



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**



RAISSA CRISTINA DA SILVA BASILIO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
PARA DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETE UTILIZANDO REJEITO
DE MINÉRIO DE FERRO**

**Ouro Preto
2022**

RAISSA CRISTINA DA SILVA BASILIO

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL
PARA DESENVOLVIMENTO DE BRIQUETE UTILIZANDO REJEITO
DE MINÉRIO DE FERRO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto
como requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Ambiental
Orientador: José Fernando Miranda, Dr.
Coorientador: Adam Barros Fernandes, Msc.

**Ouro Preto
2022**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B312a Basilio, Raissa Cristina da Silva.

Análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental para desenvolvimento de briquete utilizando rejeito de minério de ferro. [manuscrito] / Raissa Cristina da Silva Basilio. - 2022.

54 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.

Coorientador: Me. Adam Barros Fernandes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Briquetes. 2. Rejeitos (Metalurgia) - Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Ferro - Minas e mineração. 4. Siderurgia. 5. Tecnologia ambiental. 6. Sustentabilidade. I. Miranda, José Fernando. II. Fernandes, Adam Barros. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 504:004

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Raissa Cristina da Silva Basilio

Análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental para desenvolvimento de briquete utilizando rejeito de minério de ferro

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental

Aprovada em 12 de janeiro de 2022

Membros da banca

Dr. José Fernando Miranda - Orientador - (Universidade federal de Ouro Preto)
Dr. Paulo Santos Assis - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Adam Barros Fernandes - (VALE)

José Fernando Miranda, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 28 de janeiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/02/2026, às 10:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1061698** e o código CRC **5785FF82**.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Angela e Antônio, pelo amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me guiar e permitir a realização desse grande sonho. Por ter me proporcionado o privilégio de estudar e cruzar o caminho de tantas pessoas especiais.

À minha querida mãe, Angela, e ao meu amado pai, Antônio, pelo apoio incondicional. Obrigada por serem meu suporte e meus maiores apoiadores. Dedico essa conquista a vocês!

Ao meu irmão Ray por estar sempre ao meu lado em cada momento e escolha ao longo dessa jornada. Ao meu namorado e amigo Mauricio, por ser meu maior incentivador e por me fazer acreditar em mim todos os dias. À minha família e amigos, pelo carinho, parceria e por torcerem sempre por mim.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Fernando Miranda, pela orientação, por ter confiado em mim e no meu trabalho. Por todos os ensinamentos, pela paciência e por trilhar essa jornada comigo.

Ao Prof. Dr. Paulo Assis Santos por todo incentivo durante minha graduação, pelo conhecimento compartilhado que foram fundamentais na realização deste trabalho. E por sempre acreditar no meu potencial.

Ao Adam Barros pelo apoio, conselhos e revisões no desenvolvimento do trabalho.

Agradeço aos meus colegas Anna Laura, Ana Carollina, Rafael, Gabriel, Cláudio, Arthur, Amanda e Igor pelas contribuições e pelos bons momentos durante o período de execução desse projeto.

À UFOP, à gloriosa Escola de Minas, todos os professores e funcionários, pela oportunidade de um ensino de qualidade e pelo conhecimento compartilhado.

“Na Natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.” (Antoine-Laurent de Lavoisier)

RESUMO

A responsabilidade ambiental é um papel essencial no cotidiano dos engenheiros, principalmente no que tange à disposição final dos resíduos que são gerados pelos processos produtivos. Em especial, a mineração que é destacada por diversos autores como uma atividade primordial para a economia do estado de Minas Gerais e para o país. No entanto, existem inúmeros estudos relatando seus impactos ao meio ambiente. A atividade mineradora em Minas Gerais, especificamente o beneficiamento do minério de ferro, envolve etapas de separação entre o material de interesse primordial (minério de ferro) e a ganga (sílica e outros contaminantes), e devido a limitações dos processos de separação, são gerados grandes volumes de materiais atualmente sem aproveitamento econômico, isto é, resíduos. Esse material gerado (rejeito argiloso e rejeito arenoso) é, então, disposto em barragens de rejeitos, gerando ônus para o empreendimento mineiro e impactos socioambientais. Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo apresentar uma breve revisão bibliográfica acerca do cenário da mineração no Brasil e realizar a análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental para aproveitamento de rejeitos de uma mina de ferro para o desenvolvimento de briquetes como forma de mitigar os impactos desse setor. Embora estudos a respeito do uso de ambos os rejeitos já estejam em desenvolvimento, há muito o que fazer pelo grande volume gerado, aumentando ainda mais a demanda por um desenvolvimento sustentável, nos mais diversos setores industriais. A implementação de tecnologias de redução de resíduos na cadeia produtiva da mineração, possui direcionamentos para a sustentabilidade do setor e importante retorno socioeconômico à população dos municípios próximos às mineradoras. Acreditando na incorporação da economia circular, a viabilidade da tecnologia para reaproveitamento de rejeitos na produção de insumos para a indústria produtora de ligas ferrosilício, se torna uma prática viável, dentro dos princípios da sustentabilidade.

Palavras-chaves: Sustentabilidade; Mineração;Tecnologiaa; Siderurgia; Briquetes; Reaproveitamento de rejeitos.

ABSTRACT

Environmental responsibility is an essential role in the engineer's daily lives, especially when regarding to the final disposal of waste generated by production processes. In particular, mining, which is highlighted by several authors as the main activity for the state of Minas Gerais' economy, and also for the country. However, there are numerous studies reporting its impacts on the environment. The mining activity in Minas Gerais, specifically the beneficiation of iron exploitation, involves separation steps between the material of primary interest (iron ore) and gangue (silica and other contaminants), and due to the limitations of the separation processes, there are large volumes of materials are currently generated without economic use, that is, the waste. This generated material (clay, tailings and sandy tailings) is then disposed on dams, creating a burden for the mining enterprise and socio-environmental impacts. In this context, this study aims to present a brief bibliographical review about the mining scenario in Brazil and to carry out a technical, economic and environmental feasibility analysis for the use of tailings from an iron mine for the development of briquettes as a way to mitigate the impacts that sector. Although studies on the use of both tailings are already underway, there is much to be done due to the large volume generated, furthermore, increasing the demand for sustainable development in the most diverse industrial sectors. The implementation of waste reduction technologies in the mining production chain has directions for the sustainability of the sector and an important socioeconomic return to the population of municipalities close to the mining companies. Believing in the incorporation of circular economy, the viability of the technology for reusing tailings in the production of inputs for the ferrosilicon alloy producing industry, becomes a viable practice, within the principles of sustainability.

Key-words: Sustainability; Mining; Technologies; Steelmaking; Briquettes; Reuse of tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Panorama da estrutura industrial de Minas Gerais	14
Figura 2 – Fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro	16
Figura 3 – Princípio da compressão em prensas de rolo	20
Figura 4 – Briquetagem por extrusão contínua	20
Figura 5 – Briquetagem por prensas hidráulicas	21
Figura 6 – Formas diferentes de aglomeração de partículas finas, com aplicação de pressão.	24
Figura 7 – Composição dos custos de uma indústria de ferroligas.	31
Figura 8 – Estimativa anual de Produção de FeSi e demanda de MP(ton)	33
Figura 9 – Estimativa de custos de Produção de FeSi (1 ton).	33
Figura 10 – Análise de Impacto Anual nas Empresas de Ferroligas em Minas Gerais	34
Figura 11 – Geração e destinação de resíduos na siderurgia.	37
Figura 12 – Fluxograma do processo de produção dos briquetes de resíduo da mineração.	41
Figura 13 – Quarteamento manual de uma massa de 15kg de amostra do rejeito arenoso.	42
Figura 14 – Comportamento de diferentes misturas realizadas.	43
Figura 15 – Vista de frente e interna dos moldes de corpo de prova	44
Figura 16 – Corpos de prova aguardando 7 dias para cura a frio.	44
Figura 17 – Posicionamento dos corpos de prova no forno mufla a 1000°C.	45
Figura 18 – Figura: Início e fim do teste de crepitação durante 35 segundos de agitação (M4).	45
Figura 19 – Impacto econômico da substituição parcial das matérias primas utilizando os briquetes (BAR) na produção de ferroligas.	49
Figura 20 – Vantagens do uso de briquetes para introdução de finos em instalações metalúrgicas.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos setores e representatividade de empregos na região Sede	14
Tabela 2 – Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete	27
Tabela 3 – Matriz SWOT dos fornecedores de quartzo.	35
Tabela 4 – Matriz SWOT dos fornecedores de carepa.	37
Tabela 5 – Comparativo entre o briquete e seus concorrentes.	38
Tabela 6 – Composições das misturas	42
Tabela 7 – Resultados do teste de crepitação.	46
Tabela 8 – Estudo de aglomerantes para o processo de briquetagem	47

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivo Específico	12
1.2	Organização	12
2	Revisão Bibliográfica	13
2.1	Minério de Ferro - Informações Gerais	13
2.2	Beneficiamento do Minério de Ferro e a Geração de Rejeitos	15
2.3	Oportunidades de Negócios Utilizando Rejeito Arenoso em Outros Setores Industriais	17
2.4	Processos de briquetagem no setor minero-metalúrgico	18
2.4.1	Processo de Aglomeração por briquetagem	18
2.4.2	Briquetagem	18
2.4.3	Aglomerantes	26
2.4.4	Avaliação da qualidade dos briquetes	26
2.5	Inovação pelo mundo	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Estudo de Viabilidade e Prospecção de Mercado	30
3.1.1	Análise econômica	33
3.1.1.1	Análise de concorrentes	34
3.2	Processo Produtivo: briquetes de resíduo da mineração	39
3.2.1	Desenvolvimento do Produto	39
4	Resultados e Discussão	46
5	Conclusão	50
	Referências	51

1 INTRODUÇÃO

O assunto que será tratado neste estudo, insere-se no cenário da mineração, importante atividade socioeconômica para o estado de Minas Gerais principalmente pela geração de emprego e renda para o Brasil, pois é um setor expressivo da balança comercial brasileira uma vez que o minério de ferro produzido no país é majoritariamente exportado.

O contexto atual da atividade mineradora em Minas Gerais centraliza-se no fato do minério de ferro encontrado na região estar cada vez mais pobre, enquanto o mercado internacional exige um alto teor (65% de Fe_2O_3). Isto implica na necessidade de um maior beneficiamento do minério extraído. Devido a limitações tecnológicas dos processos de separação, são gerados grandes volumes de materiais atualmente sem aproveitamento econômico, isto é, resíduos do processo produtivo. Esse material gerado é, então, disposto principalmente em barragens de rejeitos e pilhas com baixa umidade, gerando ônus para o empreendimento e impactos socioambientais.

Pode-se resumir a situação em duas curvas: o minério encontrado está cada vez mais pobre (curva descendente), o que implica numa maior necessidade de beneficiamento e, por consequência, um volume de rejeito por tonelada de minério cada vez maior (curva de rejeito/ton crescente).

O processo de beneficiamento do minério formado pelas formações ferríferas bandadas (FFB), típico da região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais/Brasil, acarreta na geração de grande volume de dois tipos de rejeito: o rejeito arenoso e o rejeito argiloso (lama). Ambos são direcionados às barragens de contenção e armazenados por tempo indeterminado. Embora estudos a respeito do uso de ambos os rejeitos já estejam em desenvolvimento, há muito o que fazer tendo em vista o grande volume gerado (GUIMARAES et al., 2018).

Toda a intervenção feita pelo homem pode causar impactos ao meio ambiente assim como no meio social e econômico, sendo influenciada pelo porte, uso e funcionalidade da obra em questão, podendo variar de uma pequena à grande significância de impacto (SPADOTTO et al., 2012).

Tendo em vista todo este contexto, incluindo ainda os rompimentos de barragens de rejeitos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019).

O rompimento de barragens de rejeitos de mineração pode causar impactos socioambientais e econômicos severos. No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeitos da mina Córrego do Feijão, associada à mineradora Vale S.A., se rompeu em Brumadinho, MG, Brasil. O rompimento causou dezenas de mortes, e os rejeitos se espalharam por diversas áreas ao longo do município. Foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento para estimar e caracterizar a área atingida pela lama, bem como identificar impactos gerados pelo rompimento, sob a ótica das mudanças de cobertura da terra. (PEREIRA; CRUZ; GUIMARÃES, 2019)

É de suma importância que soluções para o aproveitamento do rejeito sejam apresentadas e postas em prática para que haja a redução da quantidade de rejeito destinadas à disposição em pilhas e ou barragens. O desenvolvimento de tecnologias que permitam gerar resultados econômicos a partir do subproduto disposto em barragem sem finalidade útil é uma oportunidade que não deve ser deixada de lado.

A demanda por um desenvolvimento sustentável, nos mais diversos setores, abre portas para pesquisas e desenvolvimento de produtos que buscam agregar resíduos e rejeitos de mineração nos seus processos produtivos. Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos buscando a utilização dos rejeitos de mineração em outros setores, como por exemplo construção civil.

A partir de estudos e metodologias adequadas, o aproveitamento de rejeitos da mineração contribui de maneira significativa na redução de impactos ambientais gerados por esta atividade, em alguns casos podem tornar-se subprodutos para alguns segmentos industriais, como o da construção civil, promovendo a geração de novos empregos e renda, reduzindo custos e melhoria da imagem das mineradoras junto aos órgãos governamentais e à sociedade, contribuindo, desta forma, para o desenvolvimento sustentável.. (SILVEIRA, 2015)

E em outras indústrias como no setor metalúrgico. Como [Neves et al. \(2011\)](#) afirma: “As zeólitas produzidas em laboratório a partir de resíduos de mineração e metalurgia possuem um grande potencial para utilização em recuperação de áreas degradadas e absorção de metais pesados nas regiões de produção mineral.”

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar uma alternativa de utilização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro para a criação de briquete a serem utilizados na siderurgia, como forma de reduzir a quantidade de resíduos destinados às barragens ou pilhas de rejeitos.

1.1.2 Objetivo Específico

Estudar a viabilidade do uso de rejeito arenoso proveniente do beneficiamento de minério de ferro de uma mineradora do Quadrilátero Ferrífero como insumo na fabricação de um briquete de ferrosilício, e com isso demonstrar a viabilidade técnica, econômica e ambiental com a utilização de rejeito de minério de ferro para o desenvolvimento de briquete.

1.2 Organização

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: No [Capítulo 2](#) é apresentado Revisão Bibliográfica. O [Capítulo 3](#) contempla a Metodologia. No [Capítulo 4](#) são apresentados os resultados. E finalmente, o [Capítulo 5](#) traz as conclusões e sugestões para melhoria dos resultados obtidos com o trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Minério de Ferro - Informações Gerais

O minério de ferro é um agregado mineral a partir do qual extrai-se o ferro (Fe), que é a matéria prima essencial na siderurgia para a produção de aço. O ferro é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, constituindo aproximadamente 4,2% da litosfera. Os principais minerais que contém o ferro são: hematita, magnetita, goethita e siderita, e os maiores depósitos desse recurso mineral no Brasil são constituídos por formações ferríferas bandadas denominadas itabiritos, compostas de hematita e sílica (QUARESMA, 2001).

O ferro foi responsável por consideráveis mudanças na história da humanidade, sendo utilizado para substituir o bronze na confecção de utensílios, ferramentas e armas, período conhecido como Idade do Ferro. Nos dias de hoje, é praticamente impossível imaginar a vida humana sem o ferro. O elemento é a principal matéria prima do aço, que além de ser utilizado na produção de máquinas, ferramentas, veículos e como elemento estrutural na construção civil, ainda apresenta muitas outras finalidades.

A indústria da mineração do ferro tem grande importância econômica na economia mineral brasileira. Para 2007, o valor de sua produção atinge R\$ 19,2 bilhões (US\$ 9,8 bilhões) in situ, representando 50% do valor da produção mineral brasileira (excluindo petróleo e gás). A atividade contribui com US\$ 10,5 bilhões FOB para a pauta das exportações do País, sendo quase 85% das exportações dos bens minerais primários e cerca de 6,5% das exportações totais. Na arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), contribui com 57% da arrecadação total num valor próximo de R\$ 312,0 milhões (US\$ 161,0 milhões). A indústria de mineração do ferro absorve 13% do pessoal ocupado diretamente na indústria extrativa mineral, com um contingente de 13.000 pessoas, e detém 296 concessões de lavra das 6.017 existentes no País. (MME, 2009)

A comercialização do minério de ferro depende de suas características físicas, referentes ao tamanho das partículas (granulometria), e químicas, que corresponde aos teores de ferro e de suas impurezas.

De acordo com IBGE (2020), Minas Gerais foi o terceiro colocado no valor total no Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil em 2019, representando em média 8,69% do PIB, ficando atrás apenas de São Paulo e Rio de Janeiro. O estado de Minas Gerais possui 82 municípios, dentre eles Belo Horizonte, Ouro Preto, Mariana, Betim, Contagem e Nova Lima (FIEMG, 2018). Esses municípios devem-se à relevância econômica para o estado mineiro, por apresentarem grande atividade industrial ou com impacto na balança comercial através das exportações de minério de ferro, ouro e automóveis.

As oportunidades de negócios envolvendo o setor mineral brasileiro podem ajudar o processo de retomada do crescimento econômico nacional. Atento a essa oportunidade, o ministro de Minas e Energia, Fernando Coelho Filho, participou no último fim de semana da convenção promovida pela Prospectors & Developers Association of Canada (PDAC 2017), a maior do mundo do segmento e que conta com a presença de autoridades e investidores de 125 países. (...) Em suas exposições, o ministro fez questão de destacar a importância da exploração mineral para a economia brasileira. A expectativa é que as ações do governo possam aumentar de 4% para 6% a participação do segmento no Produto Interno Bruto (PIB). (MME, 2017)

Sob a perspectiva do perfil econômico de Minas Gerais, os setores que mais geram emprego são a Indústria e a Construção civil, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Relação dos setores e representatividade de empregos na região Sede

Setores Industriais 2016	Minas Gerais		Representatividade da Região Sede no Estado	
	Estabelecimentos	Empregos	Estabelecimentos	Empregos
Indústria Extrativa	1.750	58.166	21%	51%
Indústria de Transformação	38.034	705.973	25%	28%
Serviços Industriais Públicos	887	43.265	34%	61%
Construção	20.399	240.318	32%	50%
Total Indústria	61.070	1.047.722	27%	36%

Fonte: FIEMG (2018)

No que tange a estrutura industrial do estado, vale destacar que a participação da Extração de Minerais Metálicos em Minas Gerais e na economia brasileira é bastante significativa. Os produtos minerais não metálicos para construção civil produzidos no estado também possuem uma boa expressividade na produção brasileira Figura 1.

Figura 1 – Panorama da estrutura industrial de Minas Gerais



Fonte: Portal da Indústria (2019)

2.2 Beneficiamento do Minério de Ferro e a Geração de Rejeitos

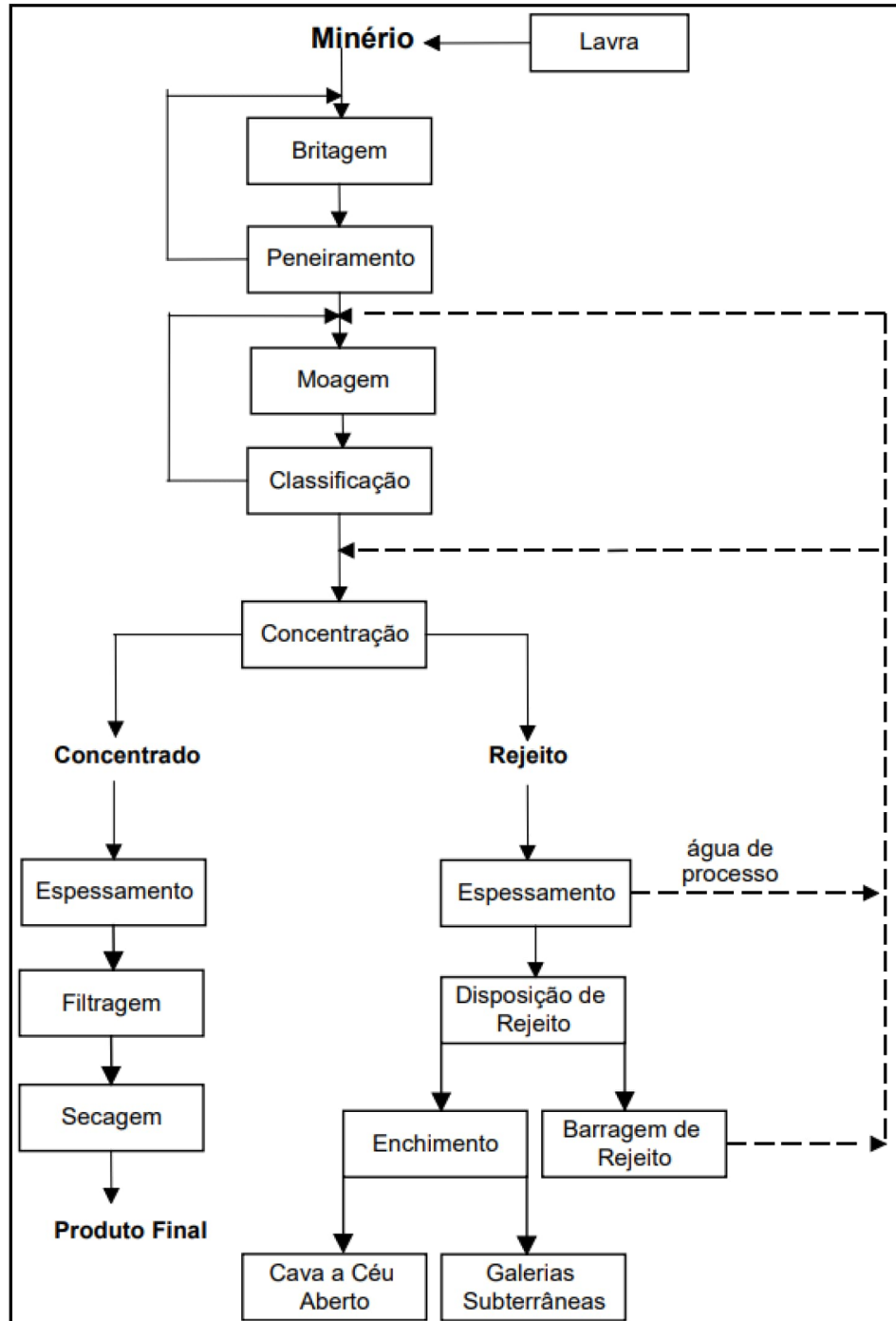
O beneficiamento mineral é o tratamento pelo qual o minério passa após ser lavrado na mina a fim de ser adequado às características necessárias para a sua comercialização. De acordo com a NRM 18 (BARBOSA, 2017), esse tratamento visa preparar granulometricamente e concentrar ou purificar os minérios por métodos físicos ou químicos sem alteração da constituição química dos minerais.

Luz, Sampaio e França (2010) relatam que em um processo de beneficiamento do minério de ferro existe basicamente as seguintes etapas:

1. Cominuição: nesta etapa, quebra-se o material para se obter o grau de liberação necessário nas próximas etapas do processo. A britagem, que consiste na quebra do material mais grosso, é a primeira etapa do processo. São utilizados britadores que promovem a fragmentação mecânica do material. Na moagem, são utilizados moinhos que são responsáveis pela redução do tamanho dos grãos até a ordem de milímetros ou até micrômetros.
2. Peneiramento e classificação em meio fluido: o minério passa pela operação de peneiramento com diversas peneiras de diferentes aberturas. Partículas maiores que a abertura da tela ficam retidas e as menores passam por ela. O material passante é submetido a classificação em meio fluido, que separa as partículas por tamanho de acordo com seu comportamento na água. Os principais equipamentos utilizados para essa operação são o ciclone e o classificador espiral.
3. Concentração: possibilita o aproveitamento do minério de baixo teor. O principal objetivo é separar o minério em duas frações: a concentrada e a descartável (rejeito). Os diferentes processos removem a maior parte dos elementos não-valiosos, aumentando assim o teor do minério. Algumas etapas principais da concentração são: o método gravítico, a separação magnética e a flotação.
4. Desaguamento obtido através da filtração e secagem: esta etapa consiste na separação sólido-líquido, e é na qual se obtém o concentrado final.
5. Disposição dos rejeitos gerados na usina: após a obtenção do concentrado, todo o material considerado fora das especificações de produção é depositado em barragens de rejeito. Segundo a FEAM, esses materiais que não apresentam interesse econômico são dispostos em pilhas de estéreis e barragens de rejeitos, sendo que os materiais estéreis podem ser depositados novamente na cava exaurida para a recuperação ambiental. Porém, resíduos de concentração, apresentam composição química e granulometria muito distintas do solo original, o que implica na necessidade de outras destinações para a redução de seu impacto sobre o meio ambiente (YELLISHETTY et al., 2008).

A Figura 2 apresenta um fluxograma típico do processo de beneficiamento do minério de ferro.

Figura 2 – Fluxograma típico do beneficiamento de minério de ferro



Fonte: Luz e Lins (2010)

2.3 Oportunidades de Negócios Utilizando Rejeito Arenoso em Outros Setores Industriais

Devido à presença de óxidos de ferro e silício em sua composição, esse rejeito pode ser utilizado como fonte alternativa de insumos para a produção de ligas de ferrosilício, extensivamente empregadas na aciaria, fundição e na produção de componentes elétricos. Nesse sentido, para ser utilizado como insumo na produção de ligas ferrosilício, o rejeito de mineração deve passar por um processo de aglomeração, que consiste na agregação de partículas.

Atualmente a produção das ligas de ferrosilício tem como insumos quartzo (óxido de silício) de terceira, quarta e quinta qualidade fragmentado em lascas com tamanhos entre 1 e 8 cm (LÜDKE, 2018). A utilização do rejeito de mineração como insumo pode vir a apresentar vantagem sobre o método atual, pois o teor de ferro presente nesse material pode incorporar este metal ao ferro gusa na produção de aço, reduzindo, portanto, os custos com a carga ferrosa utilizada no processo.

A indústria de ferroligas representa um faturamento de R\$ 8 bilhões por ano no Brasil. Somente as exportações correspondem a R\$ 4,5 bilhões por ano e economia nas importações da ordem de R\$ 2,2 bilhões por ano (ABRAFE, 2016). A produção brasileira de ligas ferrosilício, segundo dados da consultoria britânica CEIC (Global Economic Data, Indicators, Charts & Forecasts) e da Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico, produz cerca de 544.509 toneladas por ano (de acordo com dados de 2016). O estado de Minas Gerais é responsável por 63% da produção nacional e possui 69% da exportação desse material, que atende um mercado bastante globalizado, segundo dados do IBRAM (2016).

A adoção de sistema de gestão de resíduos de acordo com as resoluções do Conama e com as legislações municipais, incluindo a minimização da geração de resíduos e a segregação dos resíduos de diferentes classes, é uma das precondições da sustentabilidade (CEF, 2010).

Diversas são as vantagens da redução da geração de resíduos, por exemplo a diminuição do custo de produção, da quantidade de recursos naturais e energia a serem gastos, da contaminação do meio ambiente, etc. (CEF, 2010)

Os insumos produzidos a partir do rejeito de mineração têm, em sua composição, óxidos de ferro e de sílica combinados. Após passar por processo de aglomeração, briquetagem, fornecerá um material com características adequadas para a fabricação de ligas ferrosilício nos fornos elétricos a arco. A redução nos custos de aquisição da carga ferrosa tradicional, a presença suficiente de sílica e a sustentabilidade aliada à inovação proporcionados pelos insumos constituem importantes ferramentas para a sua ampla utilização pela indústria.

2.4 Processos de briquetagem no setor minero-metalúrgico

2.4.1 Processo de Aglomeração por briquetagem

Aglomeração é o termo geral empregado para designar algumas operações aplicadas a materiais de granulometria fina para transformá-los em corpos, ou fragmentos coesos, por meio da ligação rígida e consolidação de suas partículas, entre si, por meio de mecanismos físicos e/ou químicos, conferindo-lhes tamanho e forma adequados ao uso. (CARVALHO; BRINCK, 2018)

Nas áreas de mineração e metalúrgica, o termo aglomeração designa operações aplicadas aos minérios e/ou concentrados de granulação fina não adequados, para utilização em processos industriais. O conceito de fração fina na indústria de processamento mineral, depende do tipo de processo envolvido. Assim, no beneficiamento convencional de carvão, por exemplo, as partículas com tamanho inferior a 0,6 mm são consideradas finas. Entretanto, no beneficiamento de minério de ferro, a fração fina, não aproveitada pelo processo de flotação, pode encontrar-se em uma granulometria inferior a 20 µm. Dessa forma, não é simples generalizar o conceito de fração fina, sem considerar o processo de beneficiamento e o minério envolvidos.

Os três principais processos de aglomeração de finos usados na indústria minero-metalúrgica são a pelotização, a sinterização e a briquetagem, cujos produtos respectivos são a pelota, o sinter e o briquete. A pelotização de finos de minérios e/ou concentrados de ferro pelas mineradoras, a sinterização desses materiais nas usinas siderúrgicas integradas e a briquetagem de finos de carvão mineral são aplicações clássicas de aglomeração na indústria de base.

Para ocorrer a escolha de um desses processos, com a finalidade de aglomeração de um determinado material de granulometria fina, é necessário uma análise cuidadosa e exaustiva, considerando parâmetros que definem as características físicas e químicas do material, o volume anual de material a ser processado, o investimento e os custos operacionais.

O processo de aglomeração visa a transformação das características granulométricas de um material, permitindo o seu uso, como matéria-prima na produção de um determinado insumo. As aplicações mais frequentes são verificadas para o aproveitamento de: minérios ou concentrados de granulação fina, sem causar prejuízos à permeabilidade da carga e às condições de reação gás-sólido nos fornos metalúrgicos, especialmente nos fornos verticais; resíduos, ou subprodutos finos de outros processos mineiros e metalúrgicos, para sua reutilização, ou reciclagem, de forma adequada, interna e/ou externamente; resíduos metálicos (cobre, ferro, titânio, etc) e outros materiais (papel, algodão, madeira, e outros) para transporte e/ou reciclagem.

2.4.2 Briquetagem

A briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, permitindo a obtenção de um produto não só compactado, porém com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados.

A redução de volume do material, em alguns casos, além dos benefícios tecnológicos, permite que materiais finos possam ser transportados e armazenados de forma mais econômica. A adição de água na briquetagem só não é realizada quando a substância aglomerante se apresenta na forma de solução aquosa ou como um fluido.

A mistura, entre partículas finas e o aglutinante, é prensada a frio ou a quente, de modo a obter aglomerados, chamados de briquetes, que devem apresentar resistência adequada para empilhamento ou um tratamento posterior. A fim de apresentarem a resistência mecânica desejada, os briquetes são submetidos a um tratamento de endurecimento, realizado à temperatura ambiente, em estufas e secadores (400°C) ou em fornos (acima de 1.000°C). (CARVALHO; BRINCK, 2018)

Os briquetes, cujo o processo de endurecimento foi realizado à temperatura ambiente, apresentam baixa resistência mecânica quando submetidos à temperatura elevada. O seu uso fica restrito aos processos onde se utiliza baixa pressão. Nos briquetes endurecidos a temperaturas superiores à ambiente, as impurezas do minério e do próprio constituinte principal são responsáveis pela ligação entre as partículas. Essa ligação pode ser realizada por meio dos processos de: fusão incipiente do constituinte principal; difusão e recristalização do constituinte principal; escorificação ou reação química; endurecimento ou cristalização do constituinte principal. (CARVALHO; BRINCK, 2018)

No processo de aglomeração de partículas finas em prensas, as forças de atração molecular de Van der Waals apresentam uma forte influência na união das partículas. Entretanto, somente, tornam-se efetivas, quando a distância entre essas partículas é reduzida pela ação de uma elevada força externa. Na aplicação da pressão externa ao material a ser briquetado, podem ser utilizados três processos:

1. Briquetagem em prensas de rolos (Figura 3), onde o material flui continuamente, entre dois rolos paralelos, com cavidades ou moldes dispostos em sua superfície, de tamanho e forma adequados, rigidamente ligados entre si, girando com a mesma velocidade de rotação, todavia em sentidos contrários;

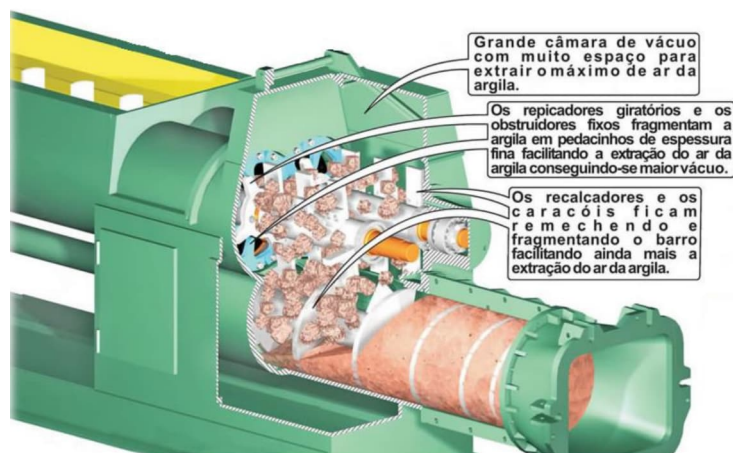
Figura 3 – Princípio da compressão em prensas de rolo



Fonte: [França e Massarani \(2018\)](#)

2. Briquetagem por extrusão contínua em máquinas do tipo maromba (Figura 4);

Figura 4 – Briquetagem por extrusão contínua



Fonte: [Silva \(2016\)](#)

3. Briquetagem em prensas hidráulicas (Figura 5), em que os moldes são preenchidos, de forma intermitente. Por ser o mais utilizado, o processo de briquetagem em máquina de rolos será detalhado a seguir. O processo pode ser dividido em quatro etapas: preparação; mistura; compressão e tratamento térmico.

Figura 5 – Briquetagem por prensas hidráulicas



Fonte: [Silva \(2016\)](#)

a) Etapas de Briquetagem:

i. Preparação para briquetagem

Consiste na determinação das características de compactação do material a ser briquetado e do tipo de equipamento que deve ser utilizado, para facilitar a adesão das partículas finas. A determinação das propriedades do material permite conhecer não só o valor máximo da pressão a ser aplicada, como também a taxa de compactação requerida pelo material.

O conhecimento do coeficiente de atrito do material permite gerar uma previsão do comportamento do mesmo, no momento da saída dos rolos e, também, se a superfície dos briquetes úmidos poderá ser ou não danificada durante a queda. A quantidade de aglutinante ou ligante necessária à produção de briquetes com boa resistência mecânica depende, entre outros fatores, da qualidade do material a ser briquetado e do próprio aglutinante.

No entanto, os principais fatores que determinam essa quantidade de aglutinante são a superfície específica do material e a quantidade de partículas finas ou grossas. Quanto o tamanho destas, menor será a quantidade de aglutinante necessária para gerar um briquete de boa qualidade.

Exemplo: Para carvões minerais, o teor de umidade normalmente utilizado é de $1,5 - 2\% \pm 0,5\%$, sendo que quanto maior for a umidade, menor será o poder calorífico do briquete. Na briquetagem de carvões não coqueificáveis ou semi-coque (materiais inertes), torna-se necessário o uso de carvões coqueificáveis na mistura. O carvão coqueificável, nesse processo, apresenta a função de aglutinante e necessita de um aquecimento a uma temperatura entre 100 e 350°C, antes de ser misturado. O carvão não coqueificável é aquecido em torno de

600°C, também, antes de sua mistura com o carvão coqueificável. A proporção de carvões na mistura deve ser ajustada, para que a temperatura da mistura se situe na zona de amolecimento do carvão coqueificável, normalmente entre 420-540°C. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

ii. Mistura

A mistura dos reagentes é uma das etapas mais importantes da briquetagem. É de fundamental importância que o aglutinante seja distribuído uniformemente por toda superfície do material a ser briquetado.

O misturador deverá ser dimensionado de modo que o tempo de residência da mistura no equipamento não seja elevado. Quando há necessidade de tratamento térmico da mistura, o mesmo pode ser realizado no próprio equipamento por meio da aplicação de vapores saturados ou superaquecidos.

Como exemplo, para briquetagem de carvão utilizando piche como aglutinante, a temperatura de descarga da mistura deve estar pelo menos 7°C acima do ponto de amolecimento do piche. A mistura deve apresentar uma temperatura entre 85-90°C na prensa e uma umidade de $3\% \pm 1\%$. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

Caso a mistura não seja suficientemente seca no condicionador entre o misturador e a prensa, os gases (na maioria das vezes, vapor d'água) presos nos briquetes sofrem uma forte compressão. Quando os briquetes deixarem a prensa e a pressão for relaxada, os gases expandem, causando fraturas no briquete.

No manuseio de materiais com pequena densidade aparente, torna-se necessária a remoção dos grandes volumes de ar antes da alimentação do material na unidade de compactação. Nesses casos torna-se recomendável a utilização de alimentadores por meio de vácuo, sendo esse o responsável pela remoção do ar presente no alimentador.

iii. Compactação

A compressão do material se dá no espaço existente entre os dois rolos que, montados um diante do outro, giram com velocidade de rotação igual e em sentidos contrários. A pressão exercida sobre o material cresce de forma progressiva ao longo do segmento do rolo, a partir do ponto em que se inicia a ação da força de compressão sobre o material, atingindo o seu valor máximo no ponto de menor distância entre os rolos, caindo de forma abrupta até a liberação e saída do aglomerado. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

A forma das cavidades do equipamento e, conseqüentemente, do briquete, é função da susceptibilidade do material à compactação. Para materiais que apresentam dificuldade de compactação são utilizadas formas arqueadas, eliminando o plano de divisão dos briquetes, ocorrendo então uma distribuição mais uni-

forme da pressão.

Essa distribuição mais uniforme, permite a utilização de pressões mais elevadas. Entretanto, tal procedimento pode provocar a redução da vida útil dos elementos de compactação da prensa. Quando se deseja um produto aglomerado com um tamanho menor que 8 mm, realiza-se normalmente uma primeira compactação do material, seguida da fragmentação e posterior classificação granulométrica, recuperando a fração que apresente o tamanho desejado.

A compactação inicial pode ser realizada por meio da briquetagem convencional ou na compressão de partículas na forma de barras ou de folhas, podendo essas serem do tipo lisas ou onduladas.

Alguns produtos, como por exemplo os fertilizantes, são compactados e granulados, evitando a formação de aglomerados quando acondicionados em recipientes apropriados. Os materiais particulados podem também ser aglomerados na forma de tiras ou barras contínuas, em equipamentos do tipo rolo. No caso dos produtos obtidos em equipamentos do tipo tiras são removidas horizontalmente podendo alimentar diretamente os fornos, utilizados em etapas posteriores do processamento.

Alguns exemplos de produtos que podem ser processados mediante esta técnica são: cimento portland, ferro esponja, coque, metais e ligas, minérios sinterizados, partículas finas provenientes da fabricação do aço e de outros processos metalúrgicos e muitos outros produtos podem ser processados dessa forma, observando-se um ganho na eficiência térmica do processo, devido à redução das perdas com partículas finas. Outro aspecto importante desta técnica é a redução do impacto ambiental, devido à eliminação da emissão de material particulado para o meio ambiente.

- Formas de moldagem: Se os rolos possuírem superfícies lisas, o material adquire uma forma tabular, ou de uma barra e é denominado tablete, fita, barra etc. Quando as superfícies dos rolos possuem cavidades, ou moldes, de mesma forma e tamanho, a rotação dos rolos faz com que essas cavidades se situem em uma posição simétrica; o material aglomerado é denominado briquete e tem a forma e o tamanho dos moldes, como ilustrado na Figura 6.

No processo de compactação apresentado na figura, a vazão de tabletes gerados, m , pode ser obtida pela seguinte relação:

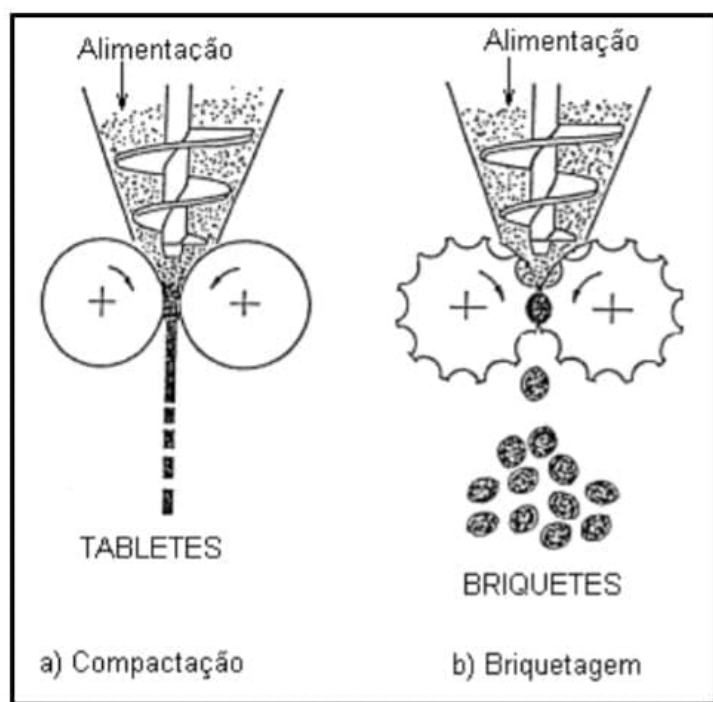
$$m = B * S * V_p * d_a \quad (2.1)$$

Onde:

B - Largura do rolo; S - Espessura do tablet; V_p - Velocidade periférica do rolo;
 d_a

- densidade do aglomerado.

Figura 6 – Formas diferentes de aglomeração de partículas finas, com aplicação de pressão.



Fonte: [Carvalho, Brinck e Campos \(2018\)](#)

Já no processo de briquetagem (Figura 6b), a vazão de briquetes, M , é calculada em função do volume de um briquete (V_b), do número de moldes em uma coluna (Z) na circunferência do rolo(8), do número de colunas ao longo da largura do rolo (R), da velocidade dos rolos (N , em rpm) e da densidade do briquete (d_b).

$$m = V * Z * R * N * d_b \quad (\text{CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018}) \quad (2.2)$$

iv. Tratamento Térmico

Para evitar a fratura devida à choques térmicos e também permitir o manuseio dos briquetes ou tabletes, logo após a sua formação, os mesmos devem ser imediatamente aquecidos após a sua formação e em seguida resfriados lentamente, segundo uma velocidade controlada. Como por exemplo na aglomeração de finos de carvões coqueificáveis, os briquetes produzidos devem ser aquecidos até 600°C, a fim de recuperar todo o alcatrão ainda presente no processo. Após esse tratamento térmico, a quantidade de materiais voláteis é reduzida de tal forma, que permite a utilização dos briquetes como material redutor em altos fornos. A utilização de briquetes na câmara de coqueificação, além da maior otimização da densidade da carga, permite a obtenção de um coque de melhor qualidade. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

v. Briquetagem a quente

A briquetagem a quente é utilizada quando o material a ser aglomerado apresenta uma resistência mecânica elevada. Para que possam ser utilizadas pressões menores na compactação das partículas finas desses materiais, é necessário que seja alcançado o regime plástico do material, que é quando é ultrapassado a tensão “elástica” na estrutura cristalina do material.

O aquecimento das partículas a uma temperatura da ordem de 1.000°C (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018) torna possível a briquetagem de minério de ferro e dos pós gerados nos altos fornos. O limite superior da temperatura na briquetagem a quente é definido pela temperatura capaz de fundir as partículas em conjunto.

A briquetagem a quente, também, é fortemente influenciada pelo tratamento térmico utilizado logo após a compactação. Alguns materiais necessitam de um resfriamento lento, em tambores, com materiais resfriados, de modo a recuperar parte de seu calor sensível. Esse processo é utilizado para permitir a recristalização do briquete, aliviando as tensões internas geradas durante a deformação plástica.

Como por exemplo o uso do processo de briquetagem a quente permite a produção de fibras de carbono ativado, com densidade aparente elevada, não havendo a necessidade do uso de qualquer tipo de aglutinante. O método consiste na briquetagem, a quente, de fibras estabilizadas, utilizando pressão mecânica de até 204 kg/cm² e aquecimento entre 100 e 250°C para a fibra piche (piche isotrópico de petróleo) e 200-600°C para a fibra estabilizada. Por meio desse, é possível controlar facilmente a densidade aparente da fibra de carbono em uma faixa que vai de 0,2 a 0,86 g/cm³. A função da briquetagem a quente, nesse método, é iniciar a carbonização da fibra, aumentando a sua dureza o suficiente para que não haja mudança em sua forma. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS,

2018)

Quando a pressão mecânica é aliviada, a fibra formada apresenta densidade e dureza mais elevadas. A reciclagem de metais, principalmente dos resíduos produzidos em tornos ou em máquinas de furar, torna-se mais econômica através da utilização da briquetagem a quente. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

Os resíduos metálicos são aquecidos a 725°C, antes de serem encaminhados para um equipamento do tipo rolo, onde são comprimidos a uma pressão de aproximadamente 3.000 kg/cm². Após a compactação, os briquetes são imediatamente resfriados em água. Grande parte do combustível necessário para aquecer os resíduos metálicos é obtido no óleo presente nos próprios resíduos. Uma das principais vantagens da briquetagem dos resíduos metálicos é a ausência de óleo no briquete de metal, evitando dessa forma a formação de fumaça durante a queima nos fornos. (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018)

2.4.3 Aglomerantes

Os aglomerantes são elementos que tem a função de unir os grãos das matérias primas por meios físicos e químicos, visando conferir boas propriedades mecânicas, e são usados nos teores de 5 à 12% sobre a carga principal (minério ou carvão/coque) a ser briquetado (PIETSCH, 2002). Para escolha do melhor material para aglomeração foi realizado um levantamento bibliográfico, dos principais aglomerantes de origem natural (melaço, amido e alcatrão), sintéticos (poliacrilaminas, carboximetilcelulose e hidroximetilcelulose) e de origem inorgânica ($NaOH$ e $Mg(OH)_2$) para que as análises de briquetagem fosse satisfatórias tanto no âmbito financeiro quanto no ambiental.

2.4.4 Avaliação da qualidade dos briquetes

- Para avaliação das propriedades físicas, já existem alguns ensaios padronizados e os mais utilizados são: a resistência à compressão, ao impacto, à abrasão e à penetração de água. Em alguns casos, é feita a avaliação da temperatura de choque. As propriedades que, determinam a qualidade de um briquete são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais, do processo e dos equipamentos responsáveis pela qualidade de um briquete

Propriedades geométricas das partículas	Tamanho de partícula Distribuição granulométrica Forma da Partícula	Estrutura Densidade
Propriedades mecânicas das partículas	Ângulo de repouso Ângulo de atrito interno	Tensão cisalhante Tensão axial
Propriedades químicas das partículas	Contaminação superficial Natureza da fase gasosa Fenômeno de superfície Coesão entre as partículas e adesão à superfície externa	Fenômenos eletrostático Energia superficial
Propriedades estruturais dos sólidos	Deslocamentos Estrutura cristalina	Geometria molecular Densidade
Propriedades mecânicas dos sólidos	Tensão cisalhante Tensão axial Resistência à compressão	Limite de escoamento Módulo de elasticidade Dureza
Propriedades químicas dos sólidos	Atrito Composição Impurezas	Tipo de ligação química Método de preparação
Condições de Processo	Pressão	
	Taxa de deformação	Teor de umidade
	Velocidade dos rolos	Aglutinantes
	Temperatura	Lubrificantes
Características do Equipamento	Rolos	Diâmetro Tamanho e forma das cavidades dos briquetes Composição dos rolos
	Alimentador	Efeitos da pressão Pré-compressão dos materiais no alimentador
	Sistema Hidráulico	Rigidez dos rolos
	Mancais	Orientação dos rolos Localização
	Estrutura	Rigidez dos rolos

Fonte: [Carvalho, Brinck e Campos \(2018\)](#)

2.5 Inovação pelo mundo

É evidente que os principais países produtores de minério de ferro do mundo - China, Austrália e Brasil – encontram-se em busca de soluções alternativas que garantam maior segurança e preservação do meio ambiente. Algumas destas inovações estão transformando a forma como estes países utilizam seus recursos minerais e energéticos para tornar os modelos econômicos mais sustentáveis.

Moçambique satisfaz 80% das necessidades energéticas na base de energia da biomassa cujas fontes são as florestas. O presente trabalho tem como objectivo estudar o mecanismo de obtenção de carvão vegetal a partir de cascas de coco. O aproveitamento de cascas de coco para a produção de energia, agrega valor ao resíduo e trás benefícios para a sociedade e para o meio ambiente. Este estudo consiste numa pesquisa quantitativa com componente qualitativa e o método foi exploratório, onde através de um inquérito foram entrevistados 20 produtores de carvão vegetal sobre as técnicas de produção e as espécies mais usados na região de Xicossana que se situa na localidade de Matsandzene no distrito de Magude. Colectou-se 3 espécies de carvão de alta densidade como amostra, para servirem de base de comparação com os briquetes produzidos. Os parâmetros determinados neste trabalho são: densidade, teor humidade, poder calórico superior, teor de cinzas e densidade energética. A densidade energética relativa dos briquetes foi de 61%, o que significa que só têm 39% de diferença em relação a melhor espécie usada na produção de carvão vegetal. O poder calórico superior é o parâmetro que caracteriza um bom combustível, os briquetes mostraram ser competitivo com relação a carvão convencional de alta densidade, o que significa que podem ser usados como combustível lenhoso para fins de confeccionar alimentos. (ZAMBA; VEREMACHI, 2021)

A Austrália, por exemplo, está utilizando uma tecnologia para fabricação de tijolos, de maneira econômica e ecologicamente correta, utilizando os rejeitos produzidos nas minas de minério de ferro da Austrália Ocidental (WA). De acordo com Kuranchie, Shukla e Habibi (2016), a fabricação é baseada no processo de geopolimerização, que é conhecido por economizar energia, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa. A redução é realizada evitando-se os processos de fabricação de fornos de alta temperatura, tradicionalmente utilizados na fabricação de tijolos de solos arenosos com alto teor de argila. A tecnologia do geopolímero, para este caso, é a adição do silicato de sódio em forma de pó aos rejeitos da mineração, como ativador para a formulação dos tijolos geopoliméricos em substituição à argila.

A China tem se destacado na economia circular, ao apoiar diversos setores industriais no desenvolvimento de inovações tecnológicas para o aproveitamento de rejeitos e resíduos, dentre eles, os da mineração chinesa. O seu resultado tem servido de benchmarking para os outros países. De acordo com Kuranchie, Shukla e Habibi (2016), a China definiu uma política que exige que todos os tijolos sejam produzidos usando resíduos sólidos, em vez de solos normais. Como o mundo está se tornando ambientalmente consciente, uma variedade de outros materiais residuais foi usada em outros lugares para a produção de tijolos.

A reticulação geopolimérica (LTGS) é uma inovação na utilização dos materiais terrosos. Em cada país, alterando apenas certos parâmetros, com a mesma técnica é possível fabricar

todos os materiais utilizados na construção: Pisé: terra pisada resistente à água; Tijolos; Vigas; Fundações; Revestimentos; Revestimento de parede; Cobertura de piso, pavimento; Telhado; Adobe, resistente à água.

O Brasil possui grande potencial para o reaproveitamento do rejeito para a Construção Civil, com enorme capacidade de desenvolver eficientes tecnologias, com o reaproveitamento da lama vermelha para diversos tipos de materiais. Tendo em vista todo esse material estudado, entende-se que o caminho de utilização do rejeito no desenvolvimento de produtos para diversos setores industriais é altamente recomendável.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em 3 etapas, sendo a primeira o estudo da viabilidade do tema; em seguida, o desenvolvimento do produto e posteriormente realizaram-se as análises econômicas dos briquetes.

- Etapa 1 Estudo de viabilidade;
- Etapa 2 Desenvolvimento do Produto
- Etapa 3 Realização das Análises

3.1 Estudo de Viabilidade e Prospecção de Mercado

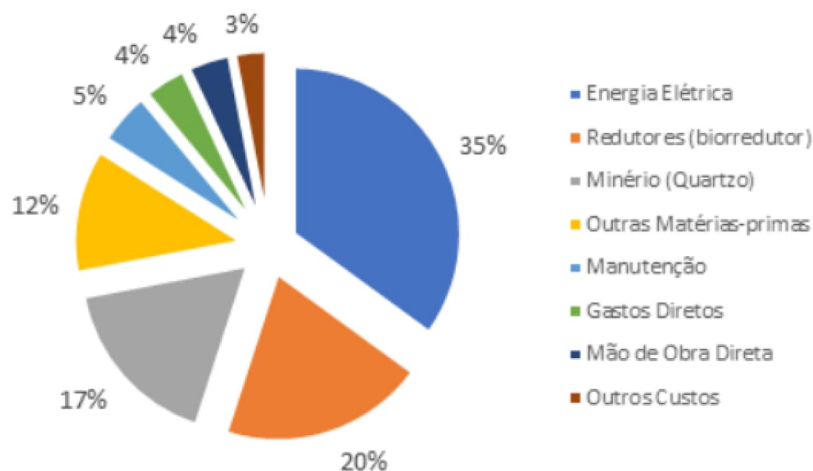
Este estudo é uma oportunidade para incrementar a competitividade da indústria siderúrgica e fomentar o desenvolvimento sustentável da cadeia do aço.

Tomando como base o tripé da sustentabilidade composto pela congruência entre os aspectos econômicos, ambientais e sociais, a relevância deste estudo justifica-se pela abrangência do seu escopo que inclui aumento da competitividade industrial, redução de passivo ambiental, geração de empregos e diversificação da economia local.

A proposta de inovação se trata do desenvolvimento de novo material para ser utilizado enquanto matéria-prima para produção de Ferro-silício 75% ($FeSi75$).

O mercado de $FeSi75$ é grande e está em expansão, porém enfrenta o problema do alto consumo energético. O dispêndio financeiro com energia elétrica representa 35% dos custos totais de produção desta ferro-liga (Figura 7). Esse custo foi o principal fator responsável pela retração de cerca de 29% da produção brasileira nos últimos anos, mesmo com o setor tendo crescido 4,5% no mesmo período. (MARIN, 2019)

Figura 7 – Composição dos custos de uma indústria de ferroligas.



Fonte: A autora

A principal razão do alto consumo energético é explicada pelas propriedades do material produzido, uma vez que o processo de obtenção do $FeSi75$ necessita de altas temperaturas dos fornos ($1600^{\circ}C$) para atingir o ponto de fusão do material, o que demanda um grande montante de energia elétrica. (MARIN, 2019)

Além disso, as matérias-primas utilizadas atualmente na produção de $FeSi75$ contribuem para baixa eficiência dos fornos, uma vez que não possuem conformidade no tamanho e formato, além de apresentar expressivo percentual de finos - um grande vilão dos processos metalúrgicos.

Um dos desafios tecnológicos relevantes para aumentar a competitividade do setor de ferro-ligas é o desenvolvimento de um material com uniformidade de tamanho, formato e aglomeração para a produção de $FeSi75$.

Atualmente, os principais insumos de produção são o quartzo (do qual se obtém a sílica) e sucata de ferro. As empresas produtoras de $FeSi75$ recebem estes insumos separadamente e sem uniformidade, trituram os mesmos até atingirem uma granulometria compatível com o processo de fundição e encaminham para o forno. Dado este limitante para o crescimento da produção nacional de ferro-ligas, surgiu a idéia de uma nova matéria-prima para produção do $FeSi75$. A partir do reaproveitamento do rejeito arenoso (classificação 2B - inerte e não perigoso) do processo de beneficiamento do minério de ferro gerado nos processos de uma grande mineradora da região de Ouro Preto e Mariana, iniciou-se o processo de desenvolvimento de um briquete composto pela aglomeração de ferro e sílica.

O rejeito arenoso, utilizado para fabricação do briquete, passa por um processo de adequação granulométrica e dessa forma é atingido a proporção ideal para produção do $FeSi75$. Este corte granulométrico e aglomeração do material proporciona a substituição total das duas principais matérias-primas que são utilizadas atualmente.

O produto final é gerado na faixa de excelência para a operação dos fornos, uma vez que é padronizado, pelo tamanho e forma, facilita a operação de queima, reduzindo o tempo de ciclo da fundição e, conseqüentemente, contribui diretamente para eficiência energética, implicando numa economia de gastos com energia elétrica e manutenção dos fornos na fábrica.

O briquete, produzido a partir do rejeito de minério de ferro, tem como objetivo abastecer um segmento de mercado composto pela indústria produtora de ligas ferrosilício. As companhias responsáveis por essa produção têm impacto significativo nas indústrias siderúrgicas e de fundição brasileiras.

Antes de abordar o mercado propriamente dito das ligas de ferrosilício, é necessário compreender o contexto dos mercados que absorvem sua produção (aço e fundidos), uma vez que são esses os responsáveis pelo potencial crescimento da indústria de ferrosilício.

De acordo com o Instituto Aço Brasil a produção de aço em julho de 2018 alcançou 3 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de 6,7% em relação ao comparativo anual. Houve também um crescimento de 13% nas vendas no mercado interno se comparadas com os números obtidos em 2017. Já o relatório Focus do dia 24/09/2018 afirma que a projeção para a produção industrial de 2018 foi de aumento de 2,67% para 2,78%.

Além disso, de acordo com validações junto a indústria produtora de ligas ferrosilício, outro importante mercado que absorve parte dessa produção é o de fundição. As ligas são usadas como matéria prima para a fabricação de moldes metálicos com formatos e medidas correspondentes aos das peças requeridas. O principal uso de ligas ferrosilício (principalmente FeSi75) é como energético. Conforme a Associação Brasileira de Fundição ([ABIFA, 2016](#))

Em setembro de 2018 foram produzidas 188.802 toneladas de fundidos. No acumulado do ano, até setembro foram produzidas 1.404.839 toneladas de ferro fundido, significando um aumento de 4,7% em relação ao mesmo período do ano anterior.

As exportações desses materiais nos três primeiros trimestres de 2018 totalizaram US\$ 655.061,7 e levando em consideração as projeções da própria ABIFA o crescimento da produção de fundidos para 2018 será 6,1% maior do que o ano de 2017.

Considerando todas essas informações, estima-se um potencial de crescimento da produção de ferroligas, investindo em insumos para as ligas de ferrosilício.

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico (ABRAFE) o setor de ferroligas é o 6º segmento mais superavitário dos últimos quatro anos, correspondendo a 7% da balança comercial. O setor é responsável pela geração de 80 mil empregos no país, arrecadando 1,4 bilhão por ano, segundo reportagem da revista Mineração & Sustentabilidade. ([SIF, 2020](#))

O SIDIEXTRA (2017) relata que a produção de ferrosilício no Brasil é de 544.509,029 toneladas por ano, sendo o estado de Minas Gerais o responsável por 63% da produção nacional

e por 69% da exportação.

Já o mundo produziu 1869 milhões de toneladas de aço no ano passado contra 1814 milhões de toneladas de 2018, o que representa um aumento de 2,9%. Em 2019, a China continuou sendo a maior produtora de aço do mundo com 996,3 milhões de toneladas. (ABM, 2020)

3.1.1 Análise econômica

Para análise econômica buscou-se inicialmente fazer um levantamento junto às empresas produtoras de ferroligas, às suas produções anuais de ferroligas juntamente com suas demandas de insumos (Figura 8). Para estimar a composição dos principais custos da produção de ferrossilício (Figura 9).

Figura 8 – Estimativa anual de Produção de FeSi e demanda de MP(ton)

Estimativa de Produção de Ferro Silício e a Demanda de MP(ton)		
Empresas	Produção FeSi a.a.	Demanda MP (ton)
Ligas Gerais Ind. e Comércio	11.000	38.885
Inonibrás S/A	11.000	38.885
Rima Industrial	17.000	60.095
Liasa - Ligas de Alumínio AS	17.000	60.095
Bozel Brasil S.A.	27.000	95.445
Italmagnésio	27.000	95.445
Minasligas	60.000	212.100
Nova Era Silicon	52.000	183.820
Fusão Ligas e Reciclados		0
Multiligas		0
	222.000	784.770

Fonte: A autora

Figura 9 – Estimativa de custos de Produção de FeSi (1 ton).

Composição dos custos de produção FeSi75			
Insumos	%	Σ%	R\$/t
Energia Elétrica	35%	35%	R\$ 1.248,00
Biorredutor	20%	55%	R\$ 713,14
Quartzo	17%	72%	R\$ 606,17
Manutenção	5%	77%	R\$ 178,29
Gastos Diretos	4%	81%	R\$ 142,63
Mão de Obra Direta	4%	85%	R\$ 142,63
Outros Custos	3%	88%	R\$ 106,97
Outras MPs	12%	100%	R\$ 427,89
Eletródos			R\$ 85,58
Carepa			R\$ 299,52
Fluorita			R\$ 21,39
Calcário			R\$ 21,39
		TOTAL	R\$ 3.565,71

Fonte: A autora

Com os dados gerados, realizou-se uma avaliação do uso de briquetes (BAR) (utilizando 200kg de briquetes para cada 1 tonelada de liga) em substituição aos insumos tradicionais do setor de ferroligas. Tendo como resultados a Figura 10 que estima uma economia líquida anual de R\$ 1.554.072,00 para as empresas de ferroligas de Minas Gerais.

Figura 10 – Análise de Impacto Anual nas Empresas de Ferroligas em Minas Gerais

Análise do Impacto Anual			
Empresas produtoras de Ferro Ligas em Minas Gerais	6,3% Carga - 200kg de BAR por 1ton de liga		
	Economia insumos	R\$ BAR	Economia líquida
Ligas Gerais Ind. e Comércio	R\$3.264.910	R\$710.429	R\$2.554.481
Inonibrás S/A	R\$3.264.910	R\$710.429	R\$2.554.481
Rima Industrial	R\$5.045.770	R\$1.097.936	R\$3.947.834
Liasa - Ligas de Alumínio AS	R\$5.045.770	R\$1.097.936	R\$3.947.834
Bozel Brasil S.A.	R\$8.013.870	R\$1.743.780	R\$6.270.090
Italmagnésio	R\$8.013.870	R\$1.743.780	R\$6.270.090
Minasligas	R\$17.808.600	R\$3.875.067	R\$13.933.533
Nova Era Silicon	R\$15.434.120	R\$3.358.391	R\$12.075.729
TOTAL MG	R\$65.891.820	R\$14.337.748	R\$51.554.072

Fonte: A autora

3.1.1.1 Análise de concorrentes

Os principais concorrentes no mercado de briquetes de ferrosilício são as mineradoras de Quartzo e Quartzito, que são fornecedores diretos para a indústria de ferrosilício. Para fazer a escolha entre os dois insumos (quartzo e quartzito) é preciso fazer o balanço entre a melhor reatividade do quartzito e sua menor friabilidade e a maior resistência elétrica do quartzo.

O Brasil é detentor de 95% das reservas mundiais de quartzo, o equivalente a 78 milhões de toneladas. No estado do Pará estão as maiores reservas medidas do país, cerca de 64% das jazidas, seguidas de 17% em Minas Gerais, 15% em Santa Catarina e 2% na Bahia e Goiás. Estes dados referem-se a quartzo de todas as qualidades, ou seja, para fabricação de Fe-Si, vidros, silício metalúrgico, cerâmicas tradicionais etc. (LÜDKE, 2018)

O Brasil também é detentor das principais jazidas mundiais de quartzo piezelétrico, ocorrendo em menor escala em outros países, tais como Madagascar, EUA (Arkansas), Angola e África do Sul. Uma parte considerável dessas reservas descritas no Brasil é de origem hidrotermal, ou seja, o quartzo apresenta níveis baixos de impurezas químicas em comparação aos de origem pegmatítica. Portanto, essas extensas reservas presentes no país faz com que o Brasil seja provavelmente o lugar onde existam as maiores e melhores reservas mundiais. Esta situação na diferença nos níveis de impurezas mostra a relação das impurezas com as condições de formação do quartzo. Essa relação pode ajudar a avaliar o potencial da matéria-prima de cada fonte para aplicações industriais. (LÜDKE, 2018)

Em termos de reservas de quartzo, o Brasil é um país privilegiado, pois possui as melhores e maiores reservas mundiais de quartzo de alta qualidade. Suas reservas são grande parte de origem hidrotermal, o que lhes confere níveis de impurezas metálicas totais em concentrações

muito menores a 100 ppm, ou seja, elas são relativamente puras, se comparado com outras fontes de quartzo, como areias quartzosas. Tal fato proporciona maior lucro e produtividade, pois existem ganhos nas operações de exploração e beneficiamento, gerando assim menos custo no processamento, pois é possível desprezar etapas de processamento adicionais frequentemente utilizadas em outras fontes, como por exemplo, flotação e separação magnética. Isso torna competitivo a produção brasileira de silício de grau metalúrgico, provocando uma vantagem adicional na participação em produzir e exportar para o mercado internacional. (LÜDKE, 2018)

A produção de quartzo está relacionada à sua utilização: quartzo para indústrias de alta tecnologia (cristais piezoelétricos e lascas de alta pureza), quartzo industrial comum (leitoso), e quartzo ornamental (variedades coloridas). Sendo que, no Brasil, grande parte do quartzo produzido (quartzo leitoso) é utilizado na produção de ligas de silício: cálcio-silício, ferrosilício-magnésio, ferro silício e silício grau metalúrgico. A produção brasileira de quartzo bruto teve período de aumento de produção na década de 70 e declínio nos anos 90. Sendo que desde o ano de 2004, a produção apresenta-se em crescimento. Os principais produtores mundiais são o Brasil, Suíça, Japão e África do Sul (MME, 2009). Na base da cadeia produtiva do cristal de rocha predomina o pequeno minerador e o minerador informal, tanto na produção de cristais quanto de lascas. Isso não é verificado na produção do quartzo leitoso, pois a mesma é realizada por empresa mineradora de forma mais mecanizada e organizada. (LÜDKE, 2018)

Foi realizada a análise SWOT dos fornecedores de quartzo, de forma a avaliar esse forte concorrente direto dos briquetes de ferrosilício por serem fornecedores diretos de insumos para a produção de ferrosilícios no mercado (Figura 3).

Tabela 3 – Matriz SWOT dos fornecedores de quartzo.

Forças	Oportunidades
Preço	Crescimento da demanda de quartzo
Baixo custo operacional	Recuperação de resíduos gerados
Potencial geológico (grandes reservas)	
Qualidade do quartzo	
Fraquezas	Ameaças
Alterações significativas no preço devido a logística	Entrada de novos projetos sustentáveis
Doenças ocupacionais (silicose)	Elevação das exigências e aumento dos prazos para conseguir licenças
Formato, granulometria e composição irregulares	Aumento dos preços para obtenção de licenças
	Materiais que fornecem tanto a carga silicosa, quanto a ferrosa

Fonte: A autora

Forças - O mercado das Mineradoras de Quartzo é diversificado, eles conseguem atender às diferentes empresas que utilizam seu produto final para produção de FeSi75, além de atender a outros setores como o da construção civil e o de ornamentação, para a produção de tintas, louças sanitárias, vidros convencionais e sílica vítrea para a produção de prismas, filtros, lentes e fibras ópticas (SILVA et al., 2008)

Devido às grandes reservas de quartzo no Brasil e ao baixo custo operacional, o preço do produto como insumo das empresas de FeSi é baixo, além de o Quartzo atender aos parâmetros de resistência dos fornos.

Fraquezas - O processo de licenciamento e a manutenção das licenças já obtidas, pelas empresas mineradoras, vêm sendo, cada vez mais rigoroso, por parte dos órgãos fiscalizadores e, com isso o prazo para se conseguir o licenciamento, tem se estendido. Além disso, o custo de frete para entrega a longas distâncias, aliado às dificuldades operacionais de lavra e beneficiamento do quartzo, nos períodos chuvosos, tem dificultado o atendimento da demanda para as empresas de fundição.

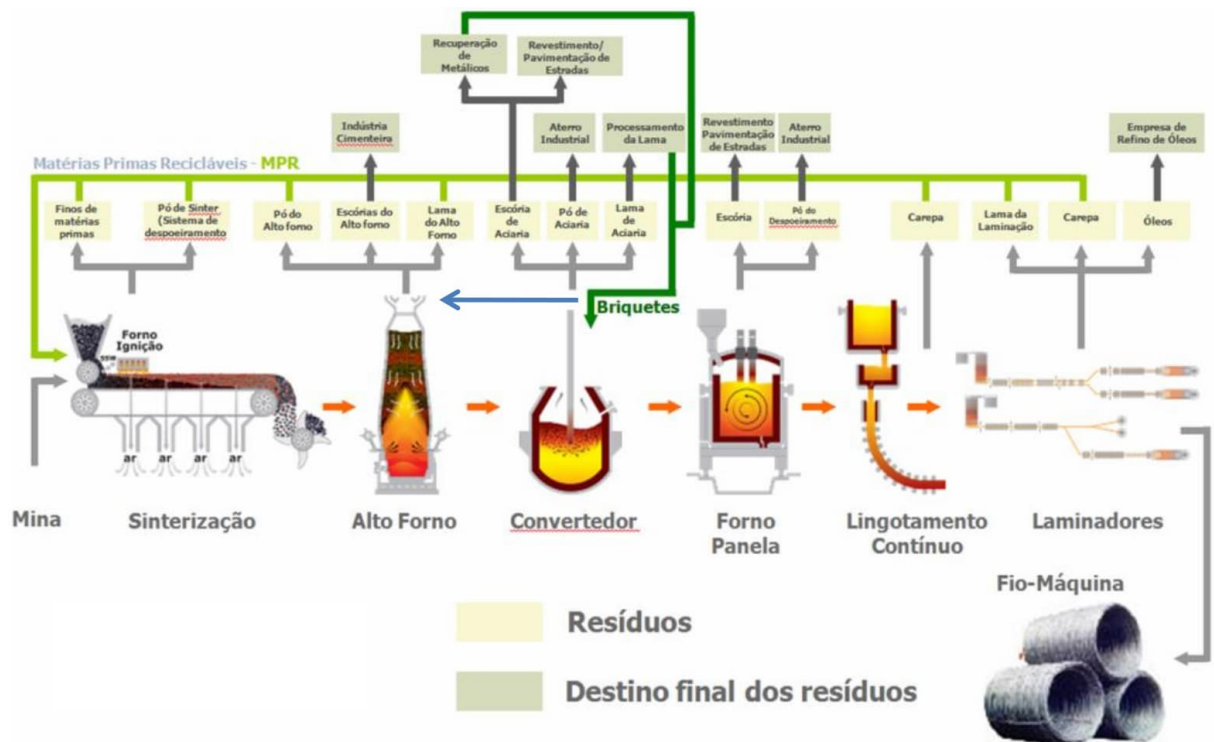
Oportunidades - Como há uma tendência de crescimento no mercado de ligas ferrosilício tende a crescer também a demanda por quartzo. A legislação mais rigorosa tem levado as mineradoras de modo geral a uma maior procura por políticas sustentáveis em suas práticas, implementando a recuperação de rejeitos e recuperação de áreas degradadas.

Ameaças - Novos produtos, que substituam parte do quartzo utilizado em fornos e que apresentem características sustentáveis ameaçam as Mineradoras de Quartzo juntamente com o aumento de taxas e licenças requeridas por órgãos legisladores para obtenção de direito de lavras (COPAM, SEMAD, 2017) podendo atrasar entregas e constância nas atividades.

Além do quartzo, a carepa, produzida como resíduo do tratamento térmico de aço fundido, pode atuar como concorrente dos briquetes ferrosilicosos. Ela pode ser fonte de ferro para a produção de ligas ferrosilício (SWIRKOWSKY et al., 2018) uma vez que tem altos teores de Óxidos de Ferro e, por ser um rejeito, tem um preço menor no mercado.

As principais empresas produtoras desse resíduo são as metalúrgicas e siderúrgicas que o geram ao fazerem tratamento térmico nas suas peças por lingotamento contínuo ou laminação e até mesmo oxidação natural dos aços. O uso da carepa no setor de construção civil já é bastante difundido, como para a produção de Cimento Portland (PEREIRA; VERNEY; LENZ, 2012) Figura 11.

Figura 11 – Geração e destinação de resíduos na siderurgia.



Fonte: Baptista (2016)

Da mesma forma que foi realizada a análise SWOT para os produtores de quartzo, buscou-se aqui avaliar os produtores de carepa Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz SWOT dos fornecedores de carepa.

Forças	Oportunidades
Redução de custos	Necessidade de sustentabilidade na indústria
Altos teores de Ferro	
Economia circular	
Propriedade intelectual	
Forma e tamanho uniformes	
Fraquezas	Ameaças
Presença de contaminantes	Substituição por sucata

Fonte: A autora

Forças - Por ser um resíduo gerado em grande escala pelas siderúrgicas e que muitas vezes é descartado possui um baixo preço, levando a redução dos custos para a produção de ligas de Ferro em geral.

Como os resíduos gerados podem retornar a cadeia produtiva e gerar receita cria-se uma economia circular, como no caso da Gerdau que recuperou 73% de seus resíduos e os transformou em coprodutos, tendo uma receita de R\$ 338 milhões em 2017.

Oportunidades - A economia circular que é conseguida com a geração de coprodutos dos processos siderúrgicos tem uma característica sustentável, com a redução na produção de resíduos, que é almejada pelos setores industriais nos dias de hoje e incentivada pela legislação. (SEMAD; COPAM, 2017)

Fraquezas - Mesmo conseguindo homogeneidade com o processo de briquetagem a carepa deve-se tomar cuidado com os mesmos parâmetros físicos requeridos para o quartzo.

Ameaças - A sucata também é uma fonte de ferro pela qual a carepa pode ser substituída, ela também apresenta um baixo preço e é uma opção de substituinte.

Portanto, o quartzo se apresenta como o competidor direto aos briquetes ferrolícosos fornecendo cerca silicosa para o processo de ligas *FeSi* com um preço baixo, porém de forma não sustentável.

A carepa é uma fonte alternativa de Ferro que reduz os custos de produção das ligas, contudo, necessita de processo de aglomeração que viabiliza sua utilização nos fornos além de poder conter compostos nocivos ao processo de redução no forno (Tabela 5).

Tabela 5 – Comparativo entre o briquete e seus concorrentes.

Comparativo	Briquete de rejeito arenoso da mineração	Produtores de Quartzo
Inovação	Sim	-
Sustentabilidade	Sim	Não
Valor Agregado	Alto	Baixo
Legislação	Favorável	Desfavorável
Desempenho	Igual ou Superior	Aceitável

Fonte: A autora

3.2 Processo Produtivo: briquetes de resíduo da mineração

3.2.1 Desenvolvimento do Produto

Esta etapa buscou avaliar o processo de prensagem de um material advindo do rejeito da mineração de ferro, com alto teor de sílica, utilizando-se aglomerante de origem cimentícia. A solução desenvolvida foi analisada quanto à capacidade de compactação do material e os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física.

A operação de prensagem trata-se de um processo de compactação e aglomeração de misturas, contendo partículas do material de interesse com aglomerantes. Aplicam-se forças de compressão uniaxiais, que geram tensões cisalhantes. Dessa forma, diminuem-se o número de vazios e o volume da massa, à medida que o ar contido na mistura é expulso de seu interior.

Pelo processo de prensagem é possível a obtenção de um material sólido, aglomerado na forma de pastilhas, com maior resistência mecânica e baixa liberação de finos. Assim, o produto da prensagem apresenta viabilidade técnica e econômica para transporte, a distâncias maiores, de material fino de quartzo, antes considerados descarte, para produção de Silício Metálico.

A finalidade dos ensaios foi verificar a melhor condição de aglomeração do material e desenvolver a composição das misturas que serão prensadas, com o intuito de selecionar a melhor dosagem das quantidades de insumos, a partir dos resultados de caracterização física obtidos.

Para a realização deste estudo foi proposta a seguinte metodologia: Avaliar os processos de mistura dos componentes, o processo de aglomeração por prensagem (ensaios em escala de bancada), bem como as características físicas e químicas do material aglomerado na forma de pastilhas.

Foi previsto a efetuação de ensaios de prensagem em escala de bancada, com as misturas selecionadas e posteriormente a realização de ensaios de caracterização química e mecânica. Após a seleção da melhor composição de mistura, produziu-se mais um lote de pastilhas em escala de bancada, para validar a composição e o tempo de cura das mesmas. Nesta etapa foram necessários 60 Kg de material. Os ensaios nesta etapa foram descontínuos e consistirão de:

1. Amostragem
2. Caracterização das Matérias Primas:

Na primeira etapa do projeto foram realizados ensaios de caracterização dos insumos a fim de subsidiar a seleção das matérias primas e composição das misturas que serão prensadas. Realizou-se ensaios de análise granulométrica, teor de umidade e análise química das matérias primas e das misturas.

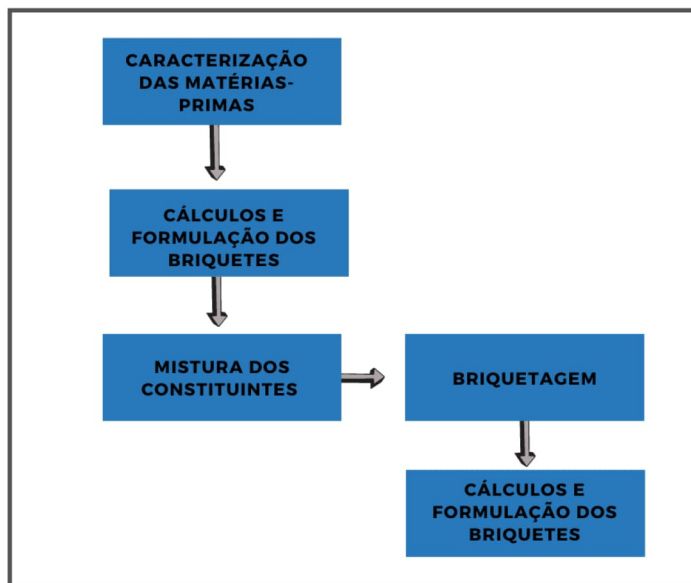
- a) Homogeneização e quarteamento: Inicialmente, para garantir que as amostras sejam

representativas do todo, será realizada a homogeneização por pilha alongada e o quarteamento de todos os insumos.

- b) Determinação de umidade: A determinação da umidade das amostras será realizada a partir da utilização de um analisador termogravimétrico de umidade.
 - c) Análise química: Após a homogeneização e quarteamento, as amostras de cada matéria prima e misturas serão analisadas quanto a sua composição química. Será feita uma análise de composição química dos principais materiais de interesse: *Fe*, *SiO₂*, *C*, *Mn*, *Al₂O₃*, *CaO*, *P*, *TiO₂* e *S*; e secundários: *K₂O*, *Na₂O*, *Cr*, *MgO*, *Zn*, *Pb*.
 - d) Análise granulométrica: Após a homogeneização e quarteamento dos insumos, cada um será analisado quanto a sua distribuição granulométrica, a qual será realizada por peneiramento.
3. Aglomeração em Escala de Bancada: Para a realização dos ensaios, os componentes serão caracterizados quanto ao seu teor de umidade e serão homogeneizados em misturador intensivo (escala de bancada). Os ensaios em escala de bancada serão realizados com a utilização de uma prensa, produzindo pastilhas que apresentam uma forma cilíndrica. Após cada ensaio, os aglomerados serão submetidos a testes de caracterização física, quanto aos itens discriminados a seguir:
- a) Caracterização das pastilhas: Após cada ensaio de bancada, as pastilhas serão caracterizados, quanto aos itens discriminados a seguir:
 - i. Composição química;
 - ii. Teor de umidade;
 - iii. Resistência à compressão a seco;
 - iv. Teste de queda;
 - v. Análise de crepitação.
 - b) Ensaio de Validação
 - c) Relatório Final: Contendo a descrição detalhada dos métodos utilizados e dos resultados obtidos.

O fluxograma da metodologia industrial de fabricação de briquetes, de acordo com Borghi, 2012 adaptado, é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma do processo de produção dos briquetes de resíduo da mineração.



Fonte: Adaptado de [Borghi \(2012\)](#)

A partir da definição da rota de desenvolvimento das pastilhas no laboratório com a utilização do rejeito arenoso, proveniente da flotação do minério de ferro, foi identificada a importância da escolha do ligante para a composição do briquete, de forma a se buscar uma resistência mecânica, que atingisse, no mínimo 500°C e, idealmente, 1000°C para que pudesse ser adicionado, sem problemas, nos Fornos de Redução a Arco Elétrico para produção do $FeSi75\%$ (para evitar geração excessiva de finos nos fornos).

Foi realizado um extenso levantamento bibliográfico com a busca de novos ligantes, que pudessem gerar a resistência a quente necessária para aplicação nos fornos.

Uma vez identificados os ligantes, foram preparados corpos de prova para verificar o padrão da qualidade da mistura, foram seguidos todos os métodos de laboratório para a preparação das amostras coletadas e posterior mistura (Figura 13).

Figura 13 – Quarteamento manual de uma massa de 15kg de amostra do rejeito arenoso.



Fonte: A autora

Para a preparação dos corpos de prova foram feitas 12 misturas, com diferentes teores de ligantes. Para todos os testes, a base de umidade ficou entre 20% e 25%. Além disso, o Ligante 1 possui base cimentícia, enquanto que o Ligante 2 possui base sílica. Na Tabela 6, são apresentadas as composições das misturas analisadas

Tabela 6 – Composições das misturas

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1x	M2x	M3x	M4x	M5x	M6x
Rejeito %	70,0	70,0	70,0	60,0	60,0	60,0	30,0	40,0	30,0	30,0	25,0	25,0
Ligante 1 (%)	10,0	20,0	10,0	15,0	15,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Finos de Carvão (%)	20,0	10,0	10,0	10,0	15,0	20,0	20,0	20,0	20,0	30,0	30,0	25,0
Ligante 2 (%)	0,0	0,0	10,0	15,0	10,0	10,0	10,0	0,0	0,0	0,0	10,0	15,0
Finos de Quartzo(%)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	30,0	40,0	30,0	25,0	25,0

Fonte: A autora

Durante a preparação das misturas, já foi possível perceber quais teores de ligantes seriam mais adequados. Por exemplo, o Ligante 1 não gera uma liga inicial. Dessa forma, se for utilizado em excesso (acima de 20%), a massa se torna muito úmida e não absorve água. A presença do Ligante 2 foi fundamental para proporcionar a liga inicial das misturas e se adequar à necessidade. Além disso, gera uma massa com boa capacidade plástica, ou seja, capaz de se adequar às formas desejadas, tratando-se de um ponto positivo para a compactação. Entretanto, a utilização de finos do quartzo como aglomerante não foi interessante. As misturas formadas, a partir de sua utilização, eram muito heterogêneas, e não demonstraram bons resultados quanto ao teste de crepitação. Analisando as Figuras 14a e 14b, é possível perceber os comportamentos das diferentes misturas obtidas.

Figura 14 – Comportamento de diferentes misturas realizadas.



(a) (M2, M3 e M4) respectivamente



(b) (M3x, M4x e M6x) respectivamente

Fonte: A autora

Para a compactação, foi preparado um molde cilíndrico com um fundo falso e um disco de compressão móvel, para correr por dentro do vazio do molde, para que seja possível empurrar e compactar a massa que estiver preenchendo o cilindro do molde (Figura 15).

Figura 15 – Vista de frente e interna dos moldes de corpo de prova



Fonte: A autora

Foram preparados 4 corpos de prova para cada massa de 500g. Ou seja, em média, o CP tinha 125g + água antes de compactar. A força de compactação utilizada foi de 10t, ou, 509kgf/cm².

É importante ressaltar que a mistura, durante a compactação, pode apresentar a capacidade de absorver ou expulsar a água da massa, concedendo características específicas para o corpo de prova compactado. Esse também é um fator observado, na realização da determinação de uma mistura ideal.

Após a preparação dos corpos de prova das misturas determinadas anteriormente, os mesmos foram estocados em local aberto e ventilado, durante 7 dias (Figura 16), para promover a cura a frio dos ligantes, a fim de promover sua capacidade de resistência mecânica a frio e a quente. É importante salientar que, caso necessário, o tempo de cura pode ser de até 30 dias, a depender das propriedades mecânicas desejadas.

Figura 16 – Corpos de prova aguardando 7 dias para cura a frio.



Fonte: A autora

Após a cura a frio, foram realizados testes a quente. O teste utilizado foi o padrão Elkem para a crepitação. Este, determina a colocação dos corpos de prova, durante 1h, em um Forno Mufla a 1000°C (Figura 17). Em seguida, os corpos de prova foram retirados do forno, até que os mesmos atingissem a temperatura ambiente.

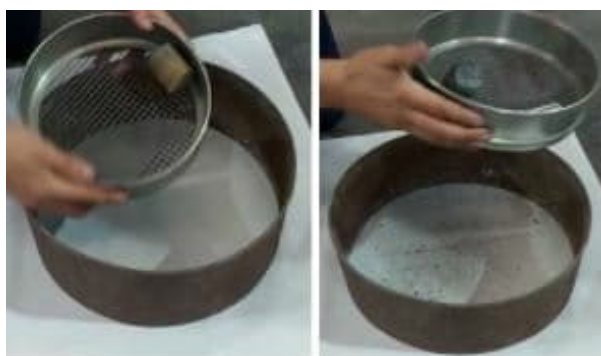
Figura 17 – Posicionamento dos corpos de prova no forno mufla a 1000°C.



Fonte: A autora

Posteriormente, realizou-se a agitação mecânica, empregando-se uma peneira de 3,5# (5,66mm), durante 35 segundos, para verificar qual foi a geração de finos, a partir dos corpos de prova, conforme pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Figura: Início e fim do teste de crepitação durante 35 segundos de agitação (M4).



Fonte: A autora

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletados os dados da massa inicial dos corpos de prova, após o teste de queima, bem como a massa final, tanto do passante como do retido na peneira. Tais informações são apresentadas na Tabela 7. Esses valores determinarão qual mistura base será testada, em uma produção piloto, em briquetagem.

Tabela 7 – Resultados do teste de crepitação.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M1x	M5x	M6x
Massa Inicial (g)			64,87	71,25	76,39	84,68	85,44	64,38	
Massa Retida >3,5# (g)*			57,00	69,12	54,17	65,83	23,37	17,63	
Massa Passante (g)			7,60	2,01	21,80	18,12	60,38	45,50	
Material Crepitado (%)			11,72	2,82	28,54	21,39	70,67	70,67	

Fonte: A autora

É importante ressaltar que as misturas M2x, M3x e M4x não resistiram aos testes de temperatura, ou seja, não obtiveram resistência mecânica a 1000°C, durante 1 hora. Assim, não passaram pelo teste de crepitação e foram desqualificadas.

Com esses resultados, foi possível determinar que a mistura M4 foi a que menos gerou finos. A mistura M3 foi considerada promissora, pois também gerou pequena quantidade de finos. Além disso, trata-se da mistura que empregou menor quantidade de ligante, sendo um atrativo, em questões financeiras. As misturas M1, M5 e M6 geraram mais finos, quando comparadas aos resultados das misturas M4 e M3, e por isso não foram consideradas. Todas as misturas que apresentavam em sua composição, finos de quartzo (índice x), também geraram um excesso de finos e tiveram desempenho abaixo do esperado. Sendo assim, a mistura ideal está entre a formulação M3 e M4, sendo a mistura M4 a mais próxima do resultado ideal para aplicabilidade.

O produto encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento, ou seja, em early stage. Há a necessidade de testes que provem a sua melhor performance operacional. Contudo já foram feitas análises junto às publicações científicas, testes de laboratório com geração de protótipos, reuniões diretamente com a indústria e com os melhores especialistas do meio acadêmico, sendo possível determinar o uso da briquetagem como ferramenta inicial para aglomeração. Ainda houve o levantamento e testes dos principais aglomerantes que poderiam ser empregados no processo, além de estimativas dos parâmetros de produção, resumidos na Tabela 8 para que as análises de briquetagem fossem satisfatórias, levando em consideração a força para aglomerar o material, custos (referente à uma pesquisa de mercado em 2019) e o retorno ambiental em toda

cadeia que esse insumo possa passar.

Tabela 8 – Estudo de aglomerantes para o processo de briquetagem

Origem	Aglomerante	Vantagens	Desvantagens	Preço (R\$/Kg)
Natural	Melaço	São orgânicos e naturais e na sua queima gera gases que são eliminados e utilizados no próprio forno pelo cliente. Baixo custo.	Podem conter impurezas como fósforo (no caso do melaço)	1,20
	Amido			7,68
	Alcatrão vegetal			17,96
Sintéticos	Poliacrilaminas	São orgânicos e mais puros, diminuindo a produção de impurezas deletéria, quantidade, a ser acrescida menor (de 5 a 10 vezes menor), produz uma mistura altamente homogênea, não deixam resíduos, pois em altas temperaturas estes reagentes são totalmente volatilizados.	São mais caros, baixa resistência em altas temperaturas	8,50
	Carboximetil-celulose			42,28
	Hidroximetil-celulose			176,00
Inorgânicos	NaOH	São inorgânicos e diminuem a produção de gases dos fornos. Baixo custo.	Geração de escória	2,90
	Mg(OH) ₂			8,10

Fonte: A autora.

Os principais benefícios do briquete de ferrosilício em substituição às matérias-primas comumente utilizadas no processo de produção das ligas FeSi75, são: 1) aumento de produtividade da fabricação de ferrosilício; 2) redução no consumo de energia; 3) redução de custos na compra de matérias-primas; 4) manutenção dos fornos 5) facilidades logísticas na entrega para o cliente.

Além disso, o produto irá melhorar o processo produtivo dos clientes e acarretará uma demanda crescente de briquetes de rejeito da flotação de minérios de ferro.

De maneira mais ampla, o desenvolvimento de briquete impacta diversos stakeholders envolvidos, tais como as mineradoras, ao fornecedor a principal matéria-prima (o rejeito arenoso oriundo do processo produtivo do minério de ferro) é beneficiada com o repasse de um material que é considerado atualmente um passivo ambiental com adicional de custos de armazenagem e as produtoras de ligas que, por sua vez, poderão ampliar a margem de ganhos e melhorar a qualidade do produto por elas ofertado, uma vez que a utilização de briquetes de resíduo de

mineração reduz a necessidade de insumos de ferro, diminui os custos com energia e, pela uniformidade de forma e de composição proporcionada pelo processo de briquetagem, possibilita uma homogeneidade na produção de tais ligas. Por ser produzido a partir de um processo simples e com insumos baratos, o produto apresenta também preço competitivo com o quartzo, insumo atualmente empregado na produção de ligas de ferrosilício, o que confere a ele também um diferencial de preço.

Além disso, existe um valor sustentável intrínseco à solução proposta que é uma preocupação, bem como interesse crescente do setor siderúrgico, seja pelo recrudescimento da legislação ambiental, seja pela procura de fontes alternativas de recursos. Assim, a solução tecnológica obtida com a produção de briquetes utilizando resíduos de mineração possui vários impactos positivos, abrangendo os três pilares do desenvolvimento sustentável (Figura 20), no sentido de potencializar as possibilidades financeiras, produtivas e ambientais do setor:

1. **Impacto ambiental**, pois diminuirá o volume de rejeitos depositados nas barragens e os riscos de possíveis acidentes pela estocagem. Produto inovador, que substitui matéria prima tradicional no mercado de ferro ligas. Toda atividade industrial provoca impacto ambiental. A geração de resíduos, como subprodutos, não importa de que material seja feito, provoca um impacto ambiental, seja em função do processo produtivo, da matéria-prima utilizada, ou da disposição final do produto. (ARAUJO, 2014). (Reduzindo o impacto ambiental na extração do quartzo), Redução do custo de energia elétrica, menor produção de finos no alto forno além de certificações verdes por meio da introdução de novas tecnologias de processo e maior aproveitamento dos seus insumos (matéria-prima e energia);
2. **Impacto econômico**, pela diversificação da economia, desenvolvimento de um novo produto de valor competitivo. Pressionadas por entidades ambientais, a legislação brasileira está cada vez mais rigorosa no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Esses fatores influenciam as indústrias a procurarem processos de fabricação alternativos, com a criação de tecnologias que minimizem ou evitem a geração de resíduos que agredem o meio ambiente. (BAPTÍSTA; NASCIMENTO, 2013)

A figura 19 apresenta uma estimativa realizada em 2019 da redução de custos das indústrias de ferroligas ao utilizarem os briquetes (BAR) substituindo parcialmente e de forma gradativa as matérias primas da indústria desse setor. A contribuição do uso de briquetes afeta diretamente a economia de energia para produção.

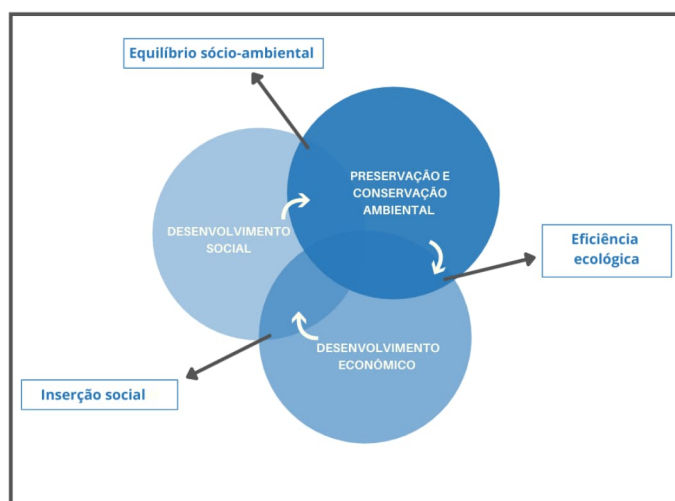
Figura 19 – Impacto econômico da substituição parcial das matérias primas utilizando os briquetes (BAR) na produção de ferroligas.

Redução de custos ao consumir BAR (R\$/t)					
VALOR BAR	Quantidade consumida de BAR				
R\$ 290,00	50 kg/t BAR	100 kg/t BAR	150kg/t BAR	200 kg/t BAR	250 kg/t BAR
Insumos	1,57%	3,14%	4,73%	6,34%	7,95%
Energia Elétrica	-R\$ 12,48	-R\$ 24,96	-R\$ 37,44	-R\$ 49,92	-R\$ 62,40
Biorredutor	-R\$ 11,98	-R\$ 23,96	-R\$ 35,94	-R\$ 47,92	-R\$ 59,90
Quartzo	-R\$ 12,12	-R\$ 24,25	-R\$ 36,37	-R\$ 48,49	-R\$ 60,62
Manutenção	-R\$ 2,67	-R\$ 5,35	-R\$ 8,02	-R\$ 10,70	-R\$ 13,37
Gastos Diretos	-R\$ 2,85	-R\$ 5,71	-R\$ 8,56	-R\$ 11,41	-R\$ 14,26
Mão de Obra Direta	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Outros Custos	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Outras MPs	-R\$ 32,09	-R\$ 64,18	-R\$ 96,27	-R\$ 128,37	-R\$ 160,46
<i>Eletrodos</i>	-R\$ 5,13	-R\$ 10,27	-R\$ 15,40	-R\$ 20,54	-R\$ 25,67
<i>Carepa</i>	-R\$ 26,96	-R\$ 53,91	-R\$ 80,87	-R\$ 107,83	-R\$ 134,78
<i>Fluorita</i>	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
<i>Calcário</i>	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
VALOR DE REDUÇÃO	-R\$ 74,20	-R\$ 148,41	-R\$ 222,61	-R\$ 296,81	-R\$ 371,01

Fonte: A autora.

3. Impacto social, pois diversifica-se a economia e geração de novos postos de trabalho.

Figura 20 – Vantagens do uso de briquetes para introdução de finos em instalações metalúrgicas.



Fonte: A autora.

Percebe-se, assim, que a demanda por soluções sustentáveis entre esses dois setores - mineração e fundição de aço, é uma preocupação constante, pois suas atividades envolvem o consumo de recursos finitos cuja extração causa impactos ambientais. A cada passo que a tecnologia industrial avança, ocorre a busca pela melhoria de processos. As matérias-primas que são utilizadas tradicionalmente como o quartzo, o minério de ferro, o carvão e a carepa, têm formas distintas de acordo com o seu processo de produção. Portanto, a utilização de uma matéria-prima com caráter sustentável é bem vista neste cenário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Os briquetes Ferrossílicos conferem inovação ao mercado e ao processo de produção de ferroligas, trazendo consigo sustentabilidade, agregando valor ao rejeito de mineração e diminuindo gastos do cliente com carga ferrosa. Como o Quartzo, os briquetes conseguem atender a qualidade exigida pelos clientes e seu processo, conferindo um desempenho igual ou superior por trazer consigo uma carga ferrosa para a produção.

A implementação de tecnologias como a descrita neste estudo, na cadeia da mineração, possui claros direcionamentos para a sustentabilidade do setor e importante retorno socioeconômico à população dos municípios próximos às mineradoras. Acreditando na incorporação da economia circular, o estudo mostrou ser viável tecnicamente e promissor para a indústria produtora de ligas de ferrosilício, por apresentar pequena geração de finos, além de empregar pouca quantidade de ligante na sua composição sendo um atrativo nas questões financeiras. O briquete (BAR) pode ser utilizado como carga dos alto-fornos, diminuindo os principais custos do setor de ferroligas. Além de apresentar viabilidade ambiental, no que tange ao reaproveitamento dos resíduos e da melhoria da qualidade ambiental, ao reduzir o passivo das barragens de rejeito contribuindo para a descaracterização de barragens das mineradoras.

Dessa forma, espera-se que este estudo possa contribuir de maneira significativa para o crescimento dos principais setores brasileiros, trabalhando com uma importante visão de sustentabilidade e valores sociais, principalmente junto aqueles municípios mineradores como Ouro Preto e Mariana, que tem como passivos ambientais, grandes barragens de resíduos de mineração de ferro, mas com grande potencial de reaproveitamento e agregação de valores com a reutilização dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- ABIFA. *Fundição & Matérias-Primas*. 2016. Disponível em: <<https://abifa.org.br/wp-content/uploads/2016/04/abifa-189-fevereiro.pdf>>. Acesso em: 2022-01-02.
- ABM, A. B. de Metalurgia Materiais e M. *Brasil é o nono maior produtor de aço do mundo, aponta levantamento*. 2020. Disponível em: <<https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/brasil-e-o-nono-maior-produtor-de-aco-do-mundo-aponta-levantamento>>. Acesso em: 2021-11-14.
- ABRAFE. *Contribuições do setor*. 2016. Disponível em: <<http://www.abrafe.ind.br/o-setor/contribuicoes-do-setor>>. Acesso em: 2021-11-20.
- ARAUJO, J. A. de. *Reciclagem de pó de forno elétrico a arco para a produção de Aglomerado Pré-Fundido (APF) para uso em processo siderúrgico*. 296 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- BAPTISTA, A. L. de B. *Geração e destinação de resíduos na siderurgia*. 2016. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/66740553-Andre-luis-de-brito-baptista.html>>.
- BAPTÍSTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A. *Aspectos básicos, conceitos e técnicas ligados ao desenvolvimento de produtos para o seguimento de exploração, produção e transporte de petróleo e gás : o caso de tubos de aço e ferro*. Revista tubo e cia – ano ix – nº 57. f.: Revista Tubo e Cia, 2013. f. ISBN f.
- BORGHI, M. da M. *EFEITO DA GRANULOMETRIA NA AVALIAÇÃO DOS BRIQUETES*. 47 f. Monografia (Monografia) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, ESPÍRITO SANTO, 2012.
- CARVALHO, E. A. de; BRINCK, V. *Briquetagem*. Cetem - livros publicados. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018. v. 4. ISBN 978-85-61121-62-4.
- CARVALHO, E. A. de; BRINCK, V.; CAMPOS, A. R. de. *Aglomeração: Briquetagem*. Cetem - capítulos de livros. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. v. 6. ISBN 978-85-82610-83-1.
- CEF, C. E. F. *Selo Casa Azul- Boas Práticas para habitação mais sustentável*. Páginas letras. São Paulo: CAIXA ECONÔMICA FEDERAL CEF, 2010. v. 1. ISBN 978-85-86508-78-3.
- FIEMG. *Painel da indústria mineira*. 2018. Disponível em: <https://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/EPE/2018/PainelDaIndustriaMineira/Outubro/Painel-Industria-Mineira_MG_out_18.pdf>. Acesso em: 2021-11-10.
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. *Separação sólido-líquido*. Cetem - livros publicados. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. v. 6. ISBN 978-85-82610-83-1.
- GUIMARAES, A. C. et al. *Obtenção de geopolímero com adição de rejeito de mineração depositado na barragem de candonga (rio doce-mg, brasil)*. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- IBGE, I. B. de Geografia e E. *Produto Interno Bruto*. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 2021-12-20.

IBRAM, I. B. de M. *Panorama da Mineração em Minas Gerais*. 2016. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Panorama-da-Mineracao-em-Minas-Gerais-2016.pdf>>. Acesso em: 2021-05-10.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D. Utilisation of iron ore mine tailings for the production of geopolymer bricks. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, Taylor Francis, v. 30, n. 2, p. 92–114, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17480930.2014.993834>>.

LUZ, A. B. d.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de Minérios*. 2010. Disponível em: <<http://livroaberto.ibict.br/handle/1/949>>. Acesso em: 2021-11-14.

LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. *Tratamento de minérios*. Cetem - livros publicados. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. v. 5. ISBN 978-85-61121-62-4.

LÜDKE, M. C. *A ROTA METALÚRGICA DO SILÍCIO: DA EXTRAÇÃO DO QUARTZO À OBTENÇÃO DO SILÍCIO DE GRAU FOTOVOLTAICO*. 77 f. Monografia (Monografia) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, SANTA CATARINA, 2018.

MARIN, G. *Desenvolvimento de compósitos SiC-FeSi para sua aplicação como resistências elétricas via tecnologia do pó*. 183 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2019.

MME, M. D. M. E. E. *Relatório Técnico 18 - Perfil da Mineração de Ferro* Relatório Técnico 18 - Perfil da Mineração de Ferro. 2009. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P09_RT18_Perfil_da_Mineracao_de_Ferro.pdf/362a62a6-04db-b739-98d0-03f7ff9f749f?version=1.0>. Acesso em: 2021-11-26.

MME, M. D. M. E. E. M. e E. *No Canadá, ministro aproxima investidores estrangeiros do setor mineral brasileiro*. 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/3FzSc0A>>. Acesso em: 2021-12-19.

NEVES, R. F. et al. Reutilização de resíduo de beneficiamento da mineração e metalurgia como fonte de zeólitas. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 2801.

PEREIRA, F. M.; VERNEY, J. C. K. de; LENZ, D. M. Avaliação do emprego de carepa de aço como agregado miúdo em concreto. In: . [S.l.: s.n.], 2012. p. 64.

PEREIRA, L.; CRUZ, G.; GUIMARÃES, R. M. F. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra (impacts from the tailings dam rupture of Brumadinho, Brazil: an analysis based on land cover changes). *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 4, p. 122–129, 02 2019.

PIETSCH, W. *Agglomeration Processes -phenomena, technologies, equipment*. Weinheim. Wiley-vch. Florida, USA: Wiley-VCH, 2002. v. 1. ISBN 3-527-30369-3.

QUARESMA. *Balanco Mineral Brasileiro 2001*. 2001. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001>>. Acesso em: 2021-11-14.

SEMAD; COPAM. *GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS -Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, SEMAD- Subsecretaria de Gestão e Regularização Ambiental Integrada, Superintendência Regional de Meio Ambiente do Jequitinhonha - PARECER ÚNICO Nº 0621007/2018*. 2017. Disponível em: <<http://sistemas.meioambiente.mg>>.

gov.br/licenciamento/uploads/_3Dg1oCJ46nNfbszA5r4pJohvySGRUKN.pdf>. Acesso em: 2021-12-01.

SIF, S. de I. F. *Setor de ferroligas é um dos que mais contribui para a balança comercial brasileira*. 2020. Disponível em: <<https://sif.org.br/2020/04/setor-de-ferroligas-e-um-dos-que-mais-contribui-para-a-balanca-comercial-brasileira/>>.

SILVA, A. C. *Aglomeracão Mineral*. 2016. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/8648127-Aglomeracao-mineral-2-briquetagem-prof-dr-andre-carlos-silva.html>>. Acesso em: 2021-11-19.

SILVA, F. A. N. G. da et al. *SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS*. Cetem - livros publicados. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. v. 14. ISBN 978-85-61121-39-6.

SILVEIRA, M. D. *UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL*. 39 f. Monografia (Especialização) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SPADOTTO et al. Impactos ambientais causados pela construção civil. *Unoesc & Ciência - ACSA*, v. 2, n. 2, p. 173–180, jan. 2012. Disponível em: <<https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acsa/article/view/745>>.

SWIRKOWSKY, M. et al. Aproveitamento de borra metálica gerada na produção de tubos de aço com costura para elaboração de briquetes autorredutores. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v. 1, n. 5, p. 1928 – 1931, 2018. ISSN 2359-1757. Disponível em: <www.proceedings.blucher.com.br/article-details/aproveitamento-de-borra-metlica-gerada-na-produo-de-tubos-de-ao-com-costura-para-elaborao-de-briquetes-autorredutores-28882>.

Portal da Indústria. *PRINCIPAIS SETORES DO ESTADO Participacao percentual do setor no PIB industrial*. 2019. Disponível em: <<https://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/estado/mg>>. Acesso em: 2021-12-21.

YELLISHETTY, M. et al. Reuse of iron ore mineral wastes in civil engineering constructions: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, p. 1283–1289, 09 2008.

ZAMBA, A.; VEREMACHI, A. Producao dos briquetes atraves de cascas de coco. *Conferencias UEM, XI CONFERENCIA CIENTIFICA 2020: Investigacao, Extensao e Inovacao para o Desenvolvimento Sustentavel*, v. 1, p. 10, 08 2021.