgicas nas condições intrínsecas destas usinas (EREMIN et al., 2003).

Por fim, visando à redução do custo com destinação e contribuir para a minimização do impacto ambiental e do desperdício de matérias-primas há aplicação de tecnologias emergentes, que se sobressaem na utilização de resíduos como aglomerados autorredutores como insumo de carga nos fornos elétricos (BUZIN, 2009).

CONCLUSÕES

Observou-se que a literatura oferece uma limitada quantidade de opções para que a indústria de ferroligas busque se diversificar no que tange a práticas mais eficazes no reprocessamento dos resíduos, assim, é relativamente pequena sua escala de utilização.

Quando comparados os estudos abordados, demonstraram potencialidade para o reprocessamento dos resíduos de finos e se apresentaram eficientes, em parâmetros essenciais de resistência mecânica e metalúrgica, além de outros benefícios como: otimização do processo produtivo, redução nos custos relacionados a disposição de resíduos, elevada sustentabilidade ambiental, simples manejo da técnica de briquetagem, e não há riscos a saúde associados a sua utilização. Desta forma, a aplicação da aglomeração dos finos em formato de briquetes autorredutores é uma alternativa economicamente viável e ambientalmente sustentável.

Além disso, as informações técnico-científicas sobre as características dos resíduos sólidos metalúrgicos, principalmente com a possibilidade de sua reutilização e recuperação fortaleceram a necessidade de buscar inovações científicas para o setor de ferroligas.

REFERÊNCIAS

AASLY, K.. **Properties and behavior of quartz for the silicon process**. Thesis (Degree of Philosophiae Doctor) – Norwegian University of Science and Technology,

Trondheim, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas e Métodos, **Norma**

Brasileira nº 10004. Resíduos sólidos - Classificação, NBR 10004. 2.ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas e Métodos. **Norma Brasileira nº 13956-2.** Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 2: Ensaio químico, NBR 13956-2. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AL'PEROVICH, I. G.; REPINA, L. I.; SERGEEVA, I. V.; FINBERG, D. P.. **RF Patent 2333889.** Byull. Izobret, 2008.

ANANINA, S. A.; VERUSHKIN, V. V.; ISKHAKOV, F. M.; BUDENNYI, O. V.; SHESTERIN, V. P.. Production of Ferrosilicon with a low impurity contents. **Russian Metallurgy (Metally)**, Chelyabinsk, v.2009, n.8, p.748-751, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1134/s0036029509080151>

BAPTÍSTA, A. L. B.. **Desenvolvimento de um briquete auto-fundente, multiconstituído de rejeitos, resíduos e descartes recicláveis gerados na planta integrada de produção de aço, aplicado como componente da carga de fornos de redução.** Dissertação (Mestrado em Materiais) – Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2016.

BARATA, M.. **Concreto de Alto Desempenho no Estado do Pará:** estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BUZIN, P. J. W. K.. **Desenvolvimento de briquetes autorredutores a partir de carepas de processamento siderúrgico para utilização em forno elétrico a arco.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BRASIL. **Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.** Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais; publicada no DOU no 226, de 22 de novembro de 2002, Seção 1, páginas 85-91. Brasília: CONAMA, 2002.

CHAVES, E. L.. **Gestão ambiental do gás do alto forno e avaliação dos sistemas de controle atmosféricos de siderúrgica, viabilizando um sistema de geração de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CHEREDNICHENKO, M. V.; ZUEV, S. P.. Ferroalloy industry waste processing. **Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v.560, n.1, p.012134, 2019. DOI: <http://doi.org/doi:10.1088/1757-899X/560/1/012134>

COETSEE, T.. MnO reduction in high carbon ferromanganese production: practice and theory. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, Pretória, v.39, n.5, p.351-358, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1080/08827508.2018.1459618>

D'ABREU, J. C.; KOHLER, H. M.; NOLDIN JUNIOR, J. H.. Mathematical model for descending selfreducing agglomerates in lumpy zone of Tecomored furnace. **Ironmaking and Steelmaking**, v.35, n.7, p.484-491, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1179/174328108X358514>

DANA, J. D.; HURLBUT JUNIOR, C. S.. **Manual de Mineralogia.** 9 ed. Rio de Janeiro: Técnicos e Científicos, 1984.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Levantamento da Situação Ambiental e Energética do Setor de Ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, com Prospecção de Ações para o Desenvolvimento Sustentável da Atividade:** Relatório de Requisitos Legais. Belo Horizonte: FEAM, 2010.

FLORES, B. D.; FLORES, I. V.; GUERRERO, A. G.; DIEZ, M. A.; BORREGO, A. G.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F.. Effect of charcoal blending with a vitrinite rich coking coal on coke reactivity. **Fuel Processing Technology**, v.155, n.1, p.97-105, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.07.004>

HASANNEZHAD, H.; MEYSAMI, A.. Effects of Porosity and Electrical Resistance of Metallurgical Coke and Semicoke on Silicon Recovery in an Electric Arc Furnace. **JOM**, v.71, n.1, p.336-341, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11837-018-3172-x>

HUSTAD, H. M.. **Tapping of FeSi Furnaces.** Thesis (Chemical Engineering and Biotechnology Doctor) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2018.

JOHANSEN, S. T.; GRADAH, S.; GAMMELSAETER, R.; RAANES, M.; ARNTSBERG, A. E.; LINDSTAD, T.; ENSTAD, G.; TVEIT, H.. Clogging of ferrosilicon furnace off-gas channels at high temperatures in smelter process gas handling and treatment. **In The Minerals, Metals and Materials Society**, p.7-18, 1991.

JOHANSEN, W. K.. Materials Manhandling in the Mining and Smelting Industries. **JOM**, Oslo, v.49, n.4, p.53-57, 1997. DOI: <http://doi.org/10.1007/BF02914878>

KADKHODABEIGI, M.; TVEIT, H.; JOHANSEN, S. T.. Modelling the Tapping Process in Submerged Arc Furnaces Used in High Silicon Alloys Production. **ISIJ International**, Trondheim, v.51, n.2, p.193-202, 2011. DOI: <http://doi.org/10.2355/isijinternational.51.193>

KERO, I.; GRADAH, S.; TRANELL, G.. Airborne Emissions from Si/FeSi Production. **JOM**, Trondheim, v.69, n.2, p.365-380, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11837-016-2149-x>

LEMO, L. R.; ROCHA, S. H. F. S.; CASTRO, L. F. A.; ASSUNÇÃO, G. B. M.; SILVA, G. L. R.. Mechanical strength of briquettes for use in blast furnaces. **REM - International Engineering Journal**, Ouro Preto, v.72, n.1, p.63-69, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672017720156>

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K.. **Pozzolanic and cementitious materials.** Advances in Concrete Technology. Gordon and Breach Publishers, 1996.

MOON, J.; SAHAJWALLA, V.. Kinetic Model for the Uniform Conversion of Self-Reducing Iron Oxide and Carbon Briquettes. **ISIJ International**, v.43, n.8, p.1136-1142, 2003. DOI: <http://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1136>

MOON, J.; SAHAJWALLA, V.. Investigation into the Role of the Boudouard Reaction in Self-Reducing Iron Oxide and Carbon Briquettes. **ISIJ International**, v.37B, p.215-221, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02693151>

MYHRE, B.. The effect of particle-size distribution on flow of refractory castables. In: Annual Refractories Symposium, 30. USA. **Anais the American Ceramic Society**. Missouri: The American Ceramic Society, 1994.

NARITA, C. Y.. **Estudo da obtenção de briquetes autorredutores de minério de ferro e carvão fóssil endurecidos por tratamento térmico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

NÆSS, M. K.; KERO, I.; TRANELL, G.; TANG, K.; TVEIT, H.. Element distribution in Silicon refining: thermodynamic model and industrial measurements. **JOM**, Trondheim, v.66, n.11, p.2343-2354, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-013-0797-7>

NEMCHINOVA, N. V.; MINEEV, G. G.; TYUTRIN, A. A.; YAKOVLEVA, A. A.. Utilization of Dust from Silicon Production. **Steel in Translation**, v.47, n.12, p.948-957, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3103/S0967091217120087>

NOLDIN JÚNIOR, J. H.; D'ABREU, J. C.; MARCHEZE, E. S.; COSTA, P. H. C.. Flexibilidade de matérias-primas no processo Tecnoled. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v.3, n.3, p.22-27, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00303005>

POLYAKH, O. A.; RUDNEVA, V. V.; YAKUSHEVICH, N. F.; GALEVSKII, G. V.; ANIKIN, A. E.. Silicon Carbide Production from Steel Plant Wastes. **Steel in Translation**, v.44, n.8, p.05-12, 2014. DOI: <http://doi.org/10.3103/S0967091214080105>

OLIVEIRA, R. R. L.. **Moldagem de briquetes com finos de carvão vegetal aglutinado com parafina: caracterização de algumas propriedades**. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Materiais) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

RAY, N.; NAYAK, D.; DASH, N.; RATH, S. S.. Utilization of low-grade-banded hematite jasper ores: recovery of iron values and production of ferrosilicon. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.20, n.8, p.1761–1771, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s10098-018-1566-7>

RTR. Rilem Technical Reports. Final Report Siliceous by-products for use in concrete. **Materials and Structures**, v.21, n.1, p.69-80, 1988.

SAMPAIO, J. A.; COSTA, L. S. N.; ANDRADE, M. C.. Ensaios contínuos de briquetagem em bancada e piloto, In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.. **Tratamento de Minérios: Práticas laboratoriais**. CETEM/MCT, 2007. p.379-390.

SCHEI, A.; TUSET, J. K.; TVEIT, H.. **Production of High Silicon Alloys**. Trondheim: Tapir Forlag, 1998.

SENSALE, G. R. B.. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Porto Alegre, 2000.

SILVA, G. L. R.. **Utilização de Moinha de biorredutor e pneu inservível na produção de coque metalúrgico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.

SILVA, K. G.. **Caracterização de Combustíveis Sólidos Pulverizados para Injeção em Alto-forno**. Dissertação (Mestre em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

SILVEIRA, R. C.; ALMEIDA, A. M. M.. **Tecnologia da fabricação das ligas à base de silício**. Organização de Metalur Eletrovale S.A. Belo Horizonte: Consultoria e Participações LTDA, 1988.

SINGH, V.; TATHAVADKER, V.. Development of agglomeration process to utilize the ferromanganese fines in steel making process. **ISIJ**, v.51, n.01, p.59-62, 2011. DOI: <http://doi.org/10.2355/isijinternational.51.59>

SLOMAN, B. M. A.; PLEASE, C. P.; GORDER, R. A.; VALDERHAUG, A. M.; BIRKELAND, R. G.; WEGGE, H.. Heat and Mass Transfer Model of a Silicon Pilot Furnace. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.48B, p.2664-2676, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11663-017-1052-3>

SOUZA, E. S.. **Rota de processo para aproveitamento de rochas itabiríticas estéreis da Mina de Conceição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

SUETENS, T.; KLAASEN, B.; ACKER, K. V.; BLANPAIN, B.. Comparison of electric arc furnace dust treatment technologies using exergy efficiency. **Journal of Cleaner Production**, v.65, p.152-167, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.calphad.2015.11.003>

VINING, K. R.; KHOSA, J.; SPARROW, G. J.. Briquetting conditions for Australian hematite-goethite iron ore fines. **ISIJ International**, v.57, n.9, p.1517-1523, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-052>

WALDE, D. H. G.. Geologia do ferro. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S.. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM, 1986. p.3-6.

ZHDANOV, A. V.; ZHUCHKOV, V. I.; DASHEVSKII, V. Y.; LEONT'EV, L. I.. Problems with waste generation and recycling in the ferroalloys industry. **Metallurgist**, v.58, n.11-12, p.1064-1070, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11015-015-0041-5>

ZHUCHKOV, V. I.; SYCHEV, A. V.; ZAYAKIN, O. V.; LEONTIEV, L. I.. The Using of Technogenic Waste from Ferroalloy Production. **TECHNOGEN-2019; IV Congress Fundamental research and applied developing of recycling and utilization processes of technogenic formations**. **KnE Materials Science**, v.2020, p.451–455, 2021. DOI: <http://doi.org/10.18502/kms.v6i1.812>