



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



# MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

BRIQUETE VERDE PARA REATORES INDUSTRIAIS DE PRODUÇÃO DE  
FERRO PRIMÁRIO: REVISÃO DA LITERATURA

**Lívia Vieira Faria**

**Ouro Preto, Julho de 2022**

**Livia Vieira Faria**

**BRIQUETE VERDE PARA REATORES INDUSTRIAIS DE PRODUÇÃO  
DE FERRO PRIMÁRIO: REVISÃO DA LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

**Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira**

**Ouro Preto, Julho de 2022**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F224b Faria, Livia Vieira.

Brique verde para reatores industriais de produção de ferro primário  
[manuscrito]: revisão da literatura. / Livia Vieira Faria. - 2022.  
56 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista Vieira.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola  
de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Briquetes - Brique verde. 2. Siderurgia. 3. Aglomeração - Minério  
de ferro. I. Vieira, Cláudio Batista. II. Universidade Federal de Ouro Preto.  
III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Lívia Vieira Faria**

### **Briquete verde para reatores industriais de produção de ferro primário: revisão da literatura**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 21 de dezembro de 2022

#### Membros da banca

Dr. Cláudio Batista Vieira - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto  
Me. Sávio José de Oliveira - REDEMAT/UFOP

Cláudio Batista Vieira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Batista Vieira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/10/2023, às 15:41, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0599461** e o código CRC **28BAA10D**.

## RESUMO

Com o aumento das demandas e a implementação de novas regulamentações visando a redução das emissões de gases de efeito estufa, o setor minero-metalúrgico tem experimentado uma transformação significativa. No entanto, essa mudança enfrenta desafios consideráveis, principalmente devido às características intrínsecas do setor, que é conhecido por sua resistência à adoção de novas tecnologias e por sua tendência à inércia. Um desses desafios centra-se na necessidade de substituir as fontes de combustíveis fósseis na produção de aço. A Vale, como parte de seu compromisso ambiental, estabeleceu metas ambiciosas de redução de emissões, com o objetivo de diminuir suas emissões em 33% até 2030 e atingir a neutralidade de emissões até 2050. Para cumprir essas metas, a empresa tem investido em tecnologias inovadoras. Nos últimos 20 anos, a Vale concentrou seus investimentos em um produto revolucionário chamado "briquete verde", destinado a substituir os tradicionais sinter e pelota na produção de minério de ferro. Este novo produto é composto por minério de ferro (pellet feed e/ou sinter feed) e uma solução de aglomerantes inovadora, que inclui rejeitos de mineração em sua formulação. As vantagens desse processo de briquetagem são notáveis: requer menos etapas, resulta em um produto mais flexível com distribuição de tamanho mais homogênea, maior resistência física e menor abrasão, além de reduzir a geração de finos. Tudo isso contribui para benefícios significativos do ponto de vista ambiental. Este trabalho tem como objetivo principal conduzir uma revisão bibliográfica abrangente sobre a tecnologia de briquetagem de minério de ferro, com foco especial no novo produto desenvolvido pela Vale, denominado de "briquete verde". Esse produto está destinado a ser disponibilizado tanto no mercado nacional quanto internacional, marcando um avanço importante no contexto da sustentabilidade e das práticas mais ecoamigáveis no setor minero-metalúrgico.

**Palavras-chave:** Briquete verde. Siderurgia. Aglomeração de minério de ferro

## ABSTRACT

With the increasing demands and the implementation of new regulations aimed at reducing greenhouse gas emissions, the mining and metallurgical sector has been undergoing a significant transformation. However, this change faces considerable challenges, primarily due to the inherent characteristics of the sector, known for its resistance to adopting new technologies and its tendency towards inertia. One of these challenges focuses on the need to replace fossil fuel sources in steel production. Vale, as part of its environmental commitment, has set ambitious emissions reduction targets, aiming to decrease its emissions by 33% by 2030 and achieve emissions neutrality by 2050. To meet these goals, the company has been investing in innovative technologies. Over the past 20 years, Vale has concentrated its investments in a groundbreaking product called "green briquette," designed to replace the traditional sinter and pellet in iron ore production. This new product is composed of iron ore (pellet feed and/or sinter feed) and an innovative agglomerant solution that includes mining waste in its formulation. The advantages of this briquetting process are remarkable: it requires fewer steps, results in a more flexible product with a more homogeneous size distribution, greater physical strength, and lower abrasion, while also reducing the generation of fines. All of these contribute to significant environmental benefits. The main objective of this work is to conduct a comprehensive literature review on iron ore briquetting technology, with a special focus on the new product developed by Vale, referred to as the "green briquette." This product is intended to be made available both in the domestic and international markets, marking a significant advancement in the context of sustainability and eco-friendly practices in the mining and metallurgical sector.

**Key Words:** Green briquette. Steel industry. Iron ore agglomeration

## LISTA DE SIGLAS

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração.

BDTD - Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações.

BIFs – *Banded Iron Formations*, em inglês, Formações Ferríferas Bandadas.

CCUS - *Carbon capture, use and storage*, em inglês, captura, utilização e armazenamento de carbono.

CIC - *iron coke*, em inglês, ferro-coque ou ICHB.

COP26 - 26ª Conferência das Partes da Convenção da Federação das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

DRI – *Direct Reduced Iron*, em inglês, ferro-esponja ou ferro de redução direta

EAF- Em inglês, forno elétrico a arco.

GEE – Gases de Efeito Estufa.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração.

IEA – *International Energy Agency*, em inglês, Agência Internacional de Energia.

MACC - Custo Marginal de Abatimento, na sigla em inglês.

Mtpa - Milhões de toneladas por ano.

PPC – Percentual de perda por calcinação

PF – *Pellet Feed*

QF - Quadrilátero Ferrífero.

SF – *Sinter feed*

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

WWF - *World Wide Fund for Nature*, em inglês, Fundo Mundial para a Natureza.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4-1 - Itabirito encontrado no Quadrilátero Ferrífero (ROSIÈRE, CHEMALE JR, 2000, p. 33).	14
Figura 4-2 - Fluxograma de produção do aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010).	16
Figura 4-3 - Aplicações frequentes dos processos de aglomeração. Adaptado de (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).	18
Figura 4-4 – Sinter, pelota e briquete, respectivamente (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).	19
Figura 4-5 - Fluxograma de Processo de Briquetes (OLIVEIRA, 2019)	22
Figura 4-6 – Processo de auto redução do briquete (BAPTISTA, 2016)	23
Figura 4-7 - Pilha de briquetes (VALE, 2021)	24
Figura 4-9 - Visão conceitual da redução de emissão de GEE na siderurgia, diante das novas regulamentações (VALE, 2021).	26
Figura 4-10 - Metas em relação a mudanças climáticas da Vale para os próximos anos (VALE, 2021).	27
Figura 4-11 - Metas de escopo 3, neutralização das emissões líquidas (VALE, 2021).	27
Figura 4-12 – Curva de Custo marginal de abatimento para iniciativas relacionadas a meta de redução de emissões (VALE, 2021).	28
Figura 4-13 - Comparativo entre as etapas dos processos de (VALE, 2021).	32
Figura 4-14 - Comparativo entre Rotas de Produção de Aço tradicional e utilizando Briquete Verde (VALE, 2021).	32
Figura 4-15 - Vantagens e benefícios de briquete verde em relação ao processo de politização tradicional (VALE, 2021).	33
Figura 5-1 - Distribuição granulométrica (OLIVEIRA, 2019, p. 68).	35
Figura 5-3 - Resultados dos ensaios de caracterização física e metalúrgica (OLIVEIRA, 2019, p. 93).	39
Figura 5-4 - Processo de produção de briquetes com rejeitos com aglomeração a frio (PARREIRA et al., 2019, p. 23).	41
Figura 5-5 - Metodologia de Processo.	43
Figura 5-6 - Redução do tempo de cura à temperatura ambiente em função do uso de catalisador.	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Produtos de minério de ferro.	14
Tabela 5-1 - Materiais utilizados na produção de misturas para produção de briquetes.	34
Tabela 5-2 - Comparativo de parâmetros de qualidade do briquete obtido por meio do processo da presente invenção	44

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVO	11
2.1	Objetivos Específicos	
3.	METODOLOGIA	12
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1.	Minério de Ferro e Cadeia Siderúrgica	13
4.2.	Processos de Aglomeração	17
4.2.1.	Sinterização	20
4.2.2.	Pelotização	20
4.2.3.	Briquetagem	21
4.3.	Contexto do mercado e redução de emissões de GEEs	24
4.4.	Briquete Verde	29
5.	ESTUDO DE PRODUÇÃO BRIQUETES DE MINÉRIOS EMPREGANDO SILICATO DE SÓDIO EM ESCALA DE LABORATÓRIO E PILOTO	34
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

## 1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas são cada vez mais evidentes, o que têm motivado acordos de descarbonização globais. O Brasil, por exemplo, no acordo de Paris, comprometeu-se a reduzir até 2025 suas emissões de gases de efeito estufa em até 37%, estendendo essa meta para 43% até 2030 (WWF Brasil, 2020). Assim, com o aumento da cobrança e das novas regulamentações de redução de gases de efeito estufa, reafirmados na 26ª Conferência das Partes (COP26) da Convenção da Federação das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, tem-se impulsionado a transformação no setor minero-metalúrgico, como é visto no estudo da Agência Internacional de Energia – IEA (2021, p.13), porém há diversos desafios devido às características de sua infraestrutura, um “navio de *containers*” por sua inércia e lentidão na mudança de direção (IEA, 2021, p.46).

Segundo o IEA (2021, p. 11), o setor minero-metalúrgico é extremamente dependente de combustíveis fósseis, uma vez que 80% da produção utiliza a rota primária, com gasto energético oito vezes mais intenso que a rota secundária, que utiliza sucata. Assim, por ser um setor de alto consumo energético baseado em carvão mineral, é também responsável pela emissão de gases de efeito estufa. O setor é responsável por 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia direta (incluindo emissões de processos industriais). Caso não haja nenhuma iniciativa de redução, até 2050, haverá um aumento de mais de 30% na demanda global de aço, o que representa um aumento nas taxas de emissões atuais de CO<sub>2</sub> de 7% (IEA, 2021, p. 11).

Ainda segundo o IEA (2021, p. 12), para atender às metas globais de energia e clima, as emissões da indústria do aço devem cair em pelo menos 50% até 2050 e para tal é necessário buscar novas tecnologias de eficiência energética, assim como novas matérias-primas e novas fontes energéticas. A intensidade energética da produção é fortemente influenciada por fatores como a proporção de sucata e minério de ferro, assim como a qualidade de minério de ferro utilizado no processo.

Além de ser uma grande fonte de emissões de gases de efeito estufa, o setor minero-metalúrgico causa outros impactos ambientais significativos, como o passivo associado às barragens de rejeitos de minérios. Devido à crescente demanda por minério de ferro e à diminuição das reservas com teores mais baixos de ferro, a extração de rochas com teores reduzidos tornou-se economicamente viável. Isso resulta em um aumento na

quantidade de rejeitos gerados, o que, por sua vez, requer barragens de rejeitos cada vez maiores para a sua disposição.

Atualmente, as empresas não têm mais permissão para utilizar barragens a montante para o armazenamento de rejeitos. Em vez disso, são obrigadas a adotar tecnologias de filtragem para separar a água dos rejeitos e dispor os rejeitos de forma a seco. Além disso, essas barragens precisam passar por um processo de descaracterização para reduzir os riscos associados a elas e mitigar possíveis impactos ambientais. O rejeito é todo e qualquer material não aproveitável economicamente gerado durante o processo de beneficiamento, sendo produzido, paralelamente, ao produto de interesse, como consequência inevitável dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios. A lama gerada durante o processo de beneficiamento de minérios de ferro é uma preocupação para a indústria já que a geração de lama típica é de cerca de 20% do minério de ferro extraído e atualmente é depositada quase em sua totalidade em barragens (OLIVEIRA, 2019, p. 21). Esse cenário demonstra a necessidade de criar soluções que propiciem um reaproveitamento abrangente dos rejeitos.

Como parte do propósito da empresa, a Vale S/A se comprometeu a adotar a mineração de baixo carbono. A meta é uma redução de 33% até 2030 mesmo com o aumento dos níveis de produção de minério de ferro, compromisso alinhado com as metas do Acordo de Paris, e até 2050 atingir a neutralidade das emissões. Para atingir a descarbonização, sendo que a pelotização e a metalurgia são responsáveis por mais da metade das emissões da Vale, o foco é o aumento do uso de bioenergia, eletrificação pelo uso de plasma em substituição aos combustíveis fósseis, e ganhos de eficiência energética. A Vale já vem realizando pilotos para substituição de carvão e outros combustíveis fósseis, e estão previstos testes com o uso de biocarbono e bio-óleo ainda em 2021 (VALE, 2021, p. 3).

Com objetivo de aproveitar os rejeitos gerados, algumas iniciativas vêm sendo implementadas a fim de se desenvolver processos tecnicamente viáveis que permitam a concentração das partículas finas presentes nos rejeitos, de forma econômica e ambientalmente amigável. Uma alternativa eficaz para redução no consumo de combustíveis fósseis consiste na reintrodução do rejeito, que, muitas vezes possui significativa quantidade de ferro, no próprio processo de fabricação do ferro e aço, por meio de técnicas de aglomeração, entre elas, a briquetagem, as quais surgiram da necessidade de recuperação das frações mais finas oriundas do processamento de minérios, carvões ou resíduos em geral (LEÃO, 2021, p. 2).

Barros *et al.* (2015, p. 156) definiram briquetagem como a aglomeração de partículas finas por meio de pressão, auxiliada ou não por aglomerantes, permitindo obtenção de produtos compactados, com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. A redução de volume do material, além dos benefícios tecnológicos, permite que materiais finos possam ser transportados e armazenados de forma mais econômica. Se antes a briquetagem não era considerada economicamente competitiva, a crescente preocupação ambiental, resultando em leis mais rígidas, além da necessidade de aproveitar economicamente os resíduos e as partículas finas geradas no beneficiamento de minérios, tornaram a técnica uma importante alternativa para aglomerar valor econômico (Barros *et al.* 2015, p. 156).

Para a Vale (2021, p.4), a descarbonização da indústria siderúrgica deve valorizar produtos e soluções com minério de ferro de alta qualidade e baixas emissões, por isso sua estratégia atual já prevê um portfólio de produtos de alta qualidade, representando 90% de sua produção até 2024. Entre os produtos do portfólio, a empresa tem desenvolvido nos últimos 20 anos uma tecnologia de briquetagem “verde”, trazendo um novo produto, em substituição a pelota e utilizando menos combustíveis fósseis, particulados e uso de água.

O novo produto é composto por uma mistura de finos de minério de ferro e uma solução inédita de aglomerantes, que inclui em sua formulação rejeito arenoso (e/ou argiloso). Estes rejeitos, provenientes das usinas de beneficiamento de minérios itabiríticos, são depositados em grandes barragens constituindo um problema recorrente na mineração. Uma vez que o briquete verde é um aglomerado a frio que dispensa a queima (baixa temperatura de secagem), é possível a redução de mais de 10% nas emissões de carbono na rota de produção, além de proporcionar uma redução no custo em 50% do processo de pelletização. Segundo a empresa (VALE, 2021, p. 12), o material ainda reduz a emissão de particulados e gases de efeito estufa como o dióxido de enxofre e o óxido de nitrogênio, além de dispensar o uso de água na produção.

O presente trabalho será um estudo bibliográfico sobre este novo produto, denominado de “briquete verde” e desenvolvido de forma inovadora pela mineradora Vale.

## 2. OBJETIVO

Objetiva-se neste trabalho realizar um levantamento bibliográfico sobre briquetes de minério de ferro para uso em reatores industriais de produção de ferro primário com ênfase a um novo produto a ser disponibilizado principalmente no mercado internacional e denominado de ‘briquete verde’.

### 2.1 Objetivos Específicos

Enumeram-se objetivos específicos do trabalho:

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre briquetagem de minério de ferro;
- Realizar uma descrição sobre as características intrínsecas do “briquete verde”, as etapas de fabricação desse produto, as possíveis usinas de briquetagem a serem construídas no Brasil, investimentos realizados, vantagens de sua utilização em processos de redução, análise de impacto ambiental e de mercado.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho será um estudo bibliográfico e não terá parte experimental. Será realizada uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de identificar produções científicas em periódicos nacionais e internacionais, assim como notas técnicas sobre o novo produto “briquete verde” da empresa Vale S.A. e descrever as etapas de fabricação do mesmo, detalhes e características gerais das usinas industriais de briquetagem em construção, investimentos a serem aplicados, as vantagens técnicas da utilização de "briquetes verdes" em processos de fabricação de ferro primário (altos-fornos e processos de redução direta), análise de impacto ambiental (emissão de CO<sub>2</sub>), tipos de aglomerantes empregados, características das matérias primas, fluxograma de processos, etc.

Serão pesquisados artigos científicos na Plataforma de Periódicos da Capes, teses e dissertações na base da Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), artigos técnicos no Google Acadêmico, artigos de congressos, seminários e revistas na plataforma de publicações técnicas da ABM (Associação Brasileira de Metalurgia, Mineração e Materiais) e também materiais técnicos e patentes fornecidos pela empresa Vale (proprietária da patente dos briquetes verdes).

## 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1. Minério de Ferro e Cadeia Siderúrgica

O minério de ferro é a matéria-prima básica da siderurgia, respondendo pelas unidades metálicas (Fe) de alimentação dos reatores de redução, como o alto forno e os módulos de redução direta convencionais. Processado nessas instalações, o minério dá origem ao ferro primário que, tratado nas aciarias, converte-se em aço (POLICARPO, 2012, p. 13).

O Ferro (Fe) é uma das substâncias mais abundantes na crosta terrestre e embora faça parte da composição de vários minerais, apenas alguns podem ser explorados economicamente, apresentando concentrações de Fe suficientes para serem tratados como minério, caracterizados principalmente por óxidos como a hematita e a magnetita (LEÃO, 2021, p. 6).

Os maiores e mais importantes depósitos de minério de ferro no Brasil e no mundo são as formações ferríferas bandadas (FFBs) (em inglês, *banded iron formations* - BIF), as quais são definidas como rochas finamente bandadas ou laminadas, constituídas, principalmente, de minerais de sílica e ferro (hematita, magnetita e alguns carbonatos e silicatos) (LEÃO, 2021, p. 7).

O ferro e a sílica podem ser derivados do magmatismo submarino e atividade hidrotermal. O processo de formação se inicia com o ferro na água do mar, que combinado com o oxigênio liberado durante a fotossíntese realizada por Cianobactérias ou pela oxidação metabólica do ferro por micro-organismos microaerófilos, precipitou óxido de ferro, que afundou no assoalho oceânico formando uma camada rica em ferro. Quando a formação de óxido de ferro foi impedida devido a redução da quantidade de oxigênio na água do mar, uma camada de sílica e/ou carbonato foi depositada. Com isso, as repetições deste ciclo resultaram em deposições de camadas ricas em ferro e sílica ou carbonatos. Variações na quantidade de ferro na água do mar, devido a mudanças na atividade vulcânica por exemplo, podem também ter levado à ritmicidade das camadas. A deposição das BIFs ocorreu desde o Paleoarqueano até o Neoproterozóico (MINAS JÚNIOR, 2018)

Entre os depósitos brasileiros, cita-se o Quadrilátero Ferrífero (QF)/MG, uma BIF do tipo Lago Superior, uma região tradicional da geologia e da mineração brasileira, que se estende entre as cidades de Belo Horizonte, Itabira, Ouro Preto e Congonhas, e onde ocorrem não só jazidas de ferro (Fe) (itabiritos, mostrado na Figura 4.1), mas também por depósitos de

manganês (Mn), ouro (Au), bauxita e pedras preciosas, como topázio e esmeraldas (ROESER E ROESER, 2010, p. 33); e a maior província mineral do mundo, localizada na Serra dos Carajás, na parte centro-leste do estado do Pará, onde se localiza uma das maiores reservas de minérios de alto teor do mundo, representado pelo Grupo Grão-Pará, formadas pelas intercalações de jaspilitos e minérios de ferro de alto teor (PEREIRA, 2009, p. 22).



Figura 4-1 - Itabirito encontrado no Quadrilátero Ferrífero (ROSIÈRE, CHEMALE JR, 2000, p. 33).

Segundo Vieira *et al.* (2003, p. 98), os minérios brasileiros apresentam estruturas internas muito variadas, devido tanto a sua gênese e às diferentes condições de metamorfismo, tectonismo e intemperismo a que foram sujeitados, porém são em sua maioria do tipo hematítico, com alto teor de ferro e pequenas quantidades de elementos considerados indesejados nos processos siderúrgicos como alumínio, enxofre, fósforo e alguns carbonatos. Policarpo (2012, p. 14) classifica os minérios de ferro de acordo com seu teor de Fe contido em: Ricos, minérios com teores de Ferro (Fe) contido acima dos 60%; médios (50 a 60% de Fe); e pobres, com teores de Fe abaixo de 50%. De acordo com as especificações químicas e granulométricas da indústria siderúrgica, os produtos de minério de ferro são classificados como:

Tabela 4-1 - Produtos de minério de ferro.

Produto de minério de ferro	Especificações
<i>Lump ore</i> (granulados)	64%-65% Fe 4%-5% sílica 6mm-40 mm
<i>Sinter Feed</i> (sinterização)	62%-63% Fe 5%-6% sílica 5 mm -50 mm
<i>Pellet Feed</i> (pelotização)	65%-66% Fe 2%-3% sílica 5 mm -18 mm

Adaptado de Policarpo (2012).

O minério granulado pode ser diretamente utilizado nos altos-fornos e fornos de redução direta para a produção de ferro gusa e ferro esponja, respectivamente. Por outro lado, partículas finas e ultrafinas, como o *sinter feed* e o *pellet feed*, não apresentam aplicações práticas diretas na siderurgia, sendo inadequadas para uso em reatores de redução devido exatamente à baixa granulometria, necessitando ser submetidos a processos de aglomeração, tais como a sinterização, a pelletização e a briquetagem, considerando que essas partículas constituem significativos volumes de reservas (LEÃO, 2021, p. 10). Além destes, Policarpo (2012, p. 16) também cita que além do minério de ferro, as sucatas de ferro e de aço são também matéria-prima para a siderurgia, com utilização nos fornos elétricos a arco.

Os processos de aglomeração são extremamente importantes na indústria minero-metalúrgica, agregando valor aos produtos e visando o aproveitamento comercial das partículas finas que antes eram vistas como resíduos e matérias primas de menor qualidade, mas que com a exaustão e menor disponibilidade da natureza de minérios do tipo granulado e de alto teor desde o início do século XIX se tornou uma necessidade estratégica e econômica (POLICARPO, 2012, p. 16).

O material obtido diretamente da lavra é encaminhado para a etapa de beneficiamento, onde é submetido a uma série de operações, visando adequá-lo química, física e metalurgicamente, de forma a atender às exigências dos processos siderúrgicos subsequentes (LEÃO, 2021, p. 9).

Anteriormente, discutimos as etapas de deslamagem e flotação, nas quais os rejeitos gerados eram destinados a uma barragem. É importante destacar que a geração de lama durante a deslamagem de minérios de ferro é uma preocupação significativa na indústria de mineração de minério de ferro, representando cerca de 20% do minério de ferro extraído (MANNA et al., 2011, p. 60). Atualmente, esses rejeitos são depositados em barragens.

Agora, é relevante abordar a relação entre a indústria de mineração de minério de ferro e a produção de aço. O aço é uma liga essencial composta principalmente de ferro e carbono. Na siderurgia, essa liga é produzida principalmente a partir de minério de ferro, que é misturado com sílica, carvão mineral ou carvão vegetal. O carvão desempenha um papel fundamental na fabricação do aço, atuando tanto como combustível quanto como redutor (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021).

Essa conexão entre a produção de minério de ferro e a fabricação do aço demonstra a importância do gerenciamento de rejeitos e da busca por métodos mais sustentáveis, como mencionado anteriormente. Após as etapas de deslamagem e flotação, os rejeitos gerados em cada etapa eram destinados a uma barragem. A lama gerada durante a deslamagem de minérios de ferro é uma preocupação para a indústria de mineração de minério de ferro já que a geração de lama típica é de cerca de 20% do minério de ferro extraído (MANNA *et al.*, 2011, p. 60) e atualmente é depositada quase em sua totalidade em barragens.

O aço é uma liga de ferro e carbono. Na siderurgia, em sua maioria, usa-se o minério de ferro, misturado com a sílica, e carvão mineral ou carvão vegetal. O carvão exerce duplo papel na fabricação do aço: como combustível ou como redutor (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2021). O processo tradicional de produção do aço consiste em quatro etapas: preparação do minério e ferro e carvão, redução, refino e conformação mecânica. O processo inicia-se na alimentação do alto-forno com o minério de ferro e o carvão, onde são aquecidos a altas temperaturas. Por meio de reações do minério com gases redutores, o oxigênio é removido do ferro. O produto da reação, chamado ferro-gusa, já derretido, sai do alto-forno e é enviado para a etapa de aciaria, na qual é refinado. Dependendo do tipo de aço a ser fabricado, elementos como níquel, cromo ou vanádio podem ser adicionados para conferir propriedades especiais aos aços. Posteriormente, o aço é solidificado e conformado em chapas, vigas, arames, e demais produtos, com ampla aplicação nos mais variados setores (POLICARPO, 2012, p. 13).

Segundo o Instituto Aço Brasil (2021), as usinas siderúrgicas são classificadas segundo seus processos produtivos como integradas, semi-integradas e não integradas. As integradas operam as três fases básicas (redução, refino e laminação) e participam de todo o processo produtivo e produzem aço. As semi-integradas opera as fases de refino e laminação. Estas usinas partem de ferro gusa, ferro esponja ou sucata metálica adquiridas de terceiros para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação. Nas não integradas, operam apenas uma fase do processo: processamento (laminação ou trefilas) ou redução.

Segundo o Instituto Aço Brasil (2010), a produção de aço via rota integrada é atualmente responsável por aproximadamente 75% da produção mundial de aço e consiste basicamente na redução de óxido de ferro a ferro-gusa e posterior refino para reduzir o teor de carbono transformando em aço propriamente dito. A produção via rota semi-integrada é obtida por meio da reciclagem do aço em forno elétrico a arco (EAF) e seus principais

insumos são sucata e eletricidade. A produção de aço via rota semi-integrada depende diretamente da disponibilidade de sucata e esta, por sua vez, está diretamente relacionada ao consumo de aço de cada país. A Figura 4.2 apresenta um fluxograma simplificado dos processos de produção do aço, tanto nas usinas integradas quanto nas semi-integradas.

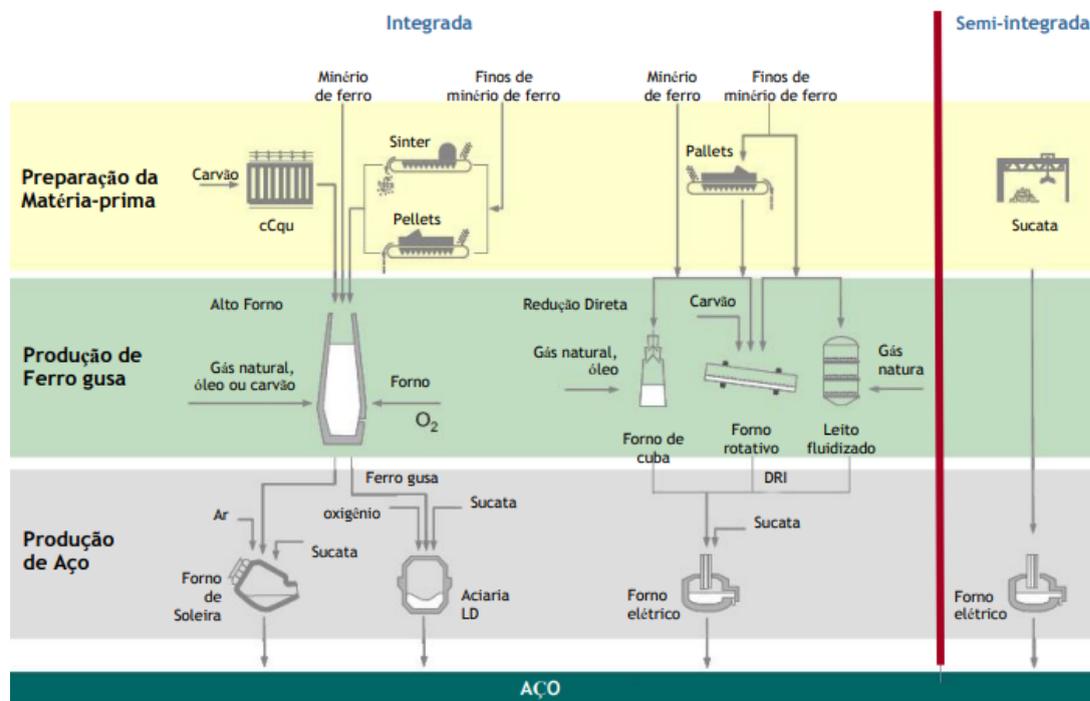


Figura 4-2 - Fluxograma de produção do aço (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010).

Nas etapas de redução do minério de ferro é onde se retira o oxigênio contido no óxido de ferro, através de um agente redutor. Essa remoção ocorre nos altos-fornos a coque ou carvão vegetal ou fornos de redução direta. Nos altos-fornos a coque, ocorre a redução do minério de ferro por meio da gaseificação do coque, que age como agente redutor ao mesmo tempo em que fornece a energia ao processo. Além do ferro gusa, neste processo há também a geração de subprodutos, tais como as escórias (óxidos de cálcio, silício e magnésio) e o gás de alto-forno. Nos Altos-fornos a carvão vegetal, este é o agente redutor em substituição ao carvão mineral, substituindo as coquearias por plantas carvoejamento que usa madeira para a produção de carvão (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010).

O processo de redução do minério de ferro usando carbono na forma de briquetes autorredutores é chamado de redução direta, que ocorre sem a fusão do produto, obtendo-se o chamado "ferro esponja" ou DRI (Direct Reduced Iron) (NARITA, 2015, p. 19). A tecnologia de redução direta consiste na obtenção do ferro metálico sólido, conhecido como ferro esponja ou DRI, a partir do minério de ferro sem sujeitar o minério ou o metal a fusão. A remoção do oxigênio contido no minério de ferro ocorre através de um agente redutor que

pode ser carvão ou gás natural, o que torna sua viabilidade dependente da disponibilidade e preço destes, sem qualquer mudança física de estado ou separação de impurezas químicas (DUTRA, 2019, p. 32)

Nos fornos de redução direta, o mecanismo de redução é a autorredução. No caso do minério de ferro, há dois mecanismos, uma reação sólido-sólido, com velocidade baixa, em que uma mistura de minério de ferro e carbono sólido é aquecido acima da temperatura mínima de redução, e a reação gás-sólido, através de intermediários gasosos. Os minérios de ferro empregados são basicamente a hematita e a magnetita. O gás de redução é uma mistura de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO), que atua como agente redutor (NARITA, 2015, p. 19).

#### **4.2. Processos de Aglomeração**

A demanda por novas tecnologias de aproveitamento de finos está aumentando devido à diminuição da disponibilidade de minérios granulados de alto teor. Essas tecnologias visam desenvolver novas matérias-primas e métodos para recuperar as frações mais finas resultantes do processamento de minérios e carvões, reutilizar os resíduos da siderurgia e concentrar as partículas finas encontradas nos rejeitos de mineração. O objetivo é alcançar essa recuperação de forma econômica e ecologicamente sustentável, tornando viáveis essas aplicações. Uma alternativa viável consiste em sua reintrodução no próprio processo de fabricação de ferro e aço, através das técnicas de aglomeração (LEÃO, 2021, p. 2).

A aglomeração desempenha um papel fundamental como técnica de união e ligação de partículas, sendo amplamente utilizada para aglomerar minérios de baixo teor e resíduos mais finos provenientes da indústria siderúrgica. O termo "aglomeração" é comumente empregado para descrever operações aplicadas a materiais de granulometria fina, com o propósito de transformá-los em corpos ou fragmentos coesos. Isso é alcançado por meio da criação de ligações rígidas e da consolidação das partículas, seja por mecanismos físicos ou químicos, conferindo-lhes o tamanho e a forma necessários para sua utilização (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018, p. 653). As aplicações mais comuns dos processos de aglomeração estão ilustradas na Figura 4.3.

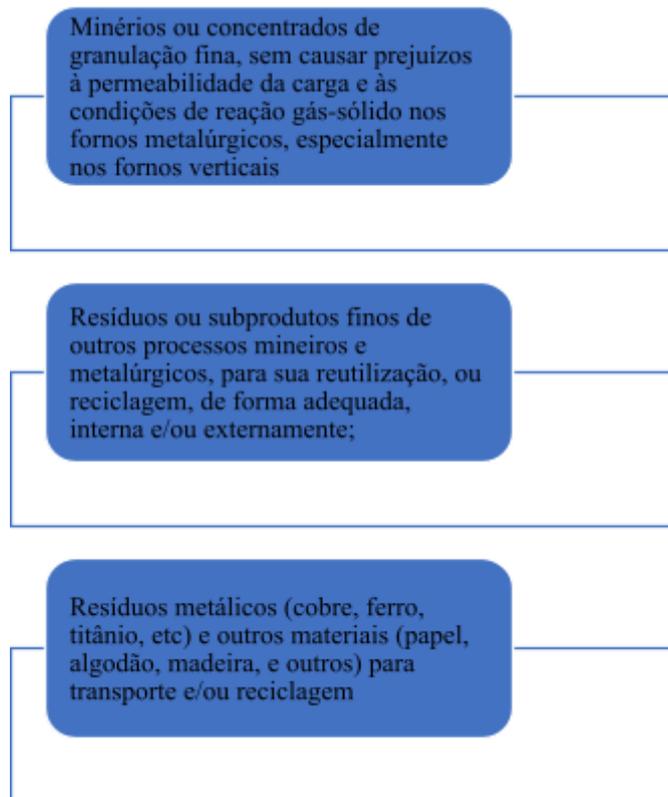


Figura 4-3 - Aplicações frequentes dos processos de aglomeração. Adaptado de (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

Os três principais processos de aglomeração são a sinterização, a pelotização e a briquetagem e a escolha do método ideal deve considerar as características físicas e químicas das matérias-primas, o volume anual de material a ser processado, o investimento, custos operacionais, entre outros parâmetros (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018, p.654). Os produtos dos três processos são apresentados, respectivamente na Figura 4.4.

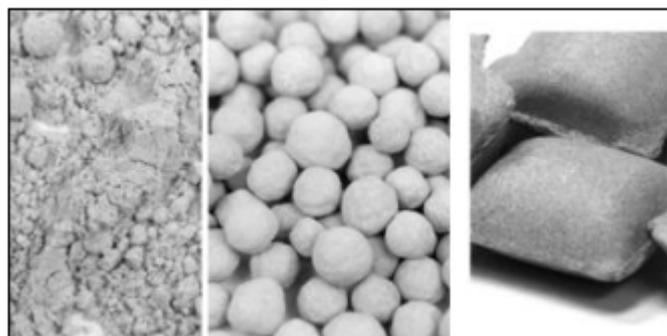


Figura 4-4 – Sínter, pelota e briquete, respectivamente (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018).

#### 4.2.1. Sinterização

O síter é o principal constituinte da carga metálica dos altos-fornos existentes no mundo. O processo de sinterização consiste em misturar finos de minério de ferro, fundentes (calcário, dolomita, serpentinito), combustíveis sólidos (coque, carvão vegetal ou antracito) e água, e sob uma grelha móvel, e expor esta mistura à temperatura da ordem de 1300°C, obtendo por fusão parcial aglomerados maiores denominados sínters (granulometria entre 5 mm e 25 mm), de altíssima qualidade. O síter produzido é britado, peneirado e classificado, e fração grossa é enviada para o alto-forno e a fração fina é reciclada no processo. Como o síter possui um índice de degradação ao manuseio relativamente elevado, ele não é adequado para transportes a longa distância. Entre as características necessárias para o síter cita-se: Alta porosidade e redutibilidade; Alta resistência mecânica à queda e abrasão; Granulometria e composição química controladas; Livre de contaminantes no alto-forno; Baixo custo de fabricação (LEÃO, 2021; POLICARPO, 2012).

Em Policarpo (2012, p. 28), define-se que o mecanismo de sinterização é determinado pelo desenvolvimento de dois fenômenos distintos e independentes: o fenômeno físico de transferência de calor da camada superior para a inferior do leito, proporcionada pela sucção forçada de ar, criando uma frente térmica; e o fenômeno químico de combustão do carbono contido na mistura que, produzindo calor, gera uma frente de reações químicas cuja evolução é função da reatividade e da quantidade de combustível, da umidade e composição química da mistura.

Ainda por Policarpo (2012, p. 27), classifica-se os sínteres em não auto-fundentes – quando é proveniente de minério hematítico ou magnetítico com ganga de sílica e alumina e à qual não se acrescenta nenhuma base (CaO ou MgO); e auto-fundentes, quando o minério pode ser o mesmo do anterior, mas são acrescentadas algumas bases para correção de composição química.

O síter não suporta transporte a grandes distâncias, e por esta razão, as instalações de sinterização são normalmente localizadas próximas do local de utilização do mesmo, ou mesmo nas próprias indústrias, como são os casos das indústrias siderúrgicas chamadas integradas (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018, p. 654).

#### 4.2.2. Pelotização

A pelletização é uma técnica desenvolvida para o aproveitamento de minérios com teores de ferro muito baixos, frequentemente caracterizados por uma granulometria extremamente fina, o que resulta na produção de quantidades significativas de finos, que são partículas menores do que aquelas usadas na sinterização. No processo de pelletização, são produzidas pelotas a partir de minérios finos ou ultrafinos, que geralmente têm dimensões inferiores a 0,15 mm. Esse processo pode ser dividido em três fases principais: preparação da matéria-prima, formação das pelotas cruas e processamento térmico das pelotas (POLICARPO, 2012, p. 33).

Uma mistura de finos de minério de ferro, aditivos, aglomerante, finos de combustíveis sólidos e água passa por um processo de granulação em discos ou tambores, produzindo pelotas com diâmetro entre 8 mm e 18 mm, denominadas pelotas verdes (pelotas cruas), que são em seguida submetidas a um tratamento térmico, realizado em fornos de atmosfera oxidante a temperaturas de até 1350°C, onde são secas, pré-aquecidas, queimadas e resfriadas através de ciclos térmicos pré-determinados, visando à produção de pelotas queimadas (LEÃO, 2021, p. 56). Se a aplicação destinada não exigir resistência mecânica muito elevada, as pelotas passam apenas por um processo de secagem. Quando se faz necessária resistência mecânica mais elevada, para manuseio da pelota, é fundamental a presença de etapa de queima, de modo a tornar as ligações entre as partículas, mais fortes (pelota cozida) (CARVALHO; BRINCK; CAMPOS, 2018, p. 655).

### **4.2.3. Briquetagem**

Em Barros *et al.* (2015, p. 156), define-se briquetagem como a aglomeração de partículas finas através de pressão, auxiliada ou não por aglomerantes, permitindo obtenção de produtos compactados, com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. A redução de volume do material, além dos benefícios tecnológicos, permite que materiais finos possam ser transportados e armazenados de forma mais econômica. Os autores ressaltam que a crescente preocupação ambiental, resultando em leis mais rígidas, além da necessidade de aproveitar economicamente os resíduos e as partículas finas geradas no beneficiamento de minérios fizeram com que a briquetagem voltasse a ser uma importante alternativa para aglomerar valor econômico.

Segundo CARVALHO; BRINCK; CAMPOS (2018, p. 156), os parâmetros mais importantes na confecção de briquetes são a umidade da mistura e a escolha do ligante. A

adição de água só não é realizada quando a substância aglomerante (o ligante) se apresenta na forma de solução aquosa ou como um fluido. As formas dos briquetes são obtidas em função do formato dos moldes ou matrizes, e podem utilizar aglomerantes como piche, alcatrão, bentonita, cimento, entre outros. Há dois tipos de briquetadeiras, extrusoras e de rolos, sendo esta última mais utilizada na indústria siderúrgica (NARITA, 2015, p. 21). A Figura 4.5 apresenta um fluxograma da produção de briquetes em uma briquetadeira de rolos.

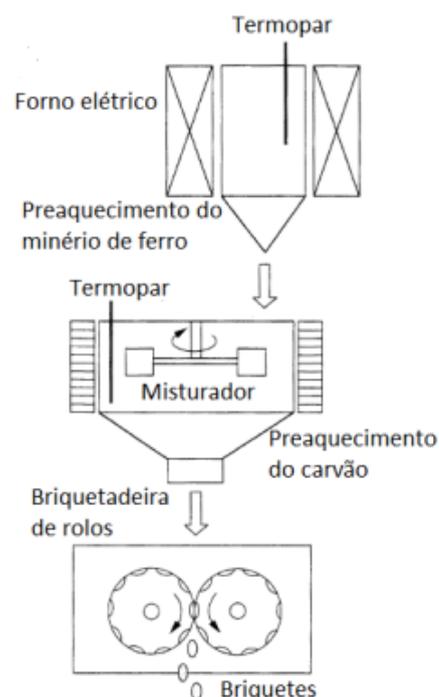


Figura 4-5 - Fluxograma de Processo de Briquetes (OLIVEIRA, 2019)

Segundo LEÃO (2021, p. 62), na produção de minério de ferro, a briquetagem pode ser realizada tanto a quente quanto a frio, dependendo das características do minério e dos objetivos do processo. A briquetagem a frio é mais comum na aglomeração de finos de minério de ferro. Nesse processo, os finos são aglomerados em temperatura ambiente, usando aglomerantes químicos ou mecânicos, sem a necessidade de aquecimento a altas temperaturas para amolecer o material. Por outro lado, a briquetagem a quente pode ser usada em casos específicos, quando há a necessidade de aumentar a resistência mecânica dos briquetes ou quando as propriedades do minério exigem altas temperaturas para a aglomeração. Portanto, embora a briquetagem a quente possa ser aplicada na indústria do minério de ferro em determinadas situações, não é a única técnica usada e não é a abordagem predominante na maioria dos casos. A escolha entre briquetagem a frio ou a quente depende das características específicas do minério e dos objetivos do processo de aglomeração (LEÃO, 2021, p. 62).

O processo pode se dividir em quatro etapas principais, segundo Leão (2021, p. 62): preparação das matérias-primas, mistura e homogeneização, prensagem (compactação) e secagem/cura dos briquetes ou tratamento térmico. A etapa de mistura e homogeneização dos constituintes deve ser realizada de maneira cuidadosa, de forma a obter uma composição uniforme e que a distribuição do aglomerante ocorra homogeneamente em toda a superfície do material briquetado, garantindo a qualidade dos briquetes produzidos e a resistência mecânica requerida aos processos onde serão aplicados. As etapas de secagem e cura, que podem ocorrer à temperatura ambiente, em secadores ou em fornos a temperaturas mais elevadas, têm por finalidade remover a umidade inserida no processo de mistura e permitir a cura do aglomerante, aumentando, assim, a resistência mecânica dos briquetes.

Segundo Leão (2021, p. 3), os requisitos esperados quando esses aglomerados são carregados nos altos fornos são tais: menos processos de sinterização e coqueificação, o que leva a uma redução do consumo de energia e da carga ambiental; maiores taxas de redução no forno, ou seja, catalisador da reação (finos de minério de ferro e materiais carbonosos são misturados nos aglomerados e espera-se uma rápida reação de redução do óxido de ferro); e o uso de uma maior variedade de matérias-primas, promovendo uma reciclagem de recursos. Acrescenta-se as condições: aumento da marcha e produtividade; fornecer resistência mecânica para suportar a carga do alto-forno; e manter as características em altas temperaturas.

O processo de auto redução em altos-fornos da indústria é mostrado na Figura 4.6.

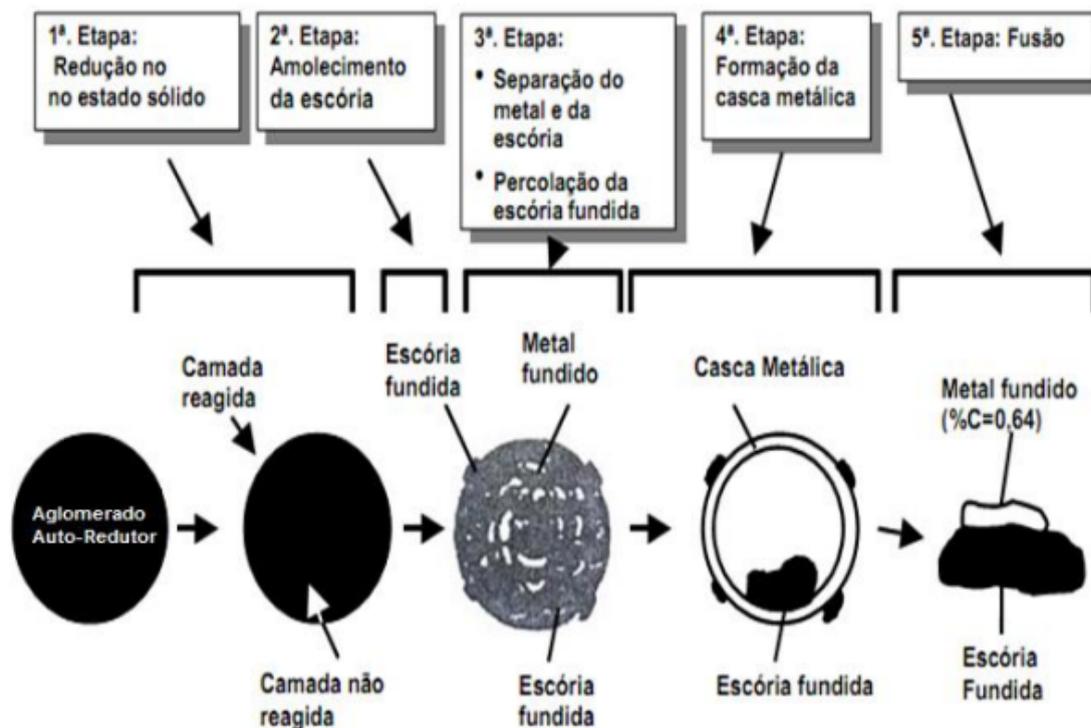


Figura 4-6 – Processo de auto redução do briquete (BAPTISTA, 2016)

Entre as vantagens em relação a pelotização, ressalta-se principalmente que os briquetes apresentam maior resistência mecânica do produto final, e também o maior controle no tamanho e formato (NARITA, 2015, p. 20). Além de reduzir o consumo de combustível, o uso de briquetes possibilita a reciclagem de resíduos gerados no processo em si, que exibe um teor considerável de ferro e pouco ou nenhum emprego alternativo (VALE, 2021). A Figura 4.7. mostra uma pilha de briquetes no pátio da empresa Vale.



Figura 4-7 - Pilha de briquetes (VALE, 2021)

#### 4.3. Contexto do mercado e redução de emissões de GEEs

Com o aumento da cobrança e das novas regulamentações de redução de gases de efeito estufa, tem-se impulsionado a transformação no setor minero-metalúrgico, porém há diversos desafios devido as características intrínsecas à infraestrutura do setor, conhecida por sua inércia e lentidão na adoção de novas tecnologias (IEA, 2021, p.46).

Até 2050, a projeção para a demanda global de aço é de um aumento de mais de 30%, e sem as medidas de restrição, a previsão é que as emissões de CO<sub>2</sub> continuem crescendo a 2,7 Gt CO<sub>2</sub>/ano, 7% a mais que hoje. O setor minero-metalúrgico é de uso energético altamente intensivo, assim como um grande produtor de emissões, sendo responsável por 8% do uso de energia final global e 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub> relacionadas com a energia direta (incluindo emissões de processos industriais). O setor é o maior consumidor industrial de carvão mineral, que supre 75% da demanda energética do setor. Além das emissões de GEEs, a indústria também é responsável por diversos impactos ao solo, a água, às florestas (IEA, 2021, p. 11).

O investimento em reformas da infraestrutura recente é um dos desafios listados pelo IEA (2021). As instalações de usinas siderúrgicas têm longa vida útil, normalmente com ciclos de investimento de 25 anos e vida média típica de 40 anos. Como tal, a capacidade construída nas últimas 2-3 décadas já pode implicar emissões consideráveis para o setor a médio prazo. A idade média da capacidade de fabricação de ferro é de apenas 13 anos no mundo todo. Envolver uma variedade de estratégias para lidar com o estoque existente de ativos do setor será fundamental para colocar a indústria em um caminho de emissões mais sustentável (IEA, 2021, p. 13).

A intensidade energética da produção é fortemente influenciada pelas proporções de sucata e minério de ferro usadas, com produção primária sendo cerca de oito vezes mais intensiva em energia do que a baseada apenas na sucata. Outros fatores, apontados pelo IEA (2021, p. 12), como a qualidade de minério de ferro, também afetam a intensidade energética. O domínio global da rota de produção primária, que depende principalmente de insumos de minério de ferro - responsáveis por cerca de 80% da produção - significa que o setor é altamente dependente de combustíveis fósseis (IEA, 2021, p. 12).

A qualidade das matérias-primas é um fator que desempenha um papel central na eficiência geral do processo de fabricação de aço. Além disso, maior teor de ferro nos minérios, mais simples o beneficiamento na mina, ou maior grau de aglomeração antes de sua introdução no forno pode reduzir a energia necessária para a redução do minério de ferro e melhorar a intensidade energética geral do processo de produção de aço bruto (IEA, 2021, p. 12).

A Figura 4.8 apresenta um infográfico sobre os desafios do setor na transformação tecnológica. Um deles é o alto investimento necessário, uma vez que é necessário reformar as plantas já existentes e reduzir as incertezas relacionadas ao sucesso tecnológico (que aumentam o risco de investimento). Como parte da tecnologia envolvida na utilização de combustíveis renováveis como o hidrogênio ainda precisa ser desenvolvida, os custos de redutores “mais verdes” são mais elevados que os custos do tradicional carvão, o que acarreta outra barreira na adoção dos mesmos. O desafio é encontrar tecnologias e alternativas que barateiem a utilização destes combustíveis. O terceiro desafio é a queda na oferta de minérios de alta qualidade, com bom teor de ferro, o que acarreta processos de beneficiamento mais complexos, causando um aumento no custo de redutores (VALE, 2021, p. 5).



Figura 4-8 - Desafios do setor mineiro-metalúrgico na descarbonização (VALE, 2021).

Na Figura 4.9 vê-se que nas projeções do IEA, o crescimento da pressão regulatória irá aumentar nos próximos anos, e ocorrerá um salto após o fim das datas estipuladas pelo acordo de Paris e a instalação de novas plantas DRIs (*direct reduction iron*, em português, ferro de redução direta). A curto prazo, o maior papel na mudança do setor será desempenhado por tecnologias de melhorias de desempenho dentro de rotas convencionais e redução da demanda através da eficiência do material, estratégias que juntas responderão por 90% das reduções das emissões do setor em 2030, em um Cenário de Desenvolvimento Sustentável. De médio a longo termo, tecnologias CCUS (*Carbon capture, use and storage*, em português, captura, utilização e armazenamento de carbono) e mudanças de combustível - do carvão para o gás natural, hidrogênio e bioenergia - desempenham um papel mais importante. Ao examinar as reduções de emissões cumulativamente, no período de 2020-2050, os maiores papéis na mudança serão desempenhados pela eficiência de materiais, tecnologia de melhorias de desempenho e CCUS (VALE, 2021, p. 4)

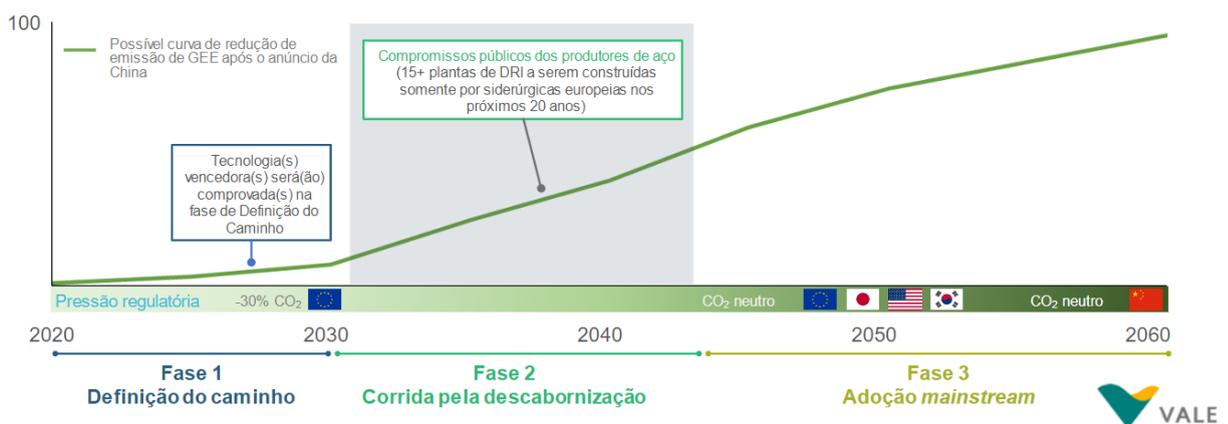


Figura 4-9 - Visão conceitual da redução de emissão de GEE na siderurgia, diante das novas regulamentações (VALE, 2021).

Diante do cenário de transformação do setor, a VALE se destaca pela definição de metas relacionadas a descarbonização de seu portfólio (Figura 4.10). Como parte do propósito de melhorar a vida e transformar o futuro, a empresa definiu a mineração de baixo carbono

como prioridade, com uma agenda transversal a toda cadeia de valor. Para as emissões dos escopos 1 e 2, a meta é uma redução de 33% até 2030, compromisso que está alinhado ao objetivo do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a menos de 2°C (Vale, 2021, p.5).



Figura 4-10 - Metas em relação a mudanças climáticas da Vale para os próximos anos (VALE, 2021).

Para o desafio do escopo 3, se tornaram os primeiros no setor a definir uma meta quantitativa para redução das emissões líquidas desse escopo até 2035 em 15% em relação aos níveis de 2018 (Figura 4.11). Hoje, quase 90% dos produtos de minério de ferro do portfólio da empresa estão aptos a contribuir para a meta, e a alta qualidade deles implica em menor consumo de combustível e menores emissões no processo siderúrgico (VALE, 2021, p. 8).

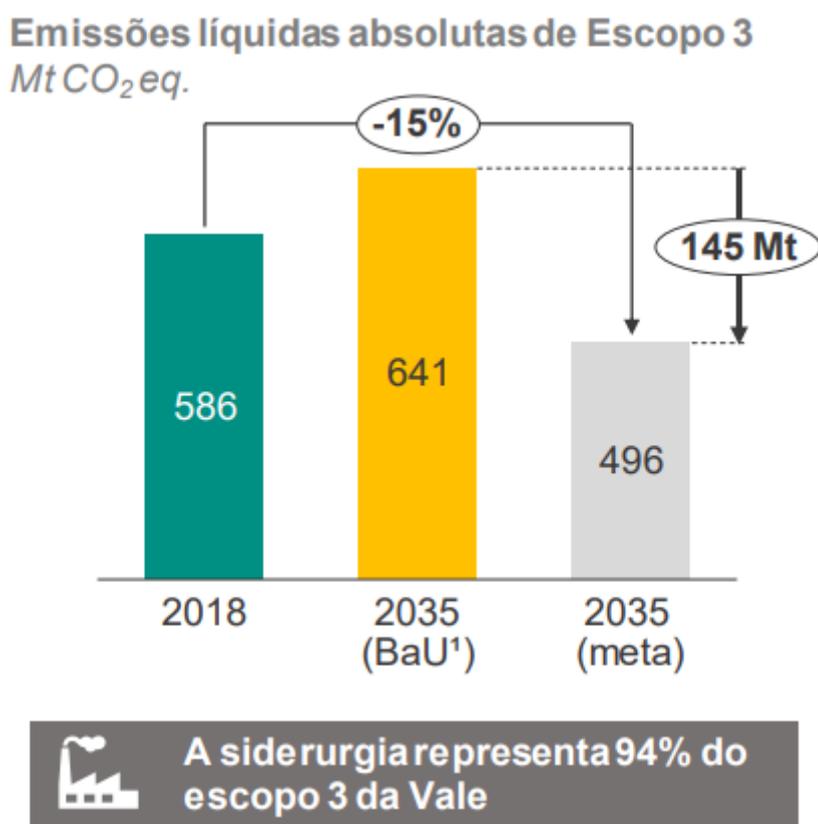


Figura 4-11 - Metas de escopo 3, neutralização das emissões líquidas (VALE, 2021).

Como vantagens competitivas, a empresa aponta três pilares: o portfólio de produtos de alta qualidade, plantas e operações industriais cuja principal fonte energética é renovável (a

empresa é líder em energias renováveis, valor próximo de 90% das instalações) e grandes reservas florestais mantidas pela empresa, tal qual a Floresta Nacional de Carajás, totalizando 1 milhão de hectares de área protegida. Em 2019, a companhia estabeleceu como meta proteger e recuperar 500 mil hectares de floresta nativa até 2030 (VALE, 2021, p. 6).

Na Figura 4.12, para priorizar as iniciativas mais eficientes em termos de custo a serem implantadas, a empresa elaborou uma curva de custo marginal de abatimento (MACC, na sigla em inglês), atualizada anualmente. Os projetos com VPL positivos devem ser implantados a curto prazo, enquanto projetos que dependem de estudos mais aprofundados e parceria para serem competitivos são colocadas metas de longo prazo, como é o caso de alternativas de combustíveis renováveis (VALE, 2021).

### Nível de maturidade

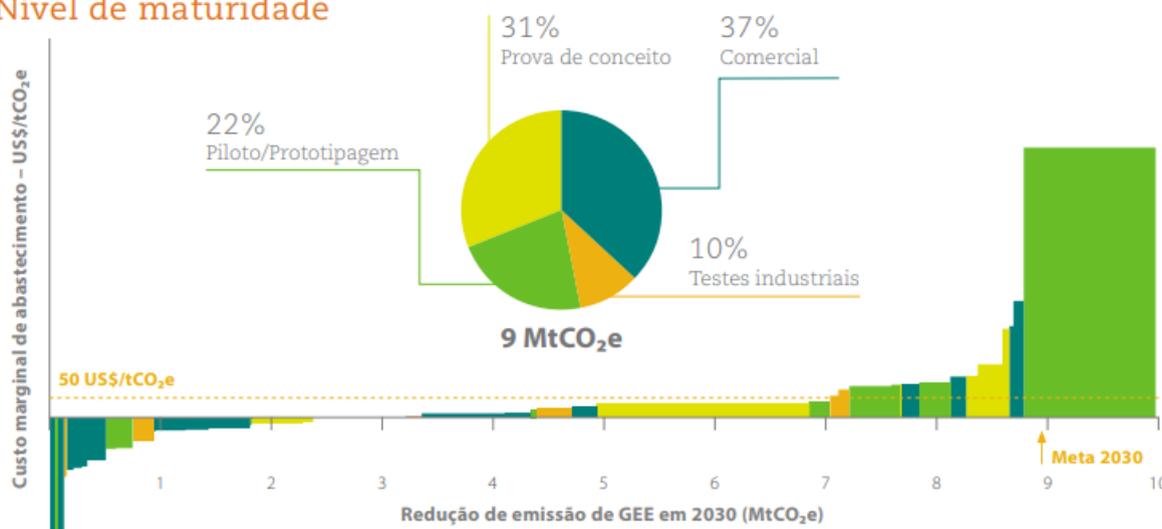


Figura 4-12 – Curva de Custo marginal de abatimento para iniciativas relacionadas a meta de redução de emissões (VALE, 2021).

Em 2021, a mineradora anunciou investimentos de US\$ 4 a 6 bilhões até 2030 para atingir seu compromisso de redução de emissões de Escopos 1 e 2. A empresa tem realizado parcerias com universidades e trabalho para desenvolver e implementar tecnologias inovadoras de baixo carbono, sendo que cerca de 50% das iniciativas comerciais mapeadas já estão na etapa *Front-End Loading* (FEL), e 80% das iniciativas têm VPL positivo, com preço interno (*shadow price*) considerado. Em 2020, seus investimentos em projetos para redução das emissões de GEE somaram US\$ 81 milhões, como é informado no último Relatório de Mudanças Climáticas da empresa (VALE, 2021, p. 8).

No curto prazo, serão priorizadas pela empresa projetos de eficiência energética e a transição para energias renováveis, assim como o aumento da participação da bioenergia como combustível de transição em suas operações. No longo prazo, a aposta é na eletrificação

e tecnologias inovadoras. Entre as tecnologias inovadoras destaca-se o processo patenteado de fabricação de briquetes verdes (VALE, 2021, p. 9)

#### 4.4. Briquete Verde

Ainda há uma lacuna com relação ao uso intensivo de rejeitos da mineração de ferro na produção de briquetes. Embora o conceito de rejeito da mineração e as tecnologias para seu reaproveitamento e reprocessamento sejam muito difundidos atualmente, nota-se uma grande dificuldade em encontrar estudos relacionados à sua utilização em briquetes para uso no processo de redução do ferro em altos-fornos (LEÃO, 2021)

Porém, como vê-se em Baptista (2016), a utilização de resíduos e rejeitos da produção de aço, em sua maioria muito finos, é possível e exequível, trazendo além do benefício da economia de matéria-prima, também possibilita um ganho ambiental, diminuindo os resíduos sólidos e reciclando materiais que seriam descartados, sem uso. A briquetagem é um método de aglomeração viável para a produção de aglomerados a partir de rejeitos, já que corresponde a uma tecnologia aplicada a materiais com várias faixas granulométricas, incluindo partículas de granulometria fina, além de permitir a obtenção de um aglomerado compactado, com resistência suficiente para aplicações em processos siderúrgicos (OLIVEIRA, 2019, p. 17).

Além de ser um material constituído por partículas muito finas, os rejeitos, sob a forma de lama, são compostos, em grande parte, por água, com concentrações de 30% a 50%, em peso, de sólidos, e conseqüentemente, são caracterizados por um elevado teor de umidade, o que dificulta, entre outras operações, o manuseio, o transporte e o carregamento desses materiais. Uma das muitas vantagens da briquetagem é a facilidade de carregamento da carga quando briquetada antes de ser utilizada. Além disso, a secagem desses resíduos é mais uma etapa a ser realizada na preparação e análise das amostras e está relacionada a uma maior necessidade de tecnologia (pode envolver a utilização de fornos com temperatura e atmosfera controladas, secadores intermitentes ou contínuos, etc.), assim como a maiores fatores de custo, mão de obra e tempo. No entanto, conforme Leão (2021), contando que a lama possua uma porcentagem de sólidos adequada, o ajuste da composição química dos briquetes pode ser realizado misturando-se finos de minérios de ferro aos rejeitos, de modo a adequar o teor de ferro total e limitar os elementos indesejáveis.

Os rejeitos, na forma de lama, são compostos principalmente por água, com uma concentração de sólidos de 30% a 50% em peso. Isso resulta em um alto teor de umidade, o que torna complicado o manuseio, transporte e carregamento desses materiais. Uma das

vantagens significativas da briquetagem é que ela facilita o carregamento da carga quando os materiais são transformados em briquetes antes do uso.

No entanto, a secagem desses resíduos representa uma etapa adicional na preparação e análise das amostras, o que requer tecnologia adicional, como fornos controlados em termos de temperatura e atmosfera, secadores intermitentes ou contínuos, entre outros. Isso também está associado a custos adicionais, necessidade de mão de obra e aumento no tempo necessário para o processo. Além disso, é importante observar que, conforme apontado por Leão (2021), quando a lama possui uma porcentagem adequada de sólidos, é possível ajustar a composição química dos briquetes misturando finos de minérios de ferro aos rejeitos. Isso permite adequar o teor de ferro total e limitar a presença de elementos indesejáveis.

Aglomerados de carvão com alto teor de ferro (CIC, *iron coke*, ferro-coque ou ICHB), produzidos pela carbonização dos briquetes, apresentam alta reatividade, o que pode aumentar a eficiência de reação dos altos-fornos, substituindo parte do coque convencional de acordo com o balanço de carbono fixo. Leão (2021) afirma que a utilização desses aglomerados leva a diminuir a taxa de agente redutor e a temperatura da zona de reserva térmica de um alto-forno, satisfazendo tanto a alta reatividade do coque quanto a redução do minério de ferro e como medida eficaz para a produção de ferro em altos-fornos de baixa emissão de carbono.

Em Sommerville (2016), é realizado um estudo sobre a introdução de carvão de fontes sustentáveis de biomassa na composição de briquetes de minério de ferro, para utilização em fornos DRI, que seria uma maneira de se reduzir as emissões de carbono pelo setor.

Em Oliveira (2019), é realizado um estudo sobre o desenvolvimento de briquetes contendo lama e finos de minério de ferro para uso em altos-fornos, comparando as características físicas dos produtos como a densidade aparente e a geração de finos das pastilhas. Foram testadas diferentes misturas de lama e finos de minérios de ferro para a produção de briquetes e avaliada a compactabilidade das misturas, e concluiu-se que todas as misturas estudadas apresentavam boa briquetabilidade, sem problemas operacionais. No estudo demonstrou-se que a temperatura de secagem dos briquetes tem pouca influência na resistência mecânica dos briquetes secos, a qual é mais afetada pela densidade aparente e pela proporção de lama.

Entre os principais parâmetros e variáveis que afetam, direta ou indiretamente, a produção desses aglomerados, segundo Leão (2021), destacam-se a granulometria e proporção dos componentes da mistura briquetada, o tipo de carvão utilizado e suas

propriedades, a pressão usada na compactação dos briquetes, a temperatura de realização da briquetagem, do tratamento térmico e da carbonização e o processo de aglomeração empregado, que pode ser realizado com o uso de aglomerantes ou pela propriedade da plasticidade térmica dos carvões, visando à adesão das partículas e formação de um corpo coeso, para garantir que os briquetes possuam resistência suficiente para suportar seu transporte, carregamento e os processos de redução.

A empresa Vale tem realizado inúmeras pesquisas nas últimas décadas sobre briquetagem de minérios de ferro. Dentre os vários tipos de briquetes estudados, destaca-se o desenvolvimento de um novo produto denominado de “briquete verde”. Trata-se de um tipo de aglomerado de minério de ferro (produzido em baixas temperaturas) a ser empregado como carga ferrífera de reatores industriais de produção de ferro-gusa ou de ferro esponja. É um produto ferrífero inserido na mesma categoria comercial do tradicional sinter e/ou pelota de minério de ferro, cujo processo de fabricação utiliza menos combustíveis fósseis. Entre as vantagens apontadas pela empresa em comparação ao sinter, o processo de fabricação de briquetes verdes possui menos etapas, é um produto mais flexível, com distribuição de tamanho mais homogênea, menor emissão de CO<sub>2</sub>, além de um produto comercial com maior resistência física, baixos índices de crepitação e de inchamento, baixa abrasão e geração de finos e com boas propriedades metalúrgicas (VALE, 2021, p. 11).

O produto é uma evolução dos produtos de minério de ferro oferecidos pela mineradora, que até os anos 60 tinha como produto básico o granulado (*lump ore*) de alto teor de ferro, e com a queda nas reservas dos minérios de alto teor, migrou para a produção de pelotas. O briquete verde começou a ser desenvolvido em 2004 por pesquisadores da Gerência de Tecnologia de Ferrosos da Vale, em Vitória (ES), absorvida em 2008 pelo Centro de Tecnologia de Ferrosos (CTF), em Nova Lima (MG), onde continuaram estudos avançados sobre diferentes tipos de briquetes. Os primeiros testes industriais com o novo produto ocorreram em 2019 em alto-forno a carvão vegetal e em 2020, foram realizados os testes em alto-forno a coque de grande escala, que comprovaram a exequibilidade do produto (IBRAM, 2021).

A produção do “briquete verde” será, inicialmente, realizada nas usinas 1 e 2 de pelletização, na Unidade Tubarão, em Vitória (ES), que estão sendo convertidas para este fim; e no Complexo de Vargem Grande, em Minas Gerais, onde está sendo instalada uma nova planta industrial. A unidade de Vargem Grande possui capacidade de 0.75 Mtpa de capacidade, podendo ser expandida para 1,5 Mtpa e sinergias com a planta de concentração a

seco. Uma planta em Omã também será adaptada para a produção de briquete verde e em parceria com a Ternium, será construída uma planta co-localizada. Além destas, estão em análise mais cinco plantas (VALE, 2021, p. 13).

A capacidade inicial total de produção é de aproximadamente 7 milhões de toneladas por ano e o *start up* das três plantas está previsto para 2023, somando um investimento de US\$ 185 milhões de dólares. A estimativa é de que, no longo prazo, a companhia tenha capacidade para produzir acima de 50 milhões de toneladas por ano do produto, o que levaria a um potencial de redução de emissão superior a 6 milhões de toneladas de carbono equivalente por ano (MtCo<sub>2</sub>e/ano) com uso da tecnologia (IBRAM, 2021). Trata-se de um projeto inédito no universo das empresas mineradoras de ferro em todo mundo.

Uma vez que o briquete verde é um aglomerado fabricado em baixas temperaturas e que dispensa a etapa de queima (caracterizada por altas temperaturas), é possível obter a redução de mais de 10% nas emissões de carbono na rota de processamento industrial, além de proporcionar uma redução no custo em 50% do processo clássico de pelotização de minério de ferro. A Figura 4.13 lista as etapas convencionais dos processos de sinterização e pelotização de minérios de ferro e compara com as etapas de produção do briquete verde (VALE, 2021, p. 11).

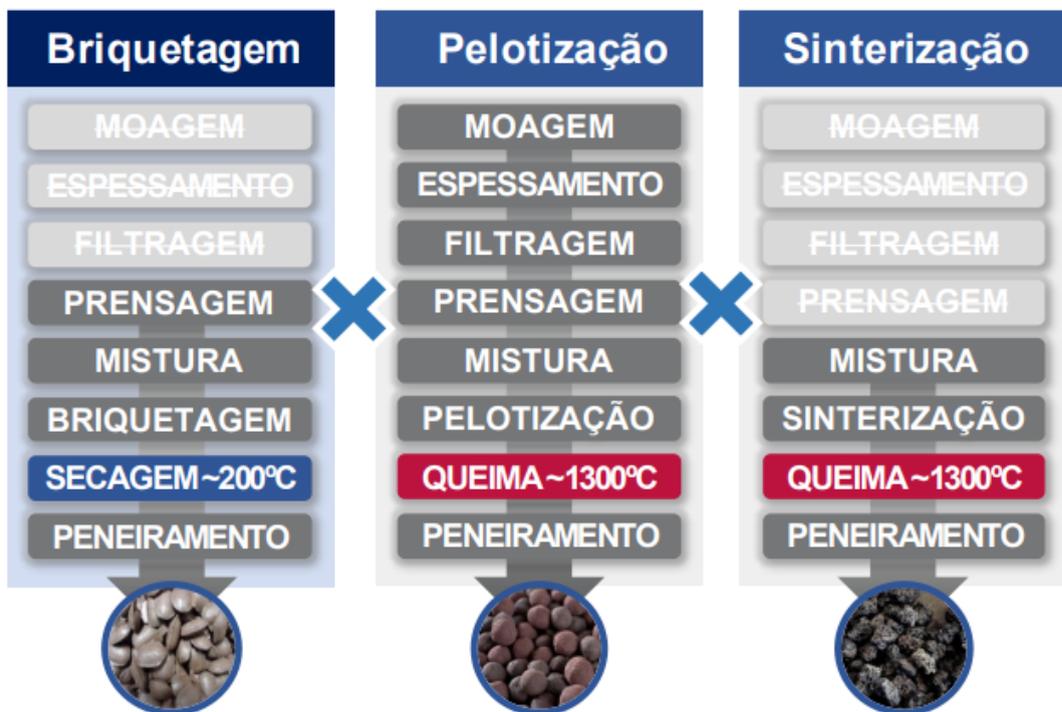


Figura 4-13 - Comparativo entre as etapas dos processos de (VALE, 2021).

Segundo a empresa VALE (2021, p. 12), o material ainda reduz a emissão de particulados e gases de efeito estufa como o dióxido de enxofre e o óxido de nitrogênio, além

de dispensar o uso de água na produção. Um comparativo dos processos tradicional, utilizando a sinterização, e o processo utilizando o briquete verde é apresentado na Figura 4.14.

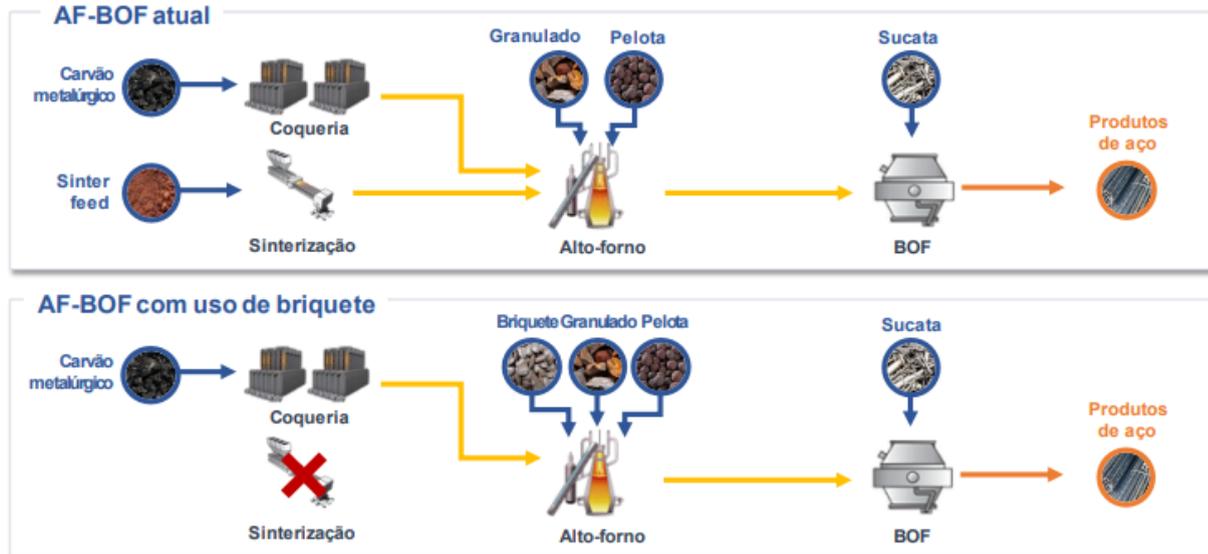


Figura 4-14 - Comparativo entre Rotas de Produção de Aço tradicional e utilizando Briquete Verde (VALE, 2021).

As vantagens obtidas e os benefícios do briquete verde são mostrados na Figura 4.15.

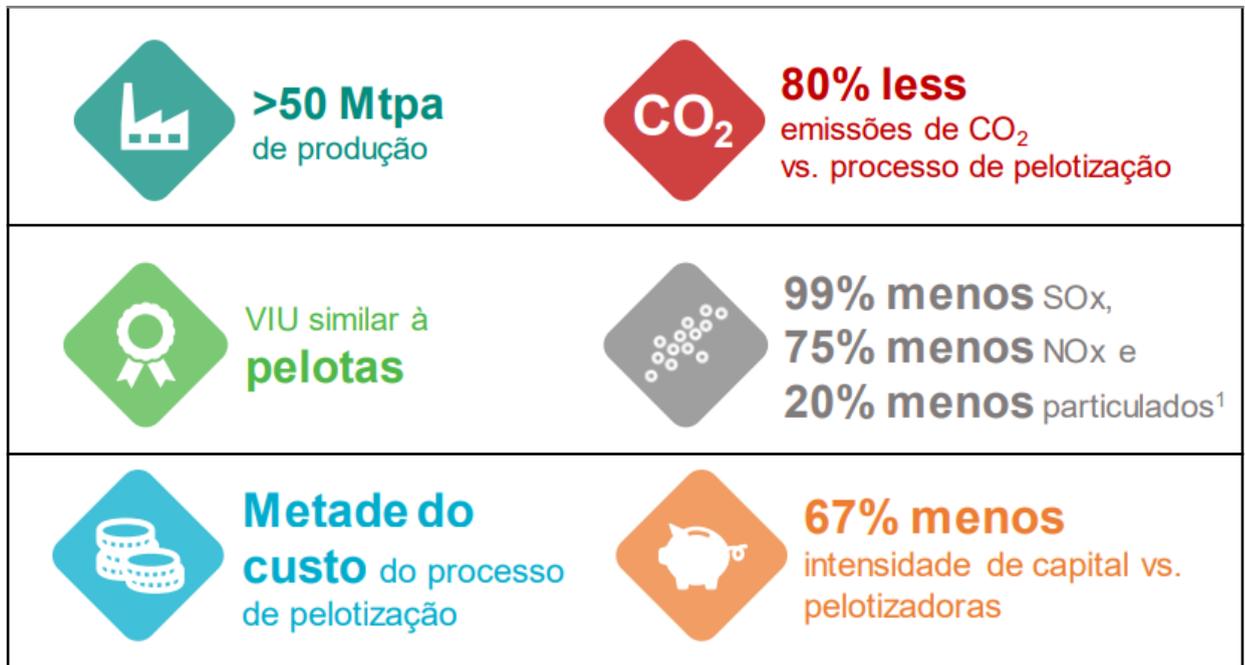




Figura 4-15 - Vantagens e benefícios de briquete verde em relação ao processo de politização tradicional (VALE, 2021).

## 5. ESTUDO DE PRODUÇÃO BRIQUETES DE MINÉRIOS EMPREGANDO SILICATO DE SÓDIO EM ESCALA DE LABORATÓRIO E PILOTO

Em Oliveira (2019, p.18), é proposto o desenvolvimento de um briquete a partir de finos de minério granulado (finos de hematitinha), *pellet feed* e rejeito da deslamagem (lama) para ser usado em altos-fornos. Segundo o autor, o uso da lama na fabricação de briquetes seria uma solução para a sustentabilidade da mineração de minério de ferro, pois parte dos rejeitos deixaria de ser enviada às barragens, melhorando a eficiência do processo de extração como um todo. No entanto, sua utilização representa um desafio uma vez que se trata de um material constituído de partículas muito finas, geralmente, 40% abaixo de 10 micrômetros (OLIVEIRA, 2019, p. 18).

Oliveira (2019, p. 56) define duas rotas de trabalho, a primeira é um estudo da compactabilidade de misturas de lama e minérios usando pastilhas e, a segunda, consiste na produção de briquetes com misturas de lama e minérios aplicando os resultados obtidos na primeira rota do trabalho. Como preparação a essas etapas, é proposto um estudo de caracterização dos cinco materiais a serem utilizados na composição das misturas, de maneira a determinar a composição dos mesmos e a distribuição de tamanho de partículas dos mesmos (OLIVEIRA, 2019, p. 57). Dessa forma, todas as matérias-primas devem ser submetidas a etapas de caracterização, com determinação de suas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas.

Tabela 5-1 - Materiais utilizados na produção de misturas para produção de briquetes.

Matéria-Prima	% Fe	% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O
Rejeito da deslamagem	50,71	11,82	6,31
<i>Pellet feed</i>	65,39	3,01	0,77
Finos <i>Sinter feed</i>	60,80	7,65	2,02
Fino de Hematitinha	59,74	7,63	1,89

Adaptado de Oliveira (2019).

Segundo os resultados desta etapa, os minérios possuem composição química com alta porcentagem de ferro e também baixa quantidade de elementos de ganga como a sílica e alumina, como pode ser observado na Tabela 2, sendo o *pellet feed* a matéria-prima com teor mais elevado de ferro, baixo percentual de elementos de impurezas e baixo percentual de perda por calcinação (PPC). A lama, como esperado, é o insumo com maior proporção de sílica, alumina, fósforo e também apresenta elevado PPC, o que indica a presença de minerais hidratados (goethita e caulinita) em sua constituição (OLIVEIRA, 2019, p. 66).

Além de agirem como um corretor químico, o *pellet feed* e finos de minérios compõem as misturas como um complemento granulométrico. Assim como apontado no trabalho de Leão (2021), em Oliveira (2019, p. 66) aponta como aspecto importante de cada matéria-prima sua distribuição granulométrica, que influencia diretamente na distribuição do tamanho das partículas das misturas de minérios e lama. Como observado na Figura 16, as curvas de cada matéria-prima mostram que há uma diferenciação entre os tamanhos de partículas, mesmo para a lama, onde predominam partículas finas. Esse perfil das curvas garante que as misturas também tenham curvas de distribuição granulométricas com baixa inclinação, evidenciando uma variabilidade no tamanho das partículas, característica desejável na produção dos briquetes. A presença de partículas de diferentes tamanhos favorece uma melhor acomodação entre elas, com os vazios entre as partículas maiores sendo preenchidos com as frações mais finas, razão que justifica que o uso da lama na produção de briquetes seja um fator positivo em se tratando de curvas granulométricas das misturas (OLIVEIRA, 2019, p. 69).

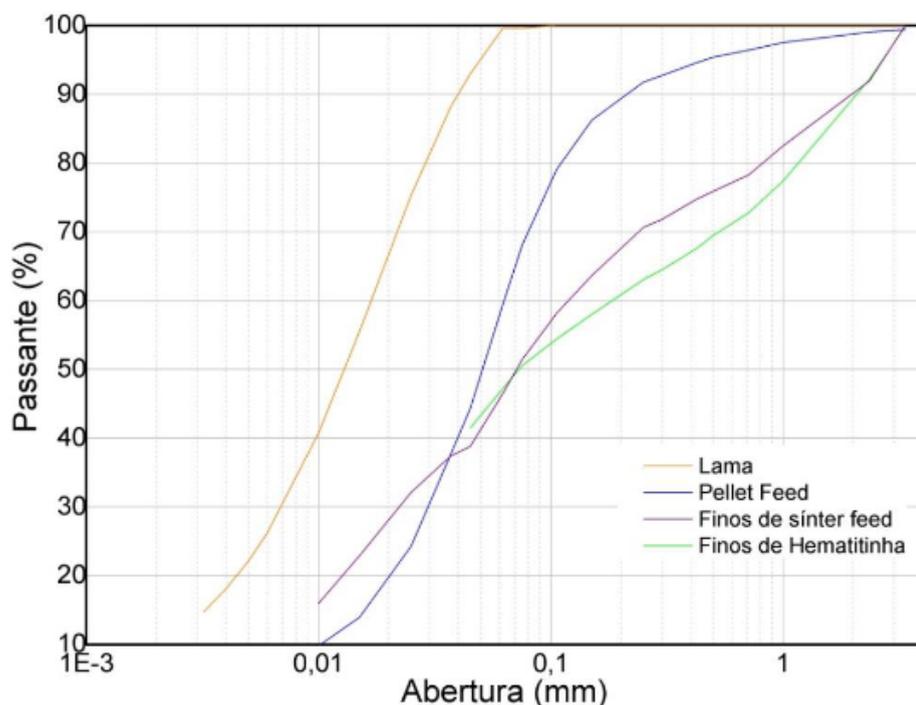


Figura 5-1 - Distribuição granulométrica (OLIVEIRA, 2019, p. 68).

A conclusão desta etapa é que curvas de distribuição granulométrica mais suaves, com menor inclinação e mais amplas são desejáveis, como são apresentadas na Figura 5.1, pois demonstram maior variabilidade de tamanhos na mistura, o que permite a melhor acomodação entre as partículas, aumentando a superfície de contato para criação de pontes de ligação, e facilitando assim a ação do aglomerante, o que resulta em aglomerados mais compactos e

mais resistentes. Tal propriedade é essencial para as etapas de tratamento posteriores as quais o briquete passará.

Em seguida, o autor realiza um estudo de misturas, contendo lama e minério e silicato de sódio como aglomerante. O objetivo é avaliar o comportamento dos aglomerados na presença da lama e também identificar as condições ótimas de produção dos aglomerados, como indicativo da resistência dos briquetes fabricados. Os principais parâmetros usados no mesmo foram densidade, resistência mecânica e compactabilidade, sendo utilizados como metodologia estudos de caracterização de materiais e testes de queda (OLIVEIRA, 2019, p. 68).

A Figura 4.2 apresenta os resultados deste estudo. De maneira geral, pode-se observar resultados parecidos entre as misturas binárias de *Pellet Feed* (PF) e *Sinter Feed* (SF). Quanto a distribuição granulométrica, os blends estudados apresentaram uma boa distribuição de tamanhos, e são compostos majoritariamente por partículas abaixo de 100 $\mu$ m para o PF, e 60  $\mu$ m para o SF. Como já mencionado, a presença de partículas com diferentes tamanhos propicia um melhor empacotamento das mesmas e, em consequência, uma maior densificação do blend quando compactado. Para as misturas ternárias, como há presença de hematitinha, há modificação da curva granulométrica das misturas, trazendo as curvas levemente pra baixo, quando comparadas às curvas das misturas binárias.

Comparando os dados dos testes, observa-se que a pressão de compactação influi diretamente resistência do aglomerado e logo, na geração de finos. Quanto maior a pressão de compactação, maior o contato entre partícula, aglomerante, com redução de espaços vazios, criando estruturas mais compactas e por consequência, mais resistentes. Observa-se que a pressão ótima de compactação é 300 kgf, não sendo observados variações significantes na resistência em valores acima deste.

A densidade é indicativa do grau de empacotamento das partículas, logo, de sua resistência. Tanto para as misturas com PF quanto para as misturas com SF, quanto maior a pressão de compactação, maior a densidade do blend, e assim, maior a resistência do aglomerado. A Figura 5.2 mostra que para misturas binárias e terciárias, quanto maior a densidade, menor a geração de finos, mostrando maior resistência. As densidades das pastilhas de todas as formulações possuem valores ideais em torno de 3 g/cm<sup>3</sup> e esta propriedade está diretamente relacionada à resistência do aglomerado e geração de finos (OLIVEIRA, 2019, p. 82).

A umidade das misturas tem tendência a proporcionar maior força coesiva ao blend, porém observa-se para todas as formulações, que quando aumenta a umidade da mistura, a quantidade de finos gerados no teste de queda também aumenta. A explicação é que para valores elevados de umidade, ocorre maior expulsão de água e silicato de sódio durante a compactação, resultando em menor porcentagem de silicato no interior da pastilha, o que resulta em menor resistência. A faixa ideal de umidade está entre 7,5% e 8,5% (OLIVEIRA, 2019, p. 75).

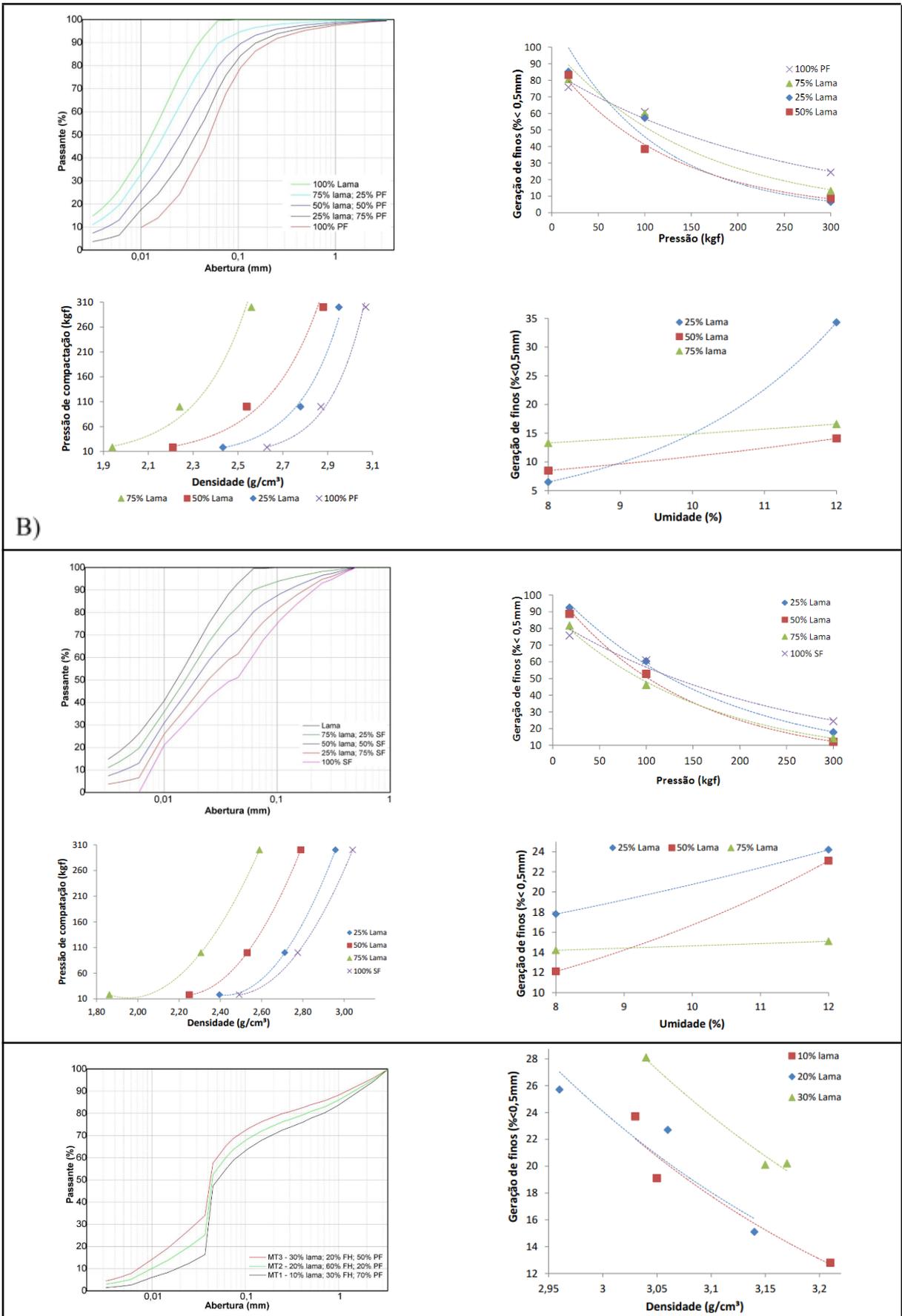


Figura 5-2 – Estudo da compactabilidade de misturas de lama e minérios usando pastilhas. A) Misturas binárias *pellet feed* e lama; B) Mistura binária *sinter feed* e lama; C) Mistura ternárias de lama, finos de hematitinha e *pellet feed*. Adaptado de Oliveira (2019).

Verificou-se ainda que as binárias com lama e pellet feed, com até 25% de lama, apresentaram os melhores resultados nos testes de queda, apresentando menor geração de finos. Pastilhas com lama e finos de sinter feed ou a partir de blend ternários apresentaram alto nível de fragmentação ao final do teste de queda quando comparadas às pastilhas com 100% de pellet feed. Pastilhas com elevada porcentagem de lama (maior de 25%) se mostraram frágeis e com baixa resistência a queda, apresentando elevada geração de finos após o teste de queda. Estes resultados indicam que a presença de lama em altas porcentagens afeta negativamente a resistência das pastilhas (OLIVEIRA, 2019, p.104). Por estas razões, limitou-se a porcentagem de lama na produção de briquetes em até 30%.

Para a produção de briquetes, o pesquisador optou pelo formato travesseiro, que favorece o processo de compactação e a saída dos briquetes dos rolos, tornando possível a obtenção de briquetes íntegros. Outro ponto favorável é a uniformidade, uma vez que os espaços criados entre os briquetes quando no forno, favorecem a permeabilidade do leito (OLIVEIRA, 2019, p. 92).

Foram selecionadas cinco diferentes formulações dentre os três tipos de misturas avaliadas nos testes de caracterização, sendo duas misturas binárias, duas misturas ternárias e uma formulação contendo 100% de pellet feed que serviu como referência. As misturas de lama e minérios de ferro nas formulações estudadas apresentaram briquetabilidade satisfatória, sendo possível produzir briquetes sem defeitos e sem problemas operacionais no processo de briquetagem. Os fatores determinantes nesta escolha vieram dos resultados do estudo de compactabilidade de cada mistura (OLIVEIRA, 2019, p.93). A Figura 5.3 traz a composição das misturas selecionadas para os testes de briquetagem.

Briquete	% Lama	% Pellet feed	% Finos hematitinha	IT %>6,3mm	IA %<0,5mm	IR %	RDI %<2,8mm	Inchamento %
BR1	25	75	-	22,1	64,2	50,2	63,2	8,2
BR2	25	-	75	13,7	56,7	53,3	61,3	8,7
BR3	10	20	70	11,1	56,7	69,5	70,6	12,3
BR4	30	20	50	25,8	54,9	71,7	43,0	4,6
BR5	-	100	-	88,3	0,7	-	-	-

Figura 5-3 -Resultados dos ensaios de caracterização física e metalúrgica (OLIVEIRA, 2019, p. 93).

Foram produzidos então briquetes adotando como condições ótimas as observadas nos testes com as pastilhas, sendo umidade de 8% e pressão máxima de compactação de 300 kgf na prensa de rolos, seguido de processo de secagem em mufla a 550°C. Após a fabricação,

estes foram submetidos a uma série de ensaios de modo a acessar suas características de resistência e propriedades metalúrgicas.

O primeiro resultado observado é que todos os briquetes produzidos apresentaram baixo índice de inchamento, com valores abaixo de 20%, sem desenvolver trincas, o que indica que não são susceptíveis à geração de finos em decorrência de expansão de volume. No teste de redutibilidade, mostrou que os briquetes apresentaram valores semelhantes a pelotas de alta performance e outros produtos empregados em altos-fornos, principalmente os briquetes constituídos de lama, *pellet feed* e finos de hematitinha, observando que presença de lama não afeta significativamente a característica. Resumidamente, briquetes de misturas ternárias apresentaram alta redutibilidade, enquanto que os briquetes de misturas binárias menor redutibilidade, mas ainda em faixa aceitável.

Os briquetes contendo lama apresentaram elevados valores de degradação sob redução para todas as formulações, chegando a 70% para os briquetes BR3, o que significa que os briquetes não têm resistência quando submetidos às condições de redução, gerando finos, o que prejudica a operação do alto-forno. Além disso, todos os briquetes de formulações com lama apresentaram baixo índice de tamboramento e elevado índice de abrasão, o que mostra que não possuem resistência suficiente para suportar processos de carregamento e manuseio durante operação em alto-forno. Estes resultados se destacam quando comparado à formulação do briquete de controle com 100% de *pellet feed*, que justamente por sua composição apresentou boa resistência mecânica (OLIVEIRA, 2019, p. 96). Possivelmente, os briquetes possuem elevada degradação sob redução por possuírem baixa resistência mecânica nos ensaios de queda, tamboramento e abrasão muito baixa. Além disso, a densidade dos briquetes ficou abaixo do esperado, com média de 2,86g/cm<sup>3</sup>.

Outra explicação para a baixa resistência é a formação de ilhas de partículas finas em matriz de silicato de sódio, estruturas observadas nos ensaios de caracterização com as pastilhas. A presença da lama provoca a formação de bolsões de partículas finas associados à falhas na homogeneização da mistura durante a preparação e a aderência preferencial do silicato de sódio a este tipo de partícula. Essas formações provocam uma acumulação localizada de aglomerante deixando outros pontos na estrutura do aglomerado com baixa concentração, causando a fragilização da estrutura (OLIVEIRA, 2019, p. 98).

Mais uma hipótese para o baixo desempenho dos briquetes é a perda de umidade e das hidroxilas (goethita presente em alta concentração na lama) causado pelo choque térmico pós cura na mufla. Para verificar esta hipótese, testou-se diferentes temperatura para a cura, entre

150 °C a 550 °C observando que a temperatura de secagem influencia em pequenas proporções a qualidade final do briquete contendo lama, mas não o suficiente para justificar a baixa resistência (OLIVEIRA, 2019, p.102).

A conclusão é que para produzir briquetes com lama seria necessária uma maior quantidade de aglomerante ou melhorar a distribuição do silicato na estrutura por meio de uma homogeneização mais eficiente para garantir uma boa resistência aos briquetes (OLIVEIRA, 2019, p.104).

Este trabalho gerou uma patente, a patente verde BR102019009592-0, de um processo de produção de briquetes empregando misturas de rejeitos de barragens e minérios de ferro com silicato de sódio como agente aglomerante, submetidos em seguida a um processo de cura a uma temperatura de 250 °C a 550 °C, por um período de 20 a 40 min (PARREIRA *et al.*, 2019, p. 2). O processo definitivo é apresentado na Figura 5-4.

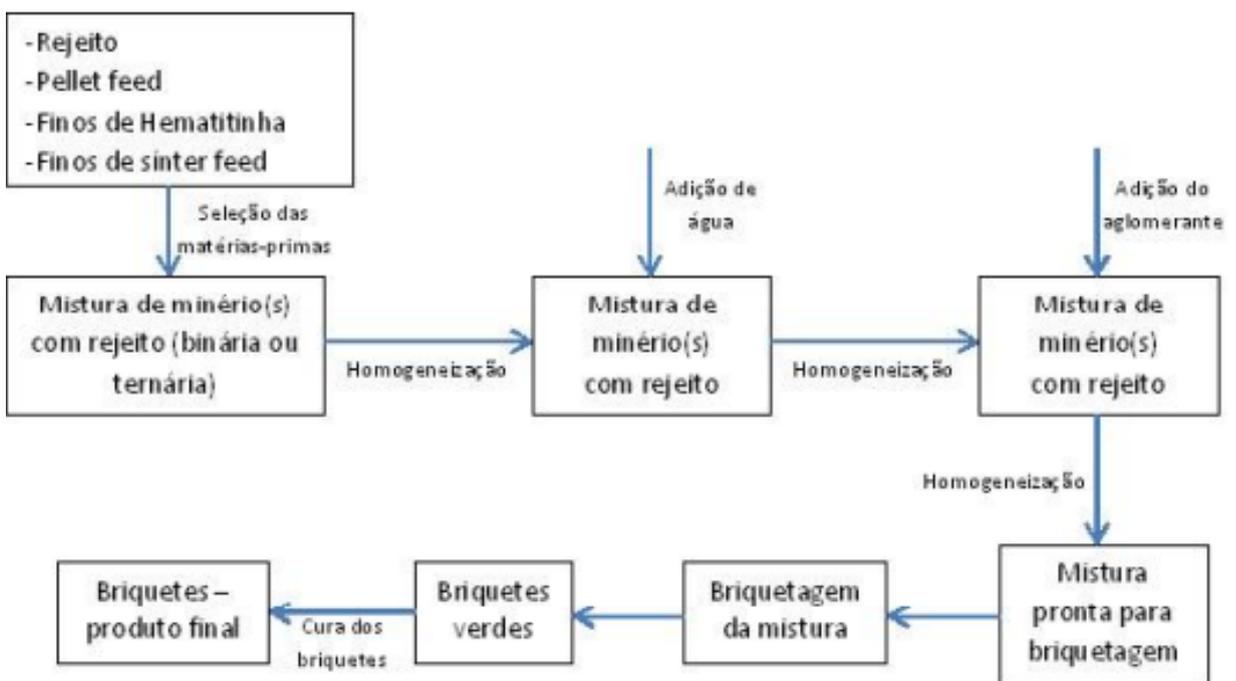


Figura 5-4 - Processo de produção de briquetes com rejeitos com aglomeração a frio (PARREIRA *et al.*, 2019, p. 23).

As etapas do processo patenteado (PARREIRA *et al.*, 2019, p. 22) são:

a) misturar 10-50 % de rejeitos de mineração com minérios de ferro sob a forma de pellet feed, finos de sinter feed com fração abaixo de 0,5 mm e/ou finos de hematitinha com fração abaixo de 3,36 mm, na proporção de até 50%, até completa homogeneização da mistura;

b) ajustar a umidade da mistura para a faixa de 5 a 10% e promover a homogeneização;

c) adicionar de 2% a 5% em peso de silicato de sódio líquido à mistura de rejeito e minério de ferro e promover a homogeneização (solução de silicato de sódio com 36% a 46% de sólidos);

d) realizar a briquetagem do material resultante com pressão de compactação suficiente para obtenção de briquetes com densidade entre 2,5 g/cm<sup>3</sup> a 3,5 g/cm<sup>3</sup>; e

e) submeter os briquetes obtidos a processo de cura a uma temperatura de 250 a 550°C, por um período de 20 a 40 minutos.

Como a própria patente ressalta, é viável a utilização de rejeitos na produção de produtos para o alto-forno.

Uma patente posterior, também de titularidade da empresa VALE S.A. é a patente BR 102019023195-5 B1. O briquete verde da VALE S.A. está inserido no campo das tecnologias minero-metalúrgicas e consiste em um processo para produção de aglomerado de finos de minério de ferro, resistente ao manuseio, transporte e ao contato com água. O processo não necessita de aporte energético para tratamento térmico e permite a obtenção de um produto aglomerado de alto desempenho físico e metalúrgico para substituição de carga metálica, inclusive sinter, em fornos de redução (DUTRA *et al.*, 2019, p.1). O processo de briquete verde é um avanço em relação aos resultados observados nos trabalhos de Oliveira (2019).

A resistência física dos produtos aglomerados de minério é um dos requisitos principais de qualidade para aplicação em reatores metalúrgicos e tem impacto direto sobre a produtividade e os custos do processo. A tecnologia de nanomateriais proporciona possibilidades para aglomeração de finos de minério. Os nanomateriais funcionam como uma rede composta que confere aos produtos aglomerados, entre outras características, alta resistência mecânica.

A patente norte americana US 8,999,032, em nome de Vale S.A., por exemplo, descreve a aplicação de nanotubos de carbono em aglomerados de minério de ferro, níquel e manganês, visando a aumentar sua resistência mecânica. A invenção também se refere a um processo para preparação de aglomerados de minério que compreende a dispersão dos nanotubos de carbono em uma matriz para formar uma mistura, sua pelletização, briquetagem ou extrusão, e a secagem do aglomerado a 150 a 200 °C. A invenção apresentada pelo presente pedido de patente distingue-se do que é revelado no documento anterior, pelo fato de dispensar a etapa de secagem e em função das matérias-primas utilizadas na produção do aglomerado. O documento anterior não utiliza catalisadores e fundentes (DUTRA *et al.*, 2019, p.5).

O processo patenteado pela empresa distingue-se do trabalho de Oliveira (2019) pelo fato de dispensar a etapa de secagem e em função das matérias-primas utilizadas na produção do aglomerado.

Outro objetivo da presente invenção é reduzir o impacto ambiental gerado uma vez que não são utilizados combustíveis fósseis na constituição dos aglomerados. Além disso, a cura realizada em temperatura ambiente dispensa aporte energético e confere ao processo de produção isenção de emissões atmosféricas (particulados, SO<sub>x</sub>, dioxinas, furanos, CO<sub>2</sub>) e outros compostos voláteis.

O processo para produção de aglomerado de finos de minério de ferro para substituição de carga metálica em fornos de redução compreende as seguintes etapas (DUTRA *et al.*, 2019, p. 11):

a) misturar um nanomaterial e um catalisador a silicato de sódio para preparação da mistura aglomerante;

b) misturar 1-5% da mistura aglomerante proveniente da etapa a) com 70-100% de finos de minério de ferro, 0-30% de finos de fundentes e 0-5% de plastificante em misturador intensivo;

c) ajustar a umidade de tal forma a se obter a quantidade de 0-30% em peso de água na mistura;

d) realizar a aglomeração via pelotamento, briquetagem ou extrusão; e) manter os aglomerados à temperatura ambiente por 2-10 dias para cura; em que são empregadas as seguintes dosagens: 0,05 a 2% em peso de nanomaterial em relação ao silicato de sódio; 0,05 a 5% em peso de catalisador em relação ao silicato de sódio.

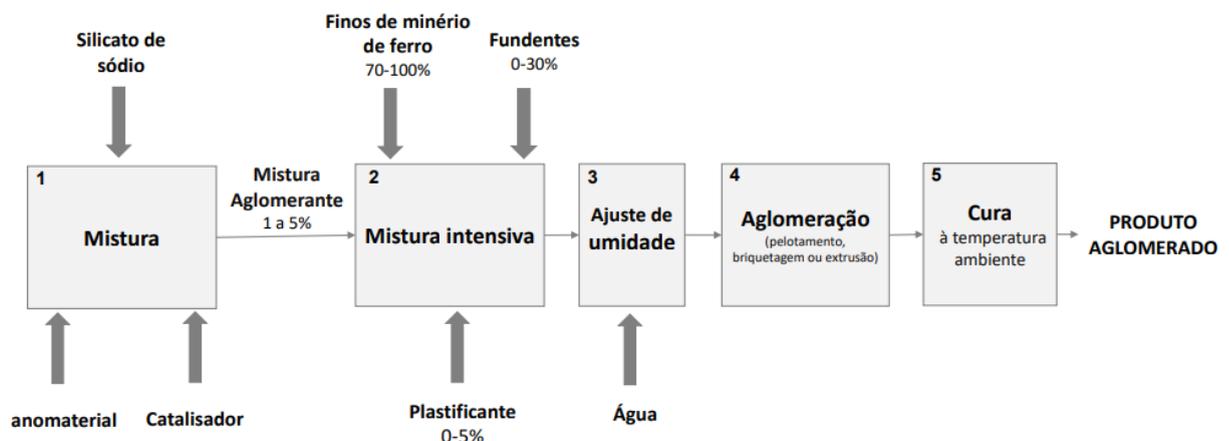


Figura 5-5 - Metodologia de Processo.

O agente plastificante utilizado no processo de produção de aglomerado é selecionado do grupo consistindo de bentonita, amido de milho, amido de mandioca, glicerina e CMC (carboxi metil celulose) (DUTRA *et al.*, 2019, p. 15). O uso de catalisadores para promover o endurecimento do silicato de sódio é eficiente em reduzir o tempo de cura de 15 dias para 2 dias, permitindo assim, o transporte e manuseio do produto em condições chuvosas (intempéries). O catalisador promove a formação de compostos insolúveis e polimerização do silicato de sódio, tornando o produto mais resistente a água em tempo de cura menor.

A cura completa à temperatura ambiente, que ocorre de 2 a 10 dias, permite que a umidade final dos aglomerados seja menor que 3%. Opcionalmente, caso seja necessário que os aglomerados adquiram resistência em menor tempo possível, pode-se optar pela realização da secagem em forno horizontal por 10 a 30 minutos à temperatura de 100 a 550 C. Entretanto, essa opção não é recomendada por não ser considerada uma alternativa ambientalmente sustentável (DUTRA *et al.*, 2019, p. 16).

A Tabela 5-2 apresenta uma comparação da qualidade física do briquete produzido por meio do processo da presente invenção em relação a outros produtos tais como sínter (obtido por meio do tradicional processo de sinterização), pelota (obtida por meio do tradicional processo de pelletização), e granulados comerciais do Brasil e da Austrália.

Tabela 5-2 - Comparativo de parâmetros de qualidade do briquete obtido por meio do processo da presente invenção

	Tambo-ramento	Abrasão	Crepi-tação	RDI	Reduti-bilidade	S	$\Delta P_{max}$	T <sub>200</sub>	$\Delta T$	T <sub>d</sub>	Finos de aderidos
	%>6,3 mm	%<0,5 mm	%>4,75 mm	%<2,8 mm	%	kg*C/cm <sup>2</sup>	mmH <sub>2</sub> O	°C	°C	°C	%
BRIQUETE Vale	85	10	0,1	15	60	30	3000	1150	200	1350	0,5
Sínter Vale	65	NA	NA	25	65	30	3000	1150	200	1350	NA
Pelota Vale	90	6	0	5	60	100	5000	1100	300	1400	NA
Granulado Vale 1	75	18	3	26	66	45	3247	1087	312	1427	2,8
Granulado Vale 2	79	15	2	15	58	41	3440	1104	250	1392	3
Granulado Vale 3	81	15	0,5	32	64	30	2363	1156	296	1457	2,02
Média Granulado VALE	78	16	2	24	63	38	3017	1116	286	1425	3
Granulado AUS 1	85	10	6	26	56	56	4897	1111	282	1406	3,89
Granulado AUS 2	85	8	3	19	70	44	4897	1128	269	1429	0,96
Granulado AUS 3	85	9	4	23	60	34	3676	1146	228	1418	2
Média Granulado AUS	85	9	4	23	62	45	4490	1128	260	1418	2

A Figura 5.6 ilustra um gráfico que apresenta a redução do tempo de cura à temperatura ambiente em função do uso de catalisador.

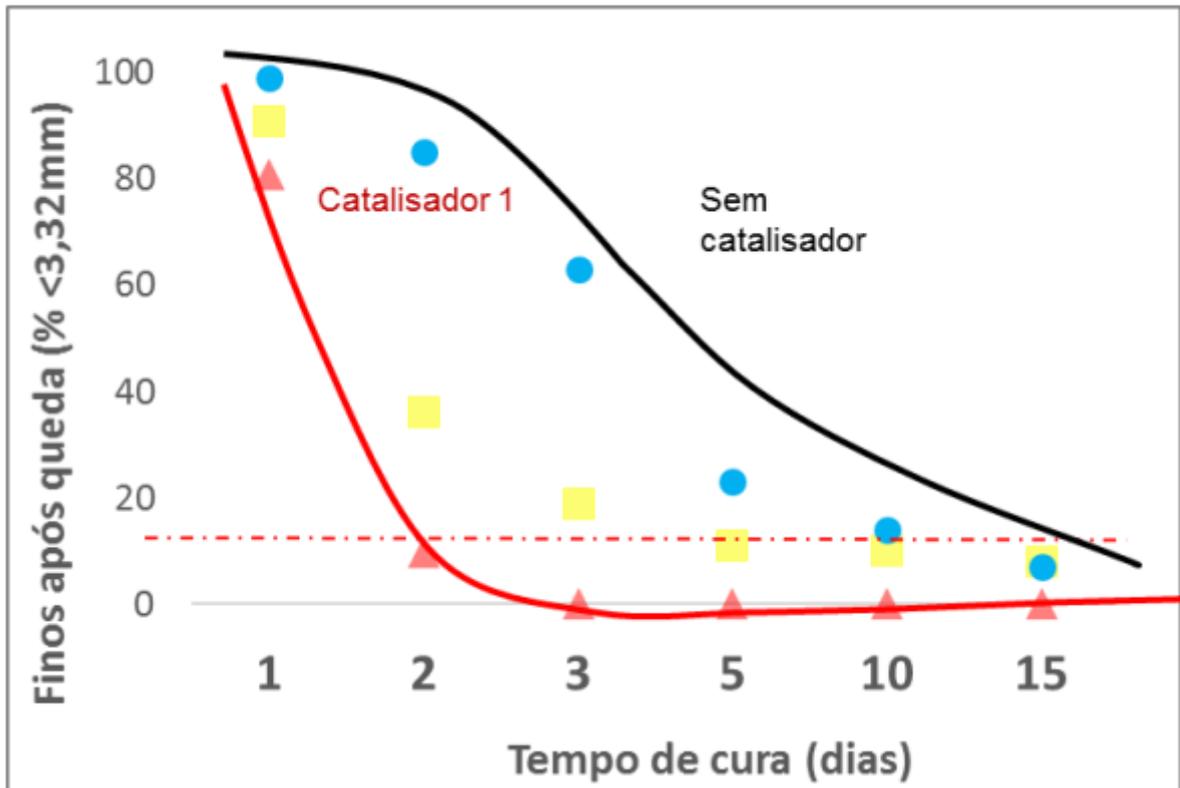


Figura 5-6 - Redução do tempo de cura à temperatura ambiente em função do uso de catalisador.

Assim, é possível comprovar que o briquete produzido por meio do processo da presente invenção possui alto desempenho físico e metalúrgico e, por esse motivo, trata-se de uma alternativa para substituir carga metálica de fornos de redução com menor impacto ambiental.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

As mudanças climáticas tem sido o fator de impulsão à mudança no setor minero-metalúrgico, conhecido por ser um grande produtor de gases de efeito estufa e, recentemente, responsável por tragédias ambientais causadas pelo rompimento de barragens de rejeito. Como foi visto neste trabalho, o caminho para tal é a busca por novas matérias-primas e novos processos de produção, com o melhor aproveitamento dos materiais, visando reduzir os resíduos gerados em seus processos.

Na busca por novos materiais e novas tecnologias, este trabalho objetivou realizar um levantamento bibliográfico sobre briquetes de minério de ferro para uso em reatores industriais de produção de ferro primário, focando principalmente no “briquete verde”, produto patenteado pela VALE S.A. e desenvolvido em parceria com universidades brasileiras. O levantamento demonstrou que é possível viabilizar de maneira técnica e econômica produtos com menos poluentes, com produção mais limpa, tais quais o “briquete verde”.

A Pesquisa mostrou que os briquetes de minério de ferro e carvão podem ser considerados como um novo tipo de matéria-prima para a fabricação de ferro em altos-fornos, apresentando características e propriedades semelhantes ou superiores às das cargas e aglomerados já utilizados tradicionalmente. Os estudos de Leão (2021) mostraram que o uso desses aglomerados nos altos-fornos pode melhorar o desempenho do processo, diminuindo o consumo de energia e de agente redutor, e conseqüentemente, reduzindo o impacto ambiental, com a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, vêm sendo estudados devido à alta velocidade de reação de redução do ferro, permitindo maiores taxas de redução no forno.

Os estudos de briquetagem de aglomerados contendo rejeitos de mineração vieram para preencher uma lacuna nos estudos existentes, provando a viabilidade da tecnologia aplicada a materiais com diferentes faixas granulométricas, incluindo partículas de granulometria fina, além de permitir a obtenção de um aglomerado compactado, com resistência suficiente para aplicações em processos siderúrgicos.

Para os briquetes de minério de ferro e carvão, os principais parâmetros e variáveis que afetam a produção são, principalmente: a granulometria e proporção dos componentes da mistura briquetada; o tipo de carvão utilizado e suas propriedades; a pressão usada na compactação dos briquetes; a temperatura de realização da briquetagem, do tratamento térmico e da carbonização e o processo de aglomeração empregado. Os estudos também

apontaram a utilização de aglomerantes, para a melhor adesão das partículas e formação de corpo coeso, de maneira a garantir que os briquetes possuam resistência suficiente para suportar os processos metalúrgicos.

Para os briquetes com utilização de rejeitos de mineração, a conclusão é que a granulometria das partículas, composição química, presença de elementos deletérios e impurezas, a umidade e dificuldade de transporte, podem ser consideradas como obstáculos a serem superados para sua produção em grande escala. Dentre os parâmetros estudados, cita-se a distribuição granulométrica, que possui influência direta na distribuição de tamanho das partículas das misturas, já que a presença de partículas de diferentes tamanhos favorece uma melhor acomodação entre elas, com os interstícios entre as partículas maiores sendo ocupados pelas frações mais finas. Assim, na produção de briquetes, o uso de rejeitos na forma de lama é fator positivo em relação às curvas granulométricas das misturas, considerando sua alta porcentagem de partículas finas, permitindo a produção de um aglomerado mais compacto, reduzindo os espaços vazios entre as partículas e ampliando a área de contato, resultando em um aglomerado de maior resistência.

Quanto a composição química dos briquetes, o ajuste pode ser realizado misturando-se finos de minérios de ferro aos rejeitos, de modo a adequar o teor de ferro total e limitar os elementos indesejáveis. Em relação a composição e à umidade, um ajuste apontado no levantamento seria uma etapa de secagem dos briquetes.

Outro ponto é o uso de aglomerantes. O estudo das misturas de lama e minérios por meio das pastilhas usando silicato de sódio como aglomerante serviu para investigar as melhores condições de compactibilidade das misturas e identificar como os melhores parâmetros de produção dos briquetes a umidade e densidade aparente.

Nesse sentido, o levantamento bibliográfico mostra que a utilização desses rejeitos no processo de briquetagem pode ser considerada como uma alternativa viável, inovadora e sustentável nas indústrias da mineração e siderurgia, que possa resultar em briquetes com resistência suficiente para aplicações posteriores, além de contribuir para o desenvolvimento de rotas para o uso de rejeitos provenientes da mineração de ferro. Esta nova tecnologia pode ser vista como uma solução cada vez mais sólida e atual para o reaproveitamento de rejeitos, apresentando viabilidade tanto econômica quanto ambiental, considerando que eles podem apresentar relativas concentrações de ferro e diante da necessidade de redução dos passivos e impactos socioambientais gerados pela atividade minerária.

O uso e reprocessamento de rejeitos da mineração de ferro representam um desafio para o setor minero-metalúrgico e o desafio é oportunidade para inovação. Assim, o “briquete verde”, é o resultado de todos os estudos aqui levantados, fruto de um longo processo de pesquisa por uma parceria entre a empresa Vale e universidades, gerando uma patente. As patentes envolvem a criação e transferência de tecnologia, o desenvolvimento científico e econômico, a cooperação universidade-empresa e características como inovação, originalidade, criatividade e inventividade.

Um dos objetivos deste trabalho foi apresentar este novo produto, apresentando uma descrição sobre as características intrínsecas do “briquete verde”, as etapas de fabricação desse produto, as usinas de briquetagem a serem construídas, investimentos a serem realizados, vantagens de sua utilização em processos de redução, e uma análise de impacto ambiental e de mercado.

O briquete verde é um produto ferrífero inserido na mesma categoria comercial do tradicional sinter/pelota de minério de ferro, cujo processo de fabricação utiliza menos combustíveis fósseis. Como vantagens em comparação ao sinter, seu processo de fabricação possui menos etapas, é um produto mais flexível, com distribuição de tamanho mais homogênea, além de maior resistência física, baixos índices de crepitação e de inchamento, baixa abrasão e geração de finos e com boas propriedades metalúrgicas.

Além destes benefícios, uma vez que o briquete verde é um aglomerado fabricado em baixas temperaturas e que dispensa a etapa de queima, diferentemente do observado em Oliveira (2019), é possível obter a redução de mais de 10% nas emissões de carbono na rota de processamento industrial, além de proporcionar uma redução no custo em 50% do processo clássico de pelletização de minério de ferro, sem a utilização de combustíveis fósseis em sua constituição. Além disso, a cura realizada em temperatura ambiente dispensa aporte energético e confere ao processo de produção isenção de emissões atmosféricas (particulados, SO<sub>x</sub>, dioxinas, furanos, CO<sub>2</sub>) e outros compostos voláteis. Desta maneira, o briquete verde promove a redução do impacto ambiental gerado uma vez que não são utilizados combustíveis fósseis na constituição dos aglomerados

Assim, conclui-se que a utilização de rejeitos de minério de ferro e a redução de emissões de gases de efeito estufa são benefícios de um produto viável, que já se encontra no mercado, em escala de produção, cumprindo aos objetivos iniciais deste trabalho.

Para trabalhos futuros, sugere-se um estudo comparativo de diferentes rejeitos de minério e proporções utilizando a tecnologia dos briquetes verdes, adaptando a tecnologia às

diferentes composições encontradas nas barragens atuais. Pode-se propor também uma análise técnico-econômica dos ganhos em produtividade da utilização de briquetes verdes em altos forno, em comparação aos métodos tradicionais. Outra ideia é identificar gargalos na produção em escala dos briquetes verdes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, A. L. B. **Desenvolvimento de um Briquete Auto-Fundente, Multiconstituído de Rejeitos, Resíduos e Descartes Recicláveis Gerados na Planta Integrada de Produção de Aço, Aplicado como Componente da Carga de Fornos de Redução**. 2016. 196 f. Dissertação (Programa de Mestrado Profissional de Materiais). UNIFOA. Centro Universitário de Volta Redonda. 2016.

BARROS, M. R.; SILVA, A. C.; SILVA, E. M. S.; MAGALHÃES, E. N.; MARINHO, D. Y. Briquetagem de finos de calcário. **HOLOS**, Natal, v. 7, s.n., p. 156-163, 2015. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=481547290022>>. Acessado em: 08 nov 2021.

CARVALHO, E. A., BRINCK, V., CAMPOS, A. R. Aglomeração: Briquetagem. *In*: LUZ, A. B.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A (org.). **Tratamento de Minérios**. 6 ed. Brasil: CETEM/MCTIC, 2018. p. 650-674.

DUTRA, P. M. G. C. **Estudos fenomenológicos associados à aplicação de silicato de sódio em aglomeração a frio de finos de minério de ferro**. 2015. 119 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. 2015.

DUTRA F. C.; RESENDE, V. G.; PARREIRA, F. V. **PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AGLOMERADO DE FINOS DE MINÉRIO DE FERRO E O PRODUTO AGLOMERADO**. Titular: VALE S.A. BR 102019023195-5 B1. Depósito: 05 de novembro de 2019. Concessão: 19 de janeiro de 2021.

IBRAM. **Vale anuncia “briquete verde” que pode reduzir em até 10% as emissões de CO2 de clientes siderúrgicos**. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/vale-anuncia-briquete-verde-que-pode-reduzir-em-ate-10-as-emissoes-de-co2-de-clientes-siderurgicos/>>. Acessado em: 08 nov 2021.

IEA. **Iron and Steel Technology Roadmap**. 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>>. Acessado em: 20 dez 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Processo Siderúrgico**. Disponível em: <<https://acobrasil.org.br/site/processo-siderurgico/>>. Acessado em: 08 nov 2021.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: **Relatórios de Referência Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais - Produção De Metais Ferro e Aço**. 2010. Ministério da Ciência e Tecnologia.

LEÃO, P. M. G. C. **Tecnologia da briquetagem de minério de ferro e carvão para uso como carga em altos-fornos e da utilização de rejeitos da mineração de ferro como matéria-prima**. 2021. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.

LEÃO, P. M. G. C.; PARREIRA, F. V.; DUTRA, F. C.; MARANHA, S.; VIEIRA, C. B.; SILVA, G. H. T. A. **Uma revisão sobre a produção de aglomerados de rejeitos da mineração de minério de ferro e carvão coqueificável para uso em reatores de redução**. In: 49º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 7º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro, 2019, São Paulo. Anais, São Paulo: ABM, 2019. p. 126-137.

MANNA, M.; SASMAL, S.; BANERJEE, P. K.; SENGUPTA, D. K. Effect of mineral geology, mineral size and settling time on selective dispersion and separation process for recovering iron value from iron ultra fines. 2011. **Powder Technology**, v. 211, n. 1, p. 60-64, 2011.

MINAS JÚNIOR. **Como se formam as BIFs?** Minas Júnior, 2018. Disponível em: <<https://www.minasjr.com.br/como-se-formaram-as-bifs/>>. Acesso em: 12 nov 2021.

NARITA, C. Y. **Estudo da obtenção de briquetes autorredutores de minério de ferro e carvão fóssil endurecidos por tratamento térmico**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, S. J. **Avaliação de briquetes de misturas de finos de minérios de ferro e rejeito de mineração para uso em altos-fornos**. 2019. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

PARREIRA, F. V.; VIEIRA, C. B.; DUTRA, F. C.; OLIVEIRA, S. J. **PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BRIQUETES DE MINÉRIO DE FERRO COMPREENDENDO**

**REJEITO DE MINERAÇÃO.** Titular: VALE S.A. BR 102019009592-0. Depósito: 10 de maio de 2019. Concessão: 23 de julho de 2019.

PEREIRA, R. M. P. **Geologia da região Sul da Serra Norte e características do minério de ferro do Depósito N8, Província Mineral Carajás.** 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Geologia). Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2009.

POLICARPO, F. F. **Minério de ferro: desafios para as indústrias mineral e siderúrgica.** 2012. 64 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Minerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ROESER, H. M. P; ROESER, P. A. O Quadrilátero Ferrífero-MG, Brasil: Aspectos sobre sua História, seus Recursos Minerais e Problemas Ambientais Relacionados. 2010. **Geonomos**, Brasil, v. 18, n. 1, p. 33 – 37, 2010.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. 2000. **Geonomos**, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000.

SOMERVILLE, M.A. The Strength and Density of Green and Reduced Briquettes Made with Iron Ore and Charcoal. 2016. **Journal of Sustainable Metallurgy**. v. 2, p. 228–238, 2016.

VALE S.A. **Relatório sobre Mudanças Climáticas. 2021.** Disponível em: <<http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/MudancasClimaticas.aspx>>. Acessado em: 15 dez. 2021.

VALE S.A. **Vale ESG Webinar: Climate Change. 2021.** Disponível em: <<http://www.vale.com/esg/pt/Paginas/MudancasClimaticas.aspx>>. Acessado em: 15 dez. 2021.

VALE S.A. 21st Analyst & Investor Tour: **Avançando na descabornização do portfólio.** 2021. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/pt/investors/information-market/presentations-webcast/paginas/default.aspx>>. Acessado em: 15 nov. 2021.

VIEIRA, C. B.; ROSIÈRE, C. A.; PENA, E. Q.; SESHARI, V.; ASSIS, P. S. Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras: uma análise crítica. 2003. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 97-102, abr./jun. 2003.

WWF Brasil. Acordo de Paris completa cinco anos com lições aprendidas. *In: Notícias*.  
Brasil: Taís Meireles, 12 mar. 2020. Disponível em:  
<https://www.wwf.org.br/?77471/Acordo-de-Paris-completa-cinco-anos-com-licoes-aprendidas>  
. Acesso em: 8 nov. 2021.