

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JÚLIA GOMES MARTINIANO PEREIRA

**ANÁLISE DA AÇÃO DA BENTONITA NA PELOTIZAÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO**

JOÃO PESSOA – PB

2024

JÚLIA GOMES MARTINIANO PEREIRA

**ANÁLISE DA AÇÃO DA BENTONITA NA PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE
FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Química do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento aos requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi

João Pessoa – PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P436a Pereira, Julia Gomes Martiniano.

Análise da ação da bentonita na pelotização de
minério de ferro / Julia Gomes Martiniano Pereira. -
João Pessoa, 2024.

39 f. : il.

Orientação: Genaro Zenaide Clericuzi.

TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Pelotização. 2. Bentonita. 3. Minério de ferro.
4. Aglomerante. I. Clericuzi, Genaro Zenaide. II.
Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

JÚLIA GOMES MARTINIANO PEREIRA

**ANÁLISE DA AÇÃO DA BENTONITA NA PELOTIZAÇÃO DE
MINÉRIO DE FERRO**

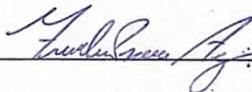
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação de Engenharia
Química do Centro de Tecnologia da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento aos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Aprovada em 11 outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi
Orientador



Prof. Dr. Franklin Pessoa Aguiar
Examinador



Me. Rafael Batista de Aquino
Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que fez com que esse sonho se tornasse realidade, me deu forças, me capacitou e me ajudou a acreditar em mim mesma e hoje conquisto a tão sonhada graduação em Engenharia Química, sem Ele eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Genaro Zenaide Clericuzi, que aceitou esse desafio e me ajudou com todo apoio e dedicação ao longo da elaboração do meu projeto final. Gostaria de deixar meu profundo agradecimento aos professores do departamento de Engenharia Química que contribuíram com conhecimento e vivência.

Agradeço aos meus pais, em especial a minha mãe, Rosilene, que desde o início me apoia e não mede esforços para a realização desse sonho. Obrigada mãe, por cada palavra de incentivo e por acreditar que eu sou capaz de conquistar os meus sonhos, sem o seu apoio eu não estaria aqui. A minha irmã, Anna Luisa, agradeço também por acreditar em mim e por sonhar junto comigo, obrigada por cada abraço e companhia nesse período, por todas as risadas que ajudaram a vencer o cansaço.

Agradeço ao meu namorado, Manoel, que muito me ajudou nesse período final, obrigada por cada noite em claro pesquisando junto a mim, obrigada por ser o ombro que tanto precisei nos momentos de aflição e desespero do curso, foi uma peça fundamental em minha graduação.

Obrigada a todos meus amigos que participaram direta e indiretamente desse processo, todos são muito especiais para mim.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estudar o uso da bentonita no processo de pelotização de minério de ferro, comparando sua eficiência com outros aglomerantes orgânicos que vêm sendo desenvolvidos para essa aplicação. A pelotização é uma técnica amplamente utilizada no Brasil para o aproveitamento de finos de minérios como hematita e itabirito, além de agregar valor ao produto para exportação e melhorar a eficiência na produção de aço. A bentonita, um argilomineral do grupo esmectita, é o aglomerante mais utilizado atualmente, devido à sua capacidade de inchamento e melhoria das propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas. O estudo também aborda a relevância do Brasil no cenário global, sendo o segundo maior produtor e exportador de minério de ferro, com as maiores jazidas de bentonita localizadas no estado da Paraíba. O foco do trabalho é avaliar se a substituição da bentonita por aglomerantes orgânicos é viável, mantendo a qualidade das pelotas e o desempenho no processo de pelotização.

Palavras-chave: Pelotização, bentonita, minério de ferro, aglomerante.

ABSTRACT

This work aims to study the use of bentonite in the iron ore pelletizing process, comparing its efficiency with other organic binders that have been developed for this application. Pelletizing is a technique widely used in Brazil to utilize fines from ores such as hematite and itabirite, in addition to adding value to the product for export and improving steel production efficiency. Bentonite, a clay mineral from the smectite group, is currently the most used binder due to its swelling capacity and its ability to enhance the physical and metallurgical properties of pellets. The study also highlights Brazil's relevance in the global context, being the second-largest producer and exporter of iron ore, with the largest bentonite deposits located in the state of Paraíba. The focus of this work is to evaluate whether the replacement of bentonite with organic binders is feasible while maintaining pellet quality and performance in the pelletizing process.

Keywords: Pelletizing, bentonite, iron ore, binder.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	10
3. REVISÃO LITERÁRIA.....	11
3.1 História da Argila.....	11
3.2 Argila	12
3.3 Argilominerais	14
3.4 Bentonita.....	16
3.5 Pelotização.....	18
3.5.1 Minerais utilizados na pelotização.....	20
3.5.2 Aglomerantes utilizados na pelotização	21
3.5.3 Aditivos utilizados na pelotização	22
3.5.4 Propriedade dos pellets	23
3.5.6 Cenário Internacional	23
4. METODOLOGIA	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1 Impacto de processos alternativos de pelotização na eficiência energética	26
5.1.1 Pelotização a frio	26
5.1.2 Pelotização a quente	27
5.2 Comparação dos aglomerantes.....	32
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	35
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a pelotização é realizada com fins de aproveitar os fins advindos da mineração dos minérios hematíticos, itabiritos e, também, produzir um produto com maior valor agregado para exportação e mais limpo na etapa de produção do aço. As matérias-primas utilizadas estão diretamente ligadas tanto ao processo de pelotização quanto a composição química do produto, materiais ferríferos e os materiais “livres” de ferro, aglomerantes e aditivos. Os aglomerantes e aditivos exercem as funções de facilitar a fabricação das pelotas, de fornecer boa qualidade física e mecânica e a de modificar as propriedades metalúrgicas das pelotas (MEYER, 1980).

Atualmente a bentonita é o aglomerante mais utilizado no processo de pelotização. O termo bentonita designa o argilomineral montmorilonita, logo, este argilomineral faz parte do grupo esmectita. Essa argila apresenta a propriedade de aumentar várias vezes o seu volume inicial na presença de umidade, sendo classificada de bentonita sódica ou cálcica de acordo a capacidade de inchamento. No Brasil, as jazidas de bentonita encontram-se no estado da Paraíba os principais depósitos industriais de bentonita, mais especificamente nos municípios de Boa Vista, Cubati e Pedra Lavrada (SILVA, 2011).

O Brasil é o segundo maior produtor e exportador de minério de ferro do mundo, atrás apenas da Austrália, ofertando para o mercado transoceânico nos últimos 20 anos. A China, o principal consumidor, produz metade do aço bruto mundial, com cerca de 65% da matéria-prima transportada no processo transoceânico em 2013, em segundo lugar o Japão (11%), em terceiro a Europa (10%) seguido da Coreia (6%). As importações são indicadores claros do consumo de minério de ferro e expressam que os países asiáticos fomentam a expansão da indústria internacional do setor. As três maiores produtoras são a Vale no Brasil, e a Rio Tinto e a BHP Billiton, com operações em grande maioria na Austrália. Sendo essas empresas responsáveis por cerca de 74% do comércio marítimo mundial deste insumo (ROCHA, 2020).

Diante da crescente demanda por minério de ferro de alta qualidade e dos desafios ambientais e econômicos atuais, a busca por alternativas à bentonita na pelotização tem se intensificado. A presente revisão bibliográfica tem como objetivo analisar o papel da bentonita nesse processo, compará-la com outros aglomerantes e avaliar a viabilidade de sua substituição, considerando os impactos técnicos, econômicos e ambientais.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Analisar a utilização da bentonita como aglomerante na produção de pelotas de minério de ferro, compará-la com outros aglomerantes e avaliar a viabilidade de sua substituição, considerando os aspectos técnicos e ambientais.

Objetivos Específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo de pelotização e o papel da bentonita como aglomerante.
- Identificar e comparar os principais aglomerantes alternativos à bentonita utilizados na produção de pelotas.
- Avaliar os benefícios e as limitações de cada tipo de aglomerante, considerando aspectos como custo, eficiência, impacto ambiental e disponibilidade.
- Identificar as principais tendências e desafios na busca por novos aglomerantes para a produção de pelotas.

3. REVISÃO LITERÁRIA

3.1 História da Argila

A história da argila no Brasil é marcada por uma evolução contínua que reflete o desenvolvimento cultural, econômico e industrial do país. Com a chegada dos portugueses no século XVI, a exploração da argila ganhou novo impulso, sendo utilizada para a construção de habitações, igrejas e na produção de utensílios decorativos e utilitários. Nesse período, a argila também se tornou essencial na construção civil, especialmente na fabricação de telhas e tijolos. No século XIX e o início do século XX trouxeram a industrialização ao Brasil, impulsionando o uso da argila em novas frentes. A chegada de imigrantes europeus trouxe técnicas avançadas de produção, e indústrias de cerâmica começaram a se estabelecer em estados como São Paulo e Rio de Janeiro (SANTOS, 1992).

O processo acelerado de urbanização e industrialização no século XX aumentou significativamente a demanda por materiais de construção, incluindo produtos de argila. Estados como Santa Catarina, São Paulo, Minas Gerais e Bahia se tornaram grandes centros de produção cerâmica, fazendo do Brasil um dos maiores produtores de cerâmica do mundo. A exploração de argilas de alta pureza, como o caulim, utilizado na indústria de papel, e a bentonita, empregada na perfuração de poços e na indústria de cosméticos, também se intensificou, com o Brasil se destacando como fornecedor global. No final do século XX e início do século XXI, o uso da argila no Brasil se diversificou ainda mais. Além do crescimento contínuo das indústrias tradicionais de cerâmica e construção civil, a argila começou a ser aplicada em novos campos, como nanotecnologia, biotecnologia e cosméticos. A preocupação com a sustentabilidade passou a influenciar o uso da argila, promovendo o desenvolvimento de processos de produção mais ecológicos e de novos materiais à base de argila (SANTOS, 1992).

Figura 1: Desenvolvimento histórico da Indústria Cerâmica.



Fonte: Autor, 2024.

O Brasil possui uma grande variedade de argilas distribuídas por todo o país, cada uma com características específicas que as tornam adequadas para diferentes usos industriais. A abundância dessas reservas permite que o país seja autossuficiente na produção de argilas, atendendo tanto ao mercado interno quanto às exportações. No Nordeste, a Bahia se destaca como um dos maiores produtores de caulim, especialmente utilizado nas indústrias de papel e cerâmica. Além disso, a cidade de Vitória da Conquista é um importante centro de extração de bentonita, usada na indústria de perfuração, cerâmicas e na pelotização de minério de ferro. Na Paraíba, o município de Boa Vista é conhecido pela produção de argilas brancas, fundamentais para a fabricação de porcelana e cerâmicas finas (MENEZES, 2001).

No Sudeste, o estado de São Paulo, particularmente na região de Santa Gertrudes, é um grande centro produtor de argilas plásticas e refratárias, essenciais para a indústria de cerâmica vermelha e revestimentos. Minas Gerais também se destaca, com importantes reservas de caulim, especialmente na região de Poços de Caldas, além de argilas refratárias usadas na produção de cerâmicas e materiais industriais. No Norte, o Pará se destaca como o maior produtor de caulim do Brasil, com grandes depósitos na região de Rio Capim e Ipixuna do Pará, amplamente exportado para os mercados de papel e cerâmica. No Centro-Oeste, Goiás possui reservas de argilas comuns e plásticas, amplamente utilizadas na indústria de cerâmica vermelha e na produção de materiais de construção (JUNIOR, 2012).

3.2 Argila

As argilas fazem parte dos vários tipos de solos e são importantes constituintes da crosta terrestre, podendo ser encontrada em seu estado puro ou conjugada a outros minerais. Estas são formadas por rochas sedimentares, pela alteração dos silicatos de alumínio de origem magmática, metamórfica ou sedimentar. O termo argila não tem significado genético: é usado para os materiais que são o resultado do intemperismo (modificações de caráter físico (degradação) e químico (decomposição) que as rochas sofrem), da ação hidrotérmica ou se depositaram como sedimentos fluviais, marinhos, lacustres ou eólicos (MELLO, 2011; ABREU, 1973; SANTOS, 1989).

O termo “argila” não possui um consenso na literatura científica, sendo difícil sua definição devido à variedade de materiais designados por argilas ou mesmos pelas várias áreas de atuação que a utilizam (químicos, mineralogistas, geólogos, agrônomos). As argilas possuem grande importância nos estudos geológicos, em agricultura, em mecânica dos solos e em diversas

indústrias, como a metalúrgica, a petrolífera, papel e cerâmica. Muitos estudos têm sido realizados sobre a composição, estrutura e propriedades fundamentais dos constituintes das argilas nos últimos cinquenta anos.

As argilas são classificadas como materiais constituídos por partículas extremamente pequenas de um número restrito de minerais conhecidos como argilominerais, um material natural, terroso, de granulação fina, quando hidratada adquire certa plasticidade. Os argilominerais são os minerais constituintes das argilas, geralmente cristalinos formados por silicatos de alumínio hidratados podendo conter outros elementos como magnésio, ferro, cálcio, potássio e outros; são hidrofílicos conferindo propriedade de plasticidade (propriedade de um material úmido sofrer deformação sem romper, ao ser aplicada uma tensão) (MURRAY, 2007; SANTOS, 1989; TEIXEIRANETO, E; TEIXEIRANETO, A, 2009).

Tabela 1 - Tipos de argilas.

TIPO DE ARGILA	SUBTIPOS	REGIÕES DE PRODUÇÃO (ESTADOS)	PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES	PROPRIEDADES RELEVANTES
CAULINITA	Dickita, Nacrita	Bahia, Minas Gerais, Pará	Cerâmica, papel, tintas	Branca, alta pureza, baixa plasticidade
ESMECTITA	Montmorilonita	Rio Grande do Sul, São Paulo	Fundição, perfuração, tratamento de água	Alta capacidade de troca catiônica, plasticidade, inchaço
ILITA	Muscovita	Paraná, Santa Catarina	Cerâmica vermelha, tijolos, telhas	Menor plasticidade, alta temperatura de vitrificação
PALIGORSKITA	-	Rio Grande do Norte	Adsorvente, refratário	Fibrosa, alta área superficial, baixa densidade
SEPIOLITA	-	Rio Grande do Norte	Adsorvente, refratário	Fibrosa, alta área superficial, baixa densidade
HALLOYSITE	-	Amazonas	Catalisador, material compósito	Tubular, alta capacidade de adsorção
VERMICULITA	-	Minas Gerais	Agricultura, construção civil	Expansão térmica, baixa densidade
KAOLIM	-	Bahia, Minas Gerais	Cerâmica, papel, tintas	Branca, alta pureza, baixa plasticidade

ARGILAS BENTONÍICAS	Montmorilonita, Illita	Rio Grande do Sul, São Paulo	Petróleo, alimentos	Alta capacidade de troca catiônica, plasticidade, inchaço
--------------------------------	---------------------------	---------------------------------	------------------------	--

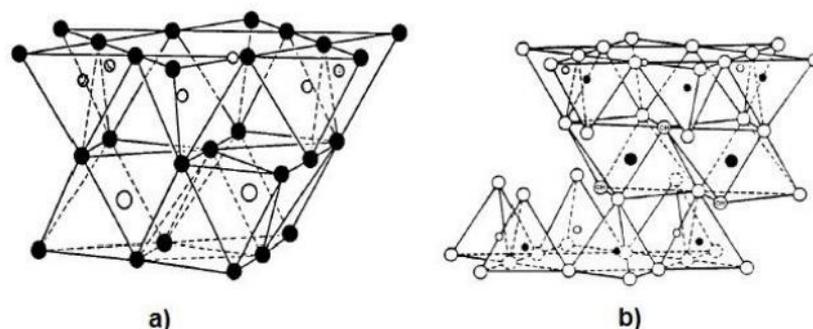
Fonte: Agência Nacional de Mineração (ANM) e Serviço Geológico do Brasil (SGB).

3.3 Argilominerais

Segundo o Comitê Internacional para Estudos de Argilas, os argilominerais cristalinos são silicatos hidratados de rede cristalina em camadas (lamelar) ou de estrutura fibrosa. Os silicatos de estrutura lamelar são divididos em duas famílias: a) que compreendem as camadas 1:1 que se inserem o grupo da caulinita, serpentina; e b) camadas 2:1 que se inserem o grupo das esmectitas, vermiculitas e micas. Os silicatos de estrutura fibrosa 2:1 em que se tem o grupo da atapulgita e sepiolita (SANTOS, 2007; SANTOS, 1989).

As famílias 1:1 e 2:1 são assim definidas devido a sua disposição estrutural das folhas tetraédricas e octaédricas que a compõem. Para a família 1:1 a camada tetraédrica consiste em átomos de silício e oxigênio dispostos em forma de tetraedro. Cada tetraedro compartilha três átomos de oxigênio com os tetraedros vizinhos, formando uma rede tridimensional. A camada octaédrica consiste em alumínio (ou magnésio) e átomos de oxigênio dispostos em forma de octaedro. Os átomos de alumínio (ou magnésio) ocupam o centro do octaedro, rodeados por seis átomos de oxigênio. As camadas tetraédricas e octaédricas são combinadas para formar o bloco de construção básico dos minerais de argila, que é chamado de camada 2:1. A camada 2:1 consiste em uma camada octaédrica entre duas camadas tetraédricas. As camadas são mantidas juntas por forças eletrostáticas fracas, permitindo que as camadas deslizem umas sobre as outras. As camadas também podem absorver e trocar cátions, tornando os minerais de argila importantes na química do solo. (AGUIAR, 2007; CPRM, 2018)

Figura 2: Representação esquemática de um argilomineral a) 1:1 e b) 2:1.



Fonte: AGUIAR et al, 2002.

Existem vários tipos de argilominerais, cada um com uma composição química e estrutura únicas. Os tipos mais comuns de minerais de argila são a caulinita que é um tipo de mineral argiloso 1:1, o que significa que possui uma folha tetraédrica e uma folha octaédrica em sua estrutura, é composto de sílica, alumina e água e possui baixa capacidade de troca catiônica. A caulinita é comumente usada nas indústrias de papel, cerâmica e cosméticos. A esmectita é um tipo de mineral argiloso 2:1, o que significa que possui duas folhas tetraédricas e uma folha octaédrica em sua estrutura. Possui alta capacidade de troca catiônica e pode se expandir quando hidratado. A esmectita é comumente usada em lamas de perfuração, como aglutinante em areias de fundição e na indústria da construção (TERTRE et al., 2013).

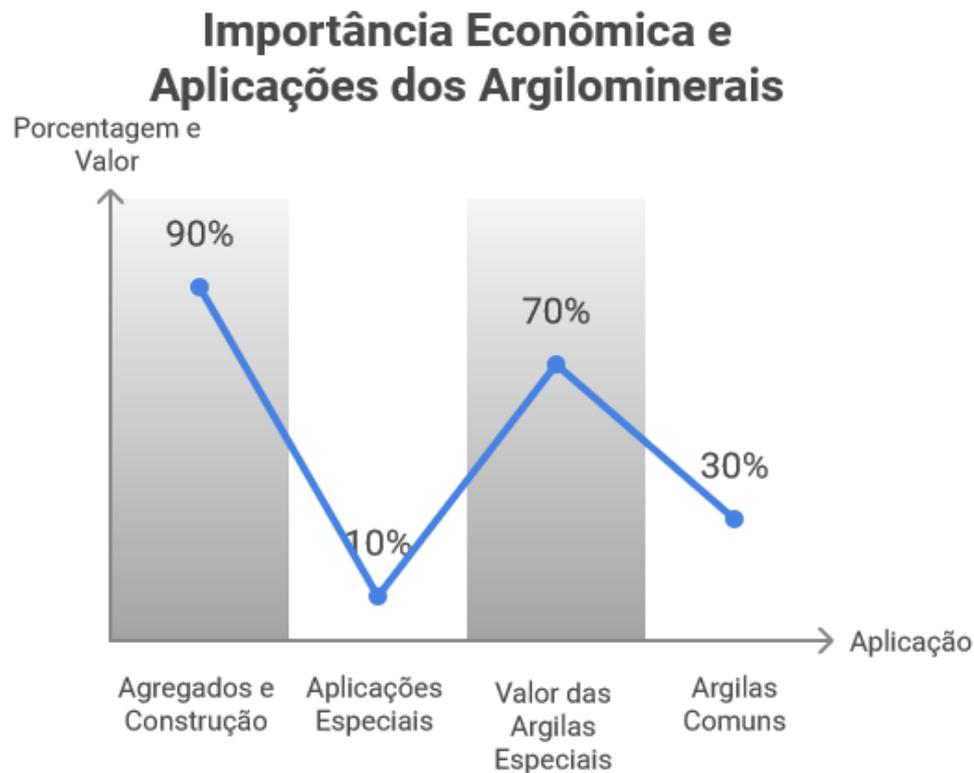
A illita também é um tipo de mineral argiloso 2:1, mas possui uma proporção maior de íons de potássio em sua estrutura do que outros minerais argilosos. É comumente encontrado em folhelhos e é usado como aditivo de lama de perfuração. A clorita é um tipo de mineral argiloso 2:1 que contém magnésio e ferro íons em sua camada octaédrica. É comumente encontrado em rochas vulcânicas e é usado como aditivo de lama de perfuração.

As propriedades físicas e químicas que tornam os argilominerais úteis em diversas aplicações incluem o tamanho de partícula pequeno que dá uma grande área de superfície, tornando eficaz a adsorção e troca de íons, como também na adsorção de compostos orgânicos. A alta capacidade de troca catiônica permite a absorção e a troca de íons carregados positivamente, como Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^{+} . Essa propriedade os torna úteis na química do solo, pois ajudam a reter nutrientes para o crescimento das plantas. Os argilominerais têm a capacidade de serem moldados e modelados quando hidratados, devido ao seu pequeno tamanho de partícula e alta área de superfície. Alguns têm a capacidade de inchar quando hidratados, o que pode ser útil em diversas aplicações, como fluidos de perfuração. A plasticidade é uma característica fundamental, funcionando como lubrificante, a água, ao se introduz entre as folhas permite que as elas deslizem umas sobre as outras.

Os argilominerais estão entre os minerais economicamente mais importantes, não só em razão do volume produzido como também pelo valor de produção. Cerca de 90% do total produzido destinam-se à fabricação de agregados e materiais de construção. Os 10% restantes têm várias aplicações, que inclui absorventes sanitário para animais de estimação, tintas, papel, borracha, decolorantes e produtos químicos e farmacêuticos, sendo úteis também na indústria do petróleo e na agricultura. Essas argilas são chamadas de argilas especiais e, embora constituam apenas 10% do volume produzido, respondem por 70% do valor. Os outros 90% são chamados

de argilas comuns, argilas cerâmicas ou argilas vermelhas. Este último nome provém do fato de, quando levadas ao forno, adquirirem cor de vermelha a marrom (BRANCO, 2014).

Figura 3: Importância Econômica e Aplicações dos Argilominerais.



Fonte: Adaptado das BRANCO e SGB, 2014.

As argilas especiais têm uma variedade de usos muito ampla, a caulinita é muito usada na fabricação de porcelana e papel, mas também na obtenção de isolantes térmicos e elétricos, produtos químicos, catalisadores, fibras de vidro, cosméticos, absorventes estomacais e como carga. A esmectita é comumente usada em fluidos de perfuração, bem como em remediação ambiental e como aglutinante em ração animal. A illita é muito usada na produção de tijolos, cimento e como carga em tintas e revestimentos. A bentonita é empregada em diversas áreas desde a alimentação como clarificantes, como em moldes de fundição, lama de sondagem, barreiras de impermeabilização, alimentação animal e muitos outros.

3.4 Bentonita

Segundo a literatura, o termo bentonita foi pela primeira vez aplicado a um tipo de argila plástica coloidal de uma rocha descoberta em Fort Benton, Wyoming-EUA. Embora a origem do termo bentonita se referisse à rocha argilosa descoberta, atualmente designa argila

constituída, principalmente, do argilomineral montmorilonita. Este argilomineral faz parte do grupo esmectita, uma família de argilas com propriedades semelhantes (LUZ, et al, 2008).

Ao submeter as lamelas individuais de montmorilonita a uma exposição à água, ocorre o processo de adsorção das moléculas de água na superfície das folhas de sílica, que são então separadas umas das outras. Chama-se determinado comportamento de inchamento interlamelar e é controlado pelo cátion associado à estrutura da argila. A espessura da camada de água interlamelar varia com a natureza do cátion adsorvido e da quantidade de água disponível (BRINDLEY, 1955).

A classificação das bentonitas baseia-se na capacidade de inchamento do mineral pela absorção de água. Bentonitas sódicas (ou bentonitas wyoming) se expandem mais e apresentam um aspecto de gel, enquanto as bentonitas cálcicas (ou bentonitas brancas) se expandem menos. As bentonitas que têm uma capacidade de expansão moderada são tidas como intermediárias ou mistas. As bentonitas sódicas artificiais são produzidas mediante o tratamento das bentonitas cálcicas com barrilha (carbonato de sódio). Visto que não há bentonitas sódicas naturais no Brasil, este processo de beneficiamento é bem comum no país (TOMIO, 1999).

Devido às suas propriedades, como a elevada Capacidade de Troca de Cátions (CTC), resultante de substituições isomórficas, e às características estruturais que facilitam a intercalação de vários compostos orgânicos e inorgânicos, as argilas esmectíticas, bentoníticas ou montmoriloníticas permitem a produção de produtos sob medida para uma ampla gama de aplicações industriais. Por isso, essas argilas possuem mais usos industriais do que todos os outros tipos de argilas combinadas, destacando-se como materiais extremamente versáteis e adequados para a criação de produtos ou insumos de alto valor agregado (SILVA; FERREIRA, 2008).

As maiores reservas de bentonitas se encontram no EUA (sódica advinda dos Estados de Wyoming, Dakota do Sul e Montana, e cálcicas provenientes dos Estados do Mississipi, Texas e Arizona). Já no Brasil, segundo Silva (2011), encontram-se no estado da Paraíba os principais depósitos industriais de bentonita, mais especificamente nos municípios de Boa Vista, Cubati e Pedra Lavrada. As camadas de bentonitas das minas de Boa Vista-PB ocorrem recobertas por uma camada de solo argiloso, variando de 1 a 10 m. Nos níveis onde é feita a lavra, as argilas ocorrem em camadas de cores variadas, por vezes formando estratificações ou zonas uniformes.

3.5 Pelotização

A pelotização é um processo que é aplicado a alguns minerais, especialmente o ferro, para aglomerar partículas ultrafinas em esferas de um determinado tamanho ou diâmetro, conhecidas como pelotas. Essas pelotas são de tamanho uniforme, com alta resistência mecânica e grande porosidade, o que permite alta velocidade de reação e maior grau de metalização. Se necessário, para aumentar a dureza do produto ou facilitar o processamento, que é uma operação contínua, um agente ligante e agregados são adicionados durante a preparação no misturador intensivo.

Segundo Meyer (1980), as matérias-primas utilizadas estão diretamente ligadas tanto ao processo de pelotização quanto a composição química do produto final, assim, pode ser dividida em dois grupos: materiais ferríferos que vão representar a matriz da pelota; e os materiais “livres” de ferro, aglomerantes e aditivos. Os aglomerantes e aditivos exercem as funções de facilitar a fabricação das pelotas (aglomerantes), de fornecer boa qualidade física e mecânica (aglomerantes e aditivos) e a de modificar as propriedades metalúrgicas das pelotas (aditivos).

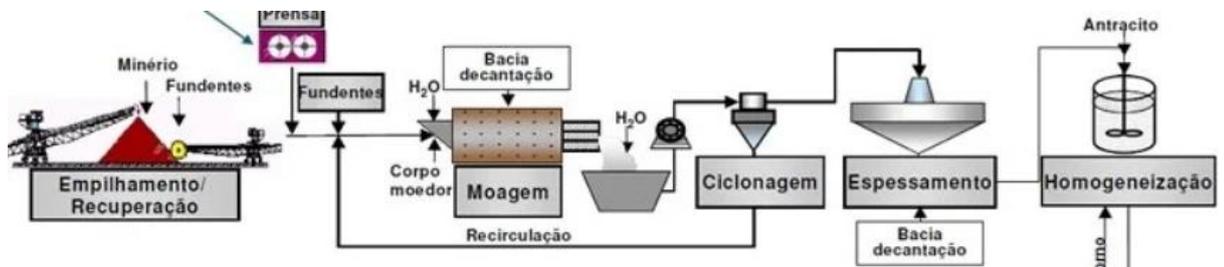
A formação das pelotas ocorre de duas maneiras pela cura a frio, em temperatura ambiente e endurecimento ou pela cura a quente, que se dá pelo tratamento térmico a altas temperaturas. No processo de cura a frio o endurecimento das pelotas ocorre pela mudança físico-química no aglomerante a baixas temperaturas. Já o processo a quente, o mais comum de produção de pelotas, o endurecimento se dá pela recristalização das partículas quando elevadas a altas temperaturas. As pelotas são formadas pelo rolamento da mistura de finos de minério e água, com ou sem adição de aglomerante, em um tambor ou em um disco inclinado.

O minério bruto extraído da mina nem sempre está na forma em que será utilizado pela indústria, seja por sua granulometria ou por conter impurezas indesejáveis ao processo, é necessário passar pela etapa de Beneficiamento. Esta etapa visa purificar o minério, modificar sua granulometria, a sua forma e a concentração química de suas espécies componentes, através de métodos físicos ou químicos sem que haja alteração de sua constituição química (LUZ & LINS, 2004).

Na moagem, o minério de ferro é moído e misturado à água, formando a polpa que separa o líquido e sólido. Em seguida, o material chamado hidrociclone é enviado para os espessadores, onde é sedimentado e, em seguida, encaminhado para os tanques homogeneizadores, como podemos observar na figura 4 abaixo. É importante apontar que durante esse processo acontece a separação de materiais, e os finos de minério flutuantes são

levados às fornalhas para formar esferas, a partir do calor e da circulação de ar. No que se refere ao tamanho, as pelotas de ferro possuem aproximadamente de 8 a 18 mm.

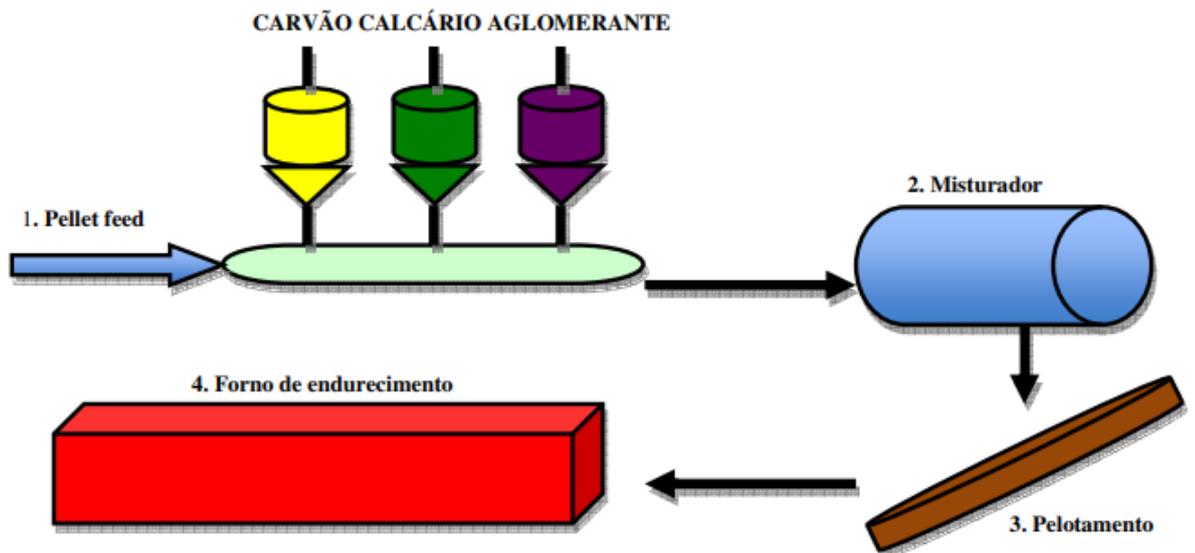
Figura 4: Processo de pelotização.



Fonte: VALE, 2006.

Após as etapas de concentração, moagem, filtragem e eventualmente moagem via prensas de rolos, tem-se o produto que alimenta a pelotização denominado por pellet feed. Pellet feed geralmente não é utilizado diretamente nos fornos de redução devido a sua granulometria. Este material passa por processo de aglomeração, chamado pelotização, observamos esse processo na figura 5 abaixo.

Figura 5: Desenho com a etapa de mistura de uma pelotização.



Fonte: AMERICO, 2012.

O carvão mineral proporciona energia térmica no processo de endurecimento da pelota, resultando em uma redução parcial do consumo de óleo combustível do forno. Também

proporciona uma perfeita distribuição de calor a pelota durante a queima, melhorando a qualidade física da pelota, logo aumentando a produtividade do processo. A utilização do calcário é fundamental para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas aos processos posteriores.

No processo de pelletização o aglomerante mais utilizado é a bentonita que é de origem vulcânica. A bentonita que é aplicada como aglomerante na produção de pelotas de minério de ferro, tem a função de promover a aglomeração dos finos e ultrafinos de hematita, conferindo à pelota crua a resistência mecânica necessária para o transporte, secagem e pré-aquecimento. Aumenta a taxa de crescimento da pelota e reduz a perda por atrito no manuseio de pelotas queimadas.

Atualmente, duas tecnologias dominam o mercado produtor de pelotas, respondendo por mais de 95% da produção mundial: Traveling Grate (TG) e Rotary-Kiln (RK). O antigo e obsoleto processo, denominado Shaft Furnace (SF), de baixa capacidade, possui ainda alguns fornos em operação, principalmente na China. No entanto, paulatinamente, tendem a desaparecer, tendo-se em vista os custos operacionais mais elevados. (MOURÃO, M, 2017; ZHU et al., 2015).

O processo TG é indicado para processar qualquer tipo de minério de ferro. O RK é mais apropriado para minérios magnetíticos ou misturas destes com os hematíticos, embora haja plantas desse processo operando com 100% de hematita. Os minérios têm de ser moídos e concentrados, gerando quantidades expressivas de finos abaixo de 0,15mm, próprios para a pelletização. No Brasil, essa atividade é bem desenvolvida, prevalecendo o uso da tecnologia Traveling Grate. O processo de pelletização foi desenvolvido para o aproveitamento desses minérios concentrados, ultrafinos, impróprios para o uso direto nos fornos siderúrgicos de produção de ferro primário, tais como: alto-forno, reator de redução direta, etc.

As pelotas de minério de ferro que alimentam os reatores de redução direta têm composição diferente das que alimentam os altos-fornos, principalmente o teor de sílica (SiO_2). As pelotas de alto-forno apresentam propriedades básicas, isto é, maior basicidade binária, que é dada pela relação CaO/SiO_2 , e as pelotas de redução direta apresentam propriedades ácidas (menor basicidade binária).

3.5.1 Minerais utilizados na pelletização

As matérias primas básicas para a pelletização são minério de ferro, fundentes, combustíveis sólidos e aglomerantes. O minério de ferro é o principal componente da mistura

a pelletizar. Segundo o USGS (United States Geological Survey), os recursos totais de minério de ferro no mundo são da ordem de 800 bilhões de toneladas, com teor médio de ferro contido igual a 28,8%. Tipicamente, um depósito deve conter pelo menos 25% de Fe, para ser economicamente recuperável. Porém, esse teor de corte depende de uma série de outros fatores, dentre os quais se destacam a localização geográfica e a logística de transporte.

A hematita, magnetita e siderita são os minerais de ferro mais relevantes, principalmente por sua ocorrência em grandes depósitos e pela alta concentração, o que viabiliza sua extração econômica. Esses minerais de ferro se formam em diversos ambientes geológicos, com destaque para formações rochosas de origem sedimentar, metamórfica e ígnea. No Brasil, a hematita é o mineral de ferro mais importante, sendo a principal rocha que contém o itabirito, encontrada em regiões como o quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. Independentemente do tipo de mineral, devido às altas temperaturas e ao ambiente oxidante nos fornos de pelletização, a fase cristalina predominantemente nas pelotas é a hematita (Fe_2O_3).

Devido às diferentes origens, os diversos minérios de ferro possuem propriedades bastante distintas. Isso resulta em comportamentos variados, não apenas nas operações de lavra, beneficiamento e aglomeração nas minas, mas também nos reatores de redução na siderurgia. Da mesma forma, os aglomerados, como pelotas e sinter, exibem características e desempenhos específicos, dependendo do tipo de minério utilizado em sua fabricação.

3.5.2 Aglomerantes utilizados na pelletização

Os aglomerantes servem para melhorar a formação das pelotas, proporcionando plasticidade ao material e maior rigidez mecânica. Porém, atualmente, apenas a bentonita (mistura de argilas), a cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), o calcário (rochas sedimentares com mais de 30% de carbonato de cálcio) e a dolomita (mineral de carbonato de cálcio e magnésio $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) são usados no processo de pelletização (AUGUSTO, 2012).

A Bentonita é o principal aglomerante utilizado, em todo o mundo. A disponibilidade e reservas no Brasil são relativamente limitadas, porém a oferta no mercado mundial é bastante considerável. Embora seja um excelente aglomerante, tem o inconveniente de adicionar às pelotas uma significativa quantidade de óxidos ácidos ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) e, em menor proporção, alguns compostos deletérios como Na_2O e K_2O . Por esta razão, há uma limitação de aplicação na produção de pelotas para redução direta, que exige altos teores de ferro e baixíssimo conteúdo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$.

A Cal Hidratada exerce dupla função na pelletização. Dosa CaO e atua como aglomerante. O seu uso é bastante limitado, devido aos altos custos envolvidos em sua produção. Tem a vantagem de não adicionar quantidade significativa de SiO₂ à pelota e apresentar um alto poder de aglomeração, quando na fase de produção das pelotas cruas. No Brasil, há grande disponibilidade desse material e a demanda é para o uso em atividades de maior valor agregado.

O Calcário Dolomítico, embora tenha elevado percentual de CaO, é empregado com a função de dosar MgO, composto também de caráter básico. O MgO é muito importante para ajustar as propriedades metalúrgicas das pelotas, principalmente quanto ao sticking na redução direta e aos pontos de amolecimento e fusão, no alto-forno. Sendo refratário, aumenta o ponto de fusão da fase escória das pelotas, demandando quantidade adicional de calor e energia elétrica, nos fornos de pelletização. A disponibilidade e reservas são, também, muito grandes.

Existem alguns aglomerantes orgânicos, normalmente derivados da celulose, e nos últimos 40 anos vêm sendo utilizados e desenvolvidos para a pelletização. Esses aglomerantes orgânicos surgiram como solução para o problema da ganga ácida da bentonita na produção de pelotas para redução direta. Por serem orgânicos, eles se queimam completamente dentro das pelotas, deixando praticamente nenhum resíduo. Algumas plantas os utilizam de forma pura, enquanto outras os combinam com cal hidratada ou bentonita. No entanto, devido à complexidade de produção desses materiais orgânicos, seus preços são elevados, tornando necessário um estudo de viabilidade técnico-econômica para avaliar seu uso em cada caso de pelletização. Os primeiros testes industriais com esses aglomerantes foram realizados pela Vale SA, em suas usinas de pelletização no complexo de Tubarão, em Vitória (ES), no início dos anos 1980.

3.5.3 Aditivos utilizados na pelletização

Os aditivos são usados para modificar a composição química das pelotas, servindo especialmente para corrigir a basicidade. Também podem ser adicionados finos de coque ou antracito, com a finalidade de reduzir o consumo de combustível requerido para que ocorra a combustão interna da pelota (AUGUSTO, 2012).

O Antracito é o combustível sólido mais utilizado na pelletização, em vista da grande disponibilidade no mercado mundial. No Brasil, não há produção desse material, de forma que é adquirido via importação. Esse combustível, adicionado às pelotas cruas, tem um papel de grande relevância. Acelera o processo de queima, substitui combustível externo de custo mais

elevado e melhora a eficiência energética do forno, com significativa redução nos consumos de calor e energia elétrica. Além disso, como é queimado no interior das pelotas, aumenta a porosidade, com benefícios para a redutibilidade e desempenho nos reatores de redução da siderurgia.

Os coques têm alto grau de pureza, significando baixa agregação de compostos indesejáveis à pelota. O desempenho na pelletização é excelente, haja vista os altos teores de carbono fixo (Cfix), e baixos de cinzas (CZ) e matéria volátil (MV). Nesta condição, permitem um controle de processo mais apurado, com benefícios para a operação. Porém, a disponibilidade desses combustíveis para uso na pelletização é baixa e os preços muito altos.

3.4.4 Propriedade dos pellets

As pelotas de concentrado de minério de ferro devem ser fortes o suficiente para suportar fisicamente os processos de transporte e redução sem deformação ou quebra, tenham uma distribuição de tamanho estreita, sejam facilmente reduzidas e tenham conteúdos químicos apropriados (como alto teor de ferro e baixa impureza, por exemplo, níveis de SiO₂, P, S).

Fisicamente, os pellets de concentrado de minério de ferro devem ser uniformemente dimensionados, fortes e resistentes à abrasão. O ideal seria que os pellets de tamanho único fossem os melhores, pois uma distribuição uniforme do tamanho dos pellets promove alta permeabilidade do leito com correlações.

A redutibilidade é geralmente determinada pelo aquecimento de pellets em uma atmosfera redutora controlada e pela medição da mudança de peso à medida que o oxigênio é liberado do pellet. É desejada uma alta redutibilidade do pellet. A operação ruim do forno é causada por uma carga ruim.

Logo, as propriedades desejáveis de uma pelota de minério de ferro são a resistência à compressão, distribuição de tamanho, força de queda, choque térmico, índices de tombo e abrasão e redutibilidade.

3.5.6 Cenário Internacional

O Brasil é o segundo maior produtor e exportador de minério de ferro do mundo, atrás apenas da Austrália, ofertando para o mercado transoceânico nos últimos 20 anos. O principal uso e a principal demanda para o minério de ferro é a produção de aço, portanto a demanda de minério de ferro tem uma relação estreita com a demanda mundial por aço bruto. A China é o principal consumidor de minério de ferro, em grande parte devido a ser a maior produtora de aço. A China produz aproximadamente a metade de todo aço bruto mundial (USGS, 2017).

O mercado transoceânico de minério de ferro corresponde a todo minério de ferro que é comercializado através de vias marítimas mundialmente (SILVA, 2014), os principais participantes desse mercado hoje são Austrália e Brasil, que levam sua produção para a China, o principal consumidor. A grande diferença de distância entre Brasil e China, comparando-se a distância entre Austrália e China é um dos principais fatores dentro desse mercado (COMTOIS & SLACK, 2016).

No Brasil existem duas regiões principais na produção de minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero e a Província Mineral de Carajás. Em ambas os depósitos são majoritariamente constituídos de itabiritos, que são formações de ferro bandadas e hematitos formados devido a intemperização e laterização das formações ferríferas. Na Província Mineral de Carajás há ainda a presença de jaspelitos ricos em ferro (ROSIERE & CHEMALE, 2000); (ROSA, 2015).

A primeira usina de Pelotização, com capacidade de 2 milhões de toneladas, foi instalada no Espírito Santo em 1969, contribuindo para o desenvolvimento da região. Isso aconteceu três anos após a inauguração do Porto de Tubarão, local estratégico para escoamento de sua produção. A entrada da Vale na produção e comercialização de pelotas representava uma importante inovação tecnológica, e um marco para a expansão de sua participação no comércio transoceânico de minério, abastecendo um mercado que se ampliava rapidamente (VALE, 2016).

Em 2014, entrou em operação a mais nova planta, a Usina 8, com capacidade para produzir 7 milhões de toneladas de pelotas por ano. Com sistemas automatizados que proporcionam a eficiência na produção, segurança e cuidado com o meio ambiente, a Usina 8 é uma das mais modernas plantas de pelotização do mundo. Entre as principais inovações da unidade estão a automação do processo de controle de uniformidade da granulometria das pelotas e até o uso de um robô na operação (VALE, 2016).

A China é um dos maiores produtores de minério de ferro no mundo. Segundo o site World Steel Association, entre 2018 e 2019, a China ocupava a 1º posição no ranking de países que mais produziram aço por milhões de toneladas. Em 2019, a produção de aço mundial girava em torno de 1.869T, sendo 53.3% produção chinesa e 51.3% de uso dessa matéria-prima. Conforme os dados do World Steel Association, dentre os 10 maiores produtores de aço em 2019, 6 companhias pertencem à China. Contudo, sua produção não é suficiente para abastecer o seu mercado e vasto parque industrial, então ela é também a maior consumidora. Esta

disparidade se explica primeiramente pelo fato da produção de minério de ferro do país não se equiparar ao seu consumo anual e, em segundo lugar, pela qualidade de seu minério, que tem um teor de ferro em torno de 35% (Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM), abaixo da média mundial e menor qualidade comparado ao minério brasileiro (PINTO, 2013).

As três maiores produtoras são a Vale no Brasil, e a Rio Tinto e a BHP Billiton, com operações em grande maioria na Austrália. Sendo essas empresas responsáveis por cerca de 74% do comércio marítimo mundial deste insumo (ROCHA, 2020).

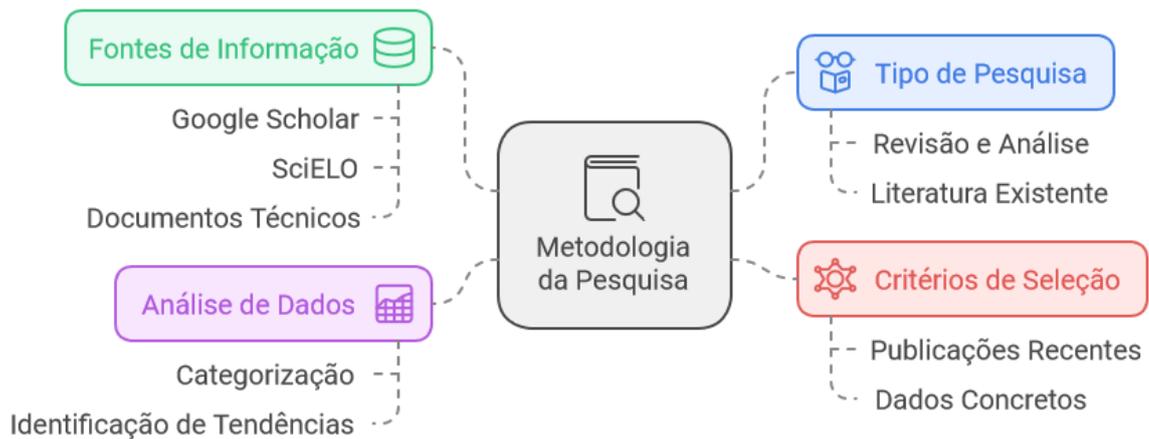
4. METODOLOGIA

A metodologia empregada na realização desta pesquisa bibliográfica sobre a pelletização de minério de ferro e o uso de bentonita como aglomerante. A pesquisa foi do tipo bibliográfica, consistindo na revisão e análise de literatura já existente sobre o tema. Foram selecionados artigos, livros, teses e documentos técnicos que abordam a pelletização de minério de ferro e as propriedades da bentonita.

As fontes de informação foram obtidas por meio de bases de dados acadêmicas, como Google Scholar, SciELO e outros repositórios de artigos científicos. Além disso, foram consultadas publicações relevantes de organizações e instituições especializadas na área de mineração e metalurgia. Foram utilizados critérios de seleção para garantir a relevância e a qualidade das fontes. Priorizaram-se publicações recentes, dos últimos 10 anos, que apresentassem dados concretos sobre a pelletização e a utilização de bentonita.

Os dados coletados foram analisados e organizados em categorias, permitindo uma comparação entre diferentes abordagens e resultados encontrados na literatura. Essa análise ajudou a identificar tendências, vantagens e desvantagens do uso de bentonita em comparação com outros aglomerantes. A pesquisa se baseou exclusivamente em fontes bibliográficas, o que pode limitar a abrangência das informações, no entanto, as referências selecionadas foram escolhidas com rigor para fornecer uma visão abrangente e fundamentada sobre o tema.

Figura 6: Metodologia da Pesquisa.



Fonte: Autor, 2024.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Impacto de processos alternativos de pelotização na eficiência energética

5.1.1 Pelotização a frio

A pelotização a frio é um processo usado em várias indústrias para aglomerar partículas finas em pellets maiores e mais gerenciáveis sem a aplicação de calor. Esta técnica mostrou resultados promissores na reciclagem de resíduos industriais e na melhoria das propriedades dos materiais para processamento posterior. Foi aplicada na indústria de processamento de oleaginosas como uma alternativa aos métodos tradicionais de prensagem a quente.

A prensagem a frio seguida pela pelotização de bolos de colza demonstrou economia significativa de energia (69% na fase de preparação e 32% no total) em comparação com os processos convencionais (Quinsac et al., 2016). Esta abordagem não só reduz o consumo de energia, mas também melhora a qualidade do óleo, diminuindo o teor de fósforo. O caso a seguir retrata os resultados do consumo de energia e a emissão de CO₂, comparando dois processos o cold pressing – CP (pressão fria) e o convencional FCP - flaking-cooking-pressing (descamar-cozinhar-prensar).

Tabela 2 – Balanços energéticos (kWh/t) e emissões de CO₂ (kg/t)

Processos	FCP	CP
Estágios de esmagamento		
Térmico	24	19
Elétrico	1	4
Total	25	23
Preparação		
Extração		
Condicionamento	75	0
Prensagem		
Aquecimento de óleo		
Peletização	12	12
Extração	15	15
<u>Desolventização</u>	85	85
Preparação		
Destilação	21	21
Peletização	12	12
Logística de armazenamento	6	6
kWh/t Total	244	192
%	-39%	-32%
Emissões de CO ₂ (kg/t)	58.5	36.8

Fonte: QUINSAC et al., 2016.

De acordo com esses resultados apresentados na Tabela 2 essa abordagem é muito promissora, mostra uma redução significativa no consumo de energia e nas emissões de CO₂, o que é um grande atrativo para a indústria. Embora os resultados ainda precisem ser confirmados em maior escala, a pelotização a frio é um processo mais limpo que libera menos CO₂ na atmosfera e apresenta maior qualidade no produto final.

5.1.2 Pelotização a quente

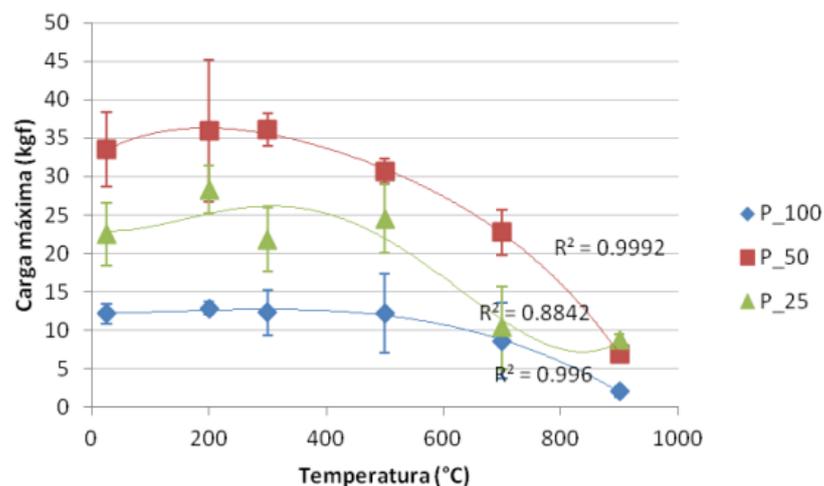
As pelotas de minério de ferro devem manter sua resistência mecânica durante o processo de redução para garantir um fluxo eficiente dos gases no forno. Elas precisam suportar tanto a compressão quanto a abrasão, evitando a degradação até que o ferro seja completamente reduzido.

Durante o aquecimento, ocorre a calcinação do aglomerante, o que resulta na decomposição dos compostos hidratados, causando uma queda temporária na resistência à compressão das pelotas. Essa queda se mantém até que a temperatura esteja próxima de 900°C,

momento em que inicia o processo de sinterização do ferro reduzido. Com a sinterização, as partículas de ferro começam a se unir, aumentando novamente a resistência mecânica das pelotas, o que é crucial para o sucesso do processo de redução.

Para a pelotização a quente também foram estudados os casos quanto a resistência da pelota e comparado quando submetidas a temperaturas mais baixas. Em um primeiro estudo, as pelotas confeccionadas foram subdivididas em três lotes: 25% (P-25), 50% (P-50) e 100% (P-100), onde os teores de carbono são 25%, 50% e 100% do teor carbono estequiométrico, respectivamente. Entre os principais resultados, verificou-se que o comportamento mecânico de pelotas autorredutoras é melhorado com o aumento do tempo de cura e prejudicado pelo aumento do teor de coque e aumento da temperatura, como apresentado na Figura 7.

Figura 7: Carga máxima suportada por pelotas submetidas a diferentes temperaturas.



Fonte: MASCHIO et al., 2017

O valor da resistência compressão das pelotas autorredutoras, comparando-se as pelotas P-50 e P-100, está diretamente ligada à quantidade de coque presente nelas. Foi verificado um comportamento diferente com as pelotas P-25, que apresentou resistência à compressão menor que as pelotas P-50, mediante a Figura 7.

Quando uma pelota autorredutora é aquecida até as temperaturas necessárias para a redução dos óxidos, como a hematita, ocorre uma expansão volumétrica de cerca de 20%. Durante esse processo, a resistência à compressão das pelotas autorredutoras sofre uma queda acentuada ao serem expostas a altas temperaturas, especialmente ao ultrapassar os 500°C. A

partir dessa faixa de temperatura, começam as reações de redução da hematita, o que aumenta a porosidade devido ao consumo de carbono presente e à decomposição dos compostos hidratados dos aglomerantes, que inicialmente conferem alta resistência a frio. No entanto, após atingir uma temperatura em torno de 1000°C, a resistência das pelotas volta a aumentar, devido ao início do processo de sinterização das partículas de ferro já reduzido. A Tabela 3, apresenta as composições das pelotas P1, P2, P3 e P4 a base de poeira de sinterização.

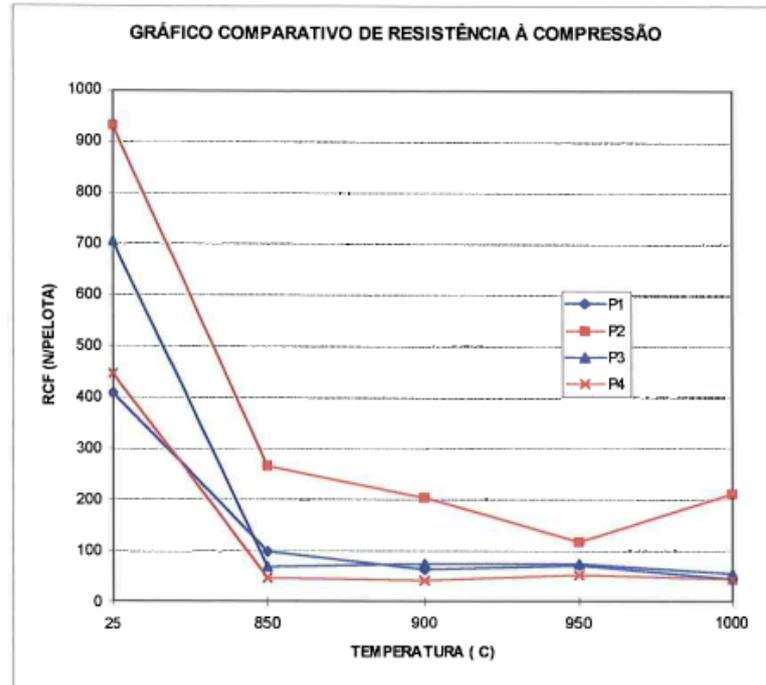
Tabela 3 – Composição da pelota auto-redutora a base de poeira de sinterização.

Pelota	Pó de Sinteriz. (%)	Carvão Mineral (%)	Cimento ARI (%)	EAF (%)
P1	75.40	18.60	2.50	3.5
P2	74.60	18.40	4.00	3.0
P3	74.58	19.49	5.93	-
P4	73.70	19.30	4.00	3.0

Fonte: ATSUMI, 1999.

A Figura 8 apresenta a resistência à compressão das pelotas P1, P2, P3 e P4, que apresentam em sua composição poeira de sinterização, com o aumento da temperatura.

Figura 8: Comparativo de resistência à compressão com pelotas de poeira de sinterização.



Fonte: ATSUMI, 1999.

N = resistência à compressão (N/pelota).

Outro caso, comenta que quando submetidas a temperaturas de 850°C e acima, independente da resistência a frio, como podemos ver na figura acima, ocorre uma queda brusca da resistência, exceto a pelota P2 que apresenta uma resistência a frio de 923 N/pelota. A pelota P4 apresentou um comportamento inesperado, esperava-se ser semelhante a P2 pois a sua composição é a mesma, podemos observar na tabela 3 as composições das pelotas.

Porém, essa diferença de comportamento se dá ao tempo de cura, que foi diferente em ambos os casos. A pelota P2 teve 580 dias de cura, enquanto a pelota P4 teve 146 dias. Dessa forma, podemos observar que comparado ao estudo anterior ambos apresentam resultados melhores com maiores tempos de cura.

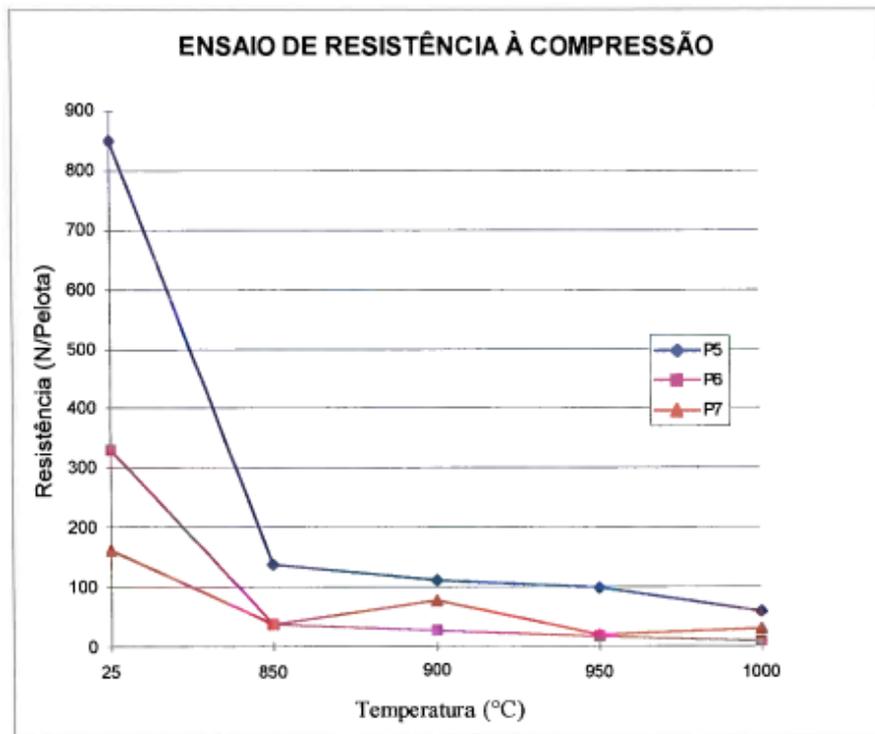
A Tabela 4, apresenta as composições das pelotas P5, P6 e P7 a base de minério MBR (Minerações Brasileiras Reunidas).

Tabela 4: Composição da pelota auto-redutora a base de minério MBR.

Pelota	Minério MBR (%)	Carvão Mineral (%)	Cimento ARI (%)	EAF (%)
P5	68.55	21.45	10.00	-
P6	71.22	22.28	6.50	-
P7	70.83	22.77	4.00	3.00

Na Figura 9, observamos a resistência à compressão das pelotas P5, P6 e P7, que apresentam em sua composição minério MBR (Minerações Brasileiras Reunidas). Quando as pelotas são a base de minério MBR, a resistência à compressão está relacionada ao aumento do aglomerante, se mostrou ser um efeito que prevalece na resistência após a cura.

Figura 9: Comparativo de resistência à compressão com pelotas de minério MBR.



Fonte: Fonte: ATSUMI, 1999.

A partir disso podemos concluir a diminuição brusca da resistência quando as pelotas são submetidas a temperaturas acima de 850°C.

5.2 Comparação dos aglomerantes

A bentonita é o ligante padrão para pelotização de minério de ferro. É relativamente barato, controla a umidade de pelotas úmidas na formação de bolas e fornece resistência mecânica suficiente às pelotas úmidas. Além disso, fornece uma boa resistência à compressão seca e sinterizada às pelotas. No entanto, é considerada uma impureza devido ao seu conteúdo de óxido ácido (SiO_2 e Al_2O_3). Esses óxidos ácidos são conhecidos por seus efeitos adversos na economia de fabricação de ferro. Portanto, a investigação de alternativas aos ligantes de bentonita que não contaminem a composição das pelotas é um tópico importante na indústria.

Ligantes orgânicos têm muitas vantagens sobre a bentonita. Pelotas feitas com ligantes orgânicos têm concentrações mais baixas de ganga e são geralmente mais porosos em sua estrutura. No entanto, os ligantes orgânicos têm uma desvantagem muito importante quando comparados a bentonita, ligantes orgânicos fornecem baixa resistência física e mecânica às pelotas (MORAES, 2004).

Alguns aglomerantes como a serpentinita foram testados para saber a sua viabilidade para substituir a bentonita. A produção de pelotas de minério de ferro empregando serpentinita como fonte de MgO já foi descrita por FONSECA (2003) e ARAGÃO et al (2000), ambos os estudos destacam a função da serpentinita como aditivo fundente na produção de pelotas de minério de ferro, também concordam que a serpentinita, devido ao seu alto teor de óxido de magnésio (MgO), contribui para o ajuste da basicidade das pelotas, que é essencial para o processo de fusão no alto-forno. Apesar dessas experiências iniciais, o uso da serpentinita foi ignorado em vista da presença de água estrutural, o que causa uma perda devido a uma maior calcinação em comparação com outras fontes de MgO.

No entanto, quando a serpentinita é usada na produção de pelotas de minério, o ferro e seus outros componentes químicos, como óxido de silício (SiO) e óxido de ferro (FeO), não foram levados em consideração, bem como sua aplicação como um agente de aderência, cujo papel é reservado para a bentonita, um silicato de alumínio que tem várias aplicações industriais e semelhança química com a serpentinita (RIBERTI, 2014).

Para os testes foram feitas três amostras, 100% bentonita, 50% bentonita 50% serpentinita e 100% serpentinita, e correspondem aos testes 1, 2 e 3 respectivamente. A partir do teste de resistência à compressão percebe-se que ocorre a diminuição à medida que a concentração de bentonita é reduzida, como observado na Tabela 5.

Tabela 5: Ensaio de resistência a compressão das pelotas.

Número de Teste	1	2	3
Resistência a compressão	403	397	342

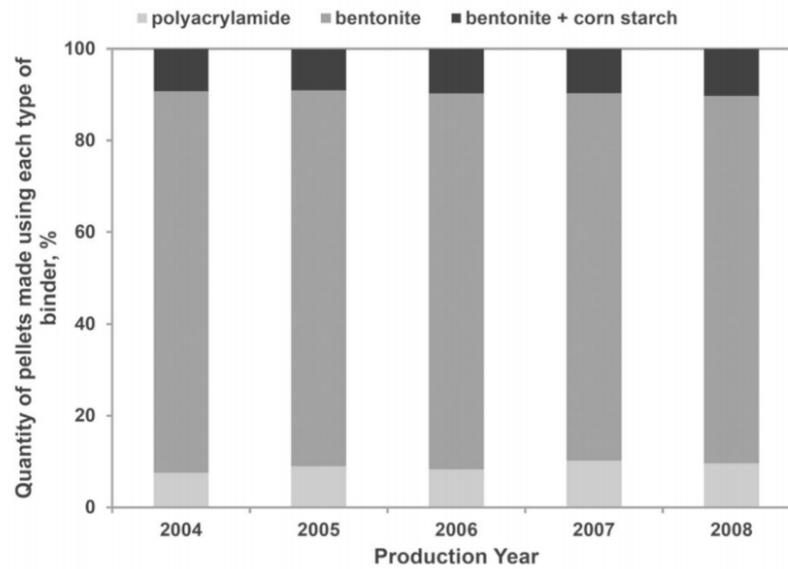
Fonte: RIBERTI, 2014.

Observou-se que a utilização de 100% de serpentinita nos testes de pelletização produziu pellets brutos com baixa resistência à compressão. Na substituição cinquenta-cinquenta (50% bentonita/50% serpentinita) obteve-se uma qualidade intermediária, que mostra que tal aplicação combinada dos dois produtos é viável, desde que a qualidade atenda aos requisitos necessários, um teor de MgO em torno de 0,20%. Embora a serpentinita não apresente característica ligante, devido à sua distribuição de tamanho (99% passando pela malha 325 e alta superfície específica), ela apresenta potencialidade para ser utilizada de forma combinada com a bentonita.

Ligantes de Na-CMC e poliacrilamida provaram ser os ligantes orgânicos mais bem-sucedidos, com poliacrilamidas mais prevalentes como uma substituição completa de bentonita. Apesar de seus problemas relatados de alta umidade da superfície do pellet e rugosidade, o amido de milho ainda tem sido usado como uma substituição parcial de bentonita (HALT et al., 2014).

A bentonita se destaca em relação à poliacrilamida tanto em termos de resistência mecânica a frio quanto a quente, especialmente em processos que envolvem altas temperaturas, como a queima no alto-forno. A estrutura mais robusta das pelotas aglomeradas com bentonita e sua estabilidade térmica fazem dela a escolha mais confiável. Em contrapartida, a poliacrilamida oferece uma resistência mecânica inicial razoável, mas sua decomposição em altas temperaturas limita sua aplicabilidade em fases posteriores do processo. No entanto, pode ser considerada uma alternativa interessante em situações em que a redução de impurezas no processo é priorizada, embora com a ressalva de sua menor resistência mecânica em comparação com a bentonita (ABREU, 2008).

Figura 10: Quantidade de pelotas de minério de ferro dos EUA feitas usando diferentes tipos de ligantes.



Fonte: HALT et al., 2014.

A bentonita sozinha responde por aproximadamente 81% das pelotas, o ligante composto de bentonita-amido de milho responde por aproximadamente 10% das pelotas, os 9% restantes são pelotas ligadas por poliacrilamida. Dessa forma, o uso de bentonita ainda domina o mercado de ligantes de minério de ferro. Incluindo pelotas fabricadas com ligantes compostos de bentonita-amido de milho, a bentonita está presente em aproximadamente 90% das pelotas de minério de ferro dos EUA.

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este trabalho buscou analisar a pelotização de minério de ferro, com foco na utilização da bentonita como aglomerante. A pesquisa revelou que a bentonita se destaca como um dos principais aglomerantes devido às suas propriedades que favorecem a formação de pelotas de alta qualidade. Sua capacidade de melhorar as propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas é um fator crucial para a eficiência do processo de pelotização e, conseqüentemente, para a produção de aço de qualidade superior.

Além disso, a comparação com outros aglomerantes orgânicos sugeriu que, embora a bentonita seja amplamente utilizada, existem alternativas que podem ser competitivas em determinadas condições e algumas dessas alternativas são capazes de atuar em conjunto com a bentonita. A pesquisa ressaltou a importância de considerar não apenas a eficiência técnica, mas também os aspectos econômicos e ambientais na escolha do aglomerante, uma vez que a indústria busca cada vez mais práticas sustentáveis.

A relevância deste estudo se estende ao setor industrial, onde a escolha do aglomerante impacta não apenas a eficiência da produção, mas também a qualidade do produto final. Portanto, compreender as vantagens e limitações dos materiais utilizados na pelotização é fundamental para a evolução das práticas industriais.

Por fim, recomenda-se que futuras pesquisas explorem novos aglomerantes e métodos que possam aprimorar o processo de pelotização, contribuindo para a inovação e sustentabilidade no setor. Com a adoção de tecnologias que reduzem emissões e otimizam recursos, a indústria pode avançar significativamente em direção a uma produção mais verde e eficiente. A contínua investigação e desenvolvimento são essenciais para garantir que a indústria mineral possa atender à demanda crescente por aço de maneira responsável e eficiente.

SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS:

- Recomenda-se o desenvolvimento de novos estudos experimentais que avaliem a viabilidade do uso de aglomerantes híbridos (bentonita e orgânicos), tanto sob o aspecto técnico quanto econômico.
- Futuras pesquisas devem incluir uma análise do ciclo de vida e impacto ambiental dos diferentes aglomerantes, investigando também alternativas de menor custo para os aglomerantes orgânicos.

- O impacto da porosidade e da resistência mecânica das pelotas em condições de operação industrial deve ser avaliado com maior rigor, considerando o comportamento em processos de redução direta e altos-fornos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. G.; MOURÃO, M. B. Desempenho de aglomerantes na pelotização de minério de ferro. REM: Revista Escola de Minas, 2008.
- AGUIAR, M.; NOVAES, A.; GUARINO, A. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. Química Nova, v. 25, p. 1145-1154, 2002.
- AMÉRICO, J. Revisão sobre a utilização de misturadores no processo de pelotização do minério de ferro. 2012. 28f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.
- ARAGÃO, R. et al. Desenvolvimento de pelotas de minério de ferro com alto teor de MgO na Samarco Mineração S/A. SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, vol 31, p.865-878. Santos, São Paulo, 2000.
- ATSUMI, E. Comportamento a quente de pelotas autorredutoras de poeira de sinterização e de minério de ferro com variações do teor de aglomerante. 1999. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- BALDUINO, A. Estudo da caracterização e composição de argilas de uso cosmético. 2016. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas à Saúde). Universidade Federal de Goiás, Jataí. 2016.
- BATISTA, F. As exportações de minério de ferro brasileiro para a China: Atração de investimentos externos e impactos para o território e sociedade paraense. FRONTEIRA, Belo Horizonte, v21, n41, p.179-203, fev. 2022.
- BRANCO, P. Dicionário de Mineralogia e Gemologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 608 p. II. Disponível em: <https://cursosextensao.usp.br/pluginfile.php/141621/mod_resource/content/1/Dicionario-Mineralogia-Gemologia-2ed-DEG.pdf>. Acesso em: 05 out. 2024.
- BRANCO, P. Minerais argilosos. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <<https://www.sgb.gov.br/minerais-argilosos>>. Acesso em: 18 set. 2024.
- CARVALHO, V. Mercado Internacional de Minério de Ferro. 2017. 35f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2017.
- COELHO, A. SANTOS, P. SANTOS, H. Argilas Especiais: O que são, Caracterização e Propriedades. Química Nova, São Paulo, v.30, n.1, p.146-152, ago. 2006.
- FONSECA, V. Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO. Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.
- GEOLOGYSCIENCE. Minerais de Argila. 2023. Disponível em: https://pt.geologyscience.com/minerals/clay-minerals/?amp#Chemical_Composition_and_Structure_Clay_Minerals. Acesso em: 06 ago. 2024.

HALT, J., KAWATRA, S. Revisão de ligantes orgânicos para aglomeração de concentrado de minério de ferro. Departamento de Engenharia Química – Universidade Tecnológica de Michigan, Houghton, 2014.

KOSSMANN, C. Mercado do minério de ferro no Brasil e no mundo – Demanda, Consumo e Preço. 2023. 51f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Vitória. 2023.

MASCHIO, C. TAKANO, C. MOURÃO, M. et al. Resistência mecânica a frio e a quente de pelotas autorredutoras de minério de ferro. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGLOMERAÇÃO DE MINÉRIOS, 5., 2017. São Paulo. Anais. São Paulo, 2017.

MENDONÇA, P. Saiba como são produzidas as pelotas de minério de ferro: Pelotas de Minério de Ferro. 2021. Disponível em: <https://jweng.com.br/noticias/pelotas-de-minerio-de-ferro/>. Acesso em: 11 set. 2024.

MENEZES, R. NEVES, G. FERREIRA, H. Mapeamento de Argilas do Estado da Paraíba. Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2001

MORAES, S. Comparação do desempenho de aglomerante orgânico em relação à bentonita na operação de pelletização de concentrados de minério de ferro brasileiros de diversas procedências. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MORGADO, A. SANTOS, P. Avaliação de bentonitas brasileiras na pelletização de finos de minério de ferro. GONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO, 61., 2006, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro, 2006.

MOURÃO, J. Aspectos conceituais relativos à pelletização de minérios de ferro. ResearchGate. 2017

NOGUEIRA, H. Estudo sobre bentonita para pelletização de minério de ferro. 2018. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química). Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande. 2018.

PAULO, G. Caracterização Tecnológica de Argilas, Comparação entre Blends, Objetivando Otimização Logística. 2022. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas. 2022.

QUINSAC, A., CARRE, P., FINE, F. Combining pelletizing to cold pressing in the rapessed crushing process improves energy balance and the meal and oil quality. European Journal of Lipid Science and Technology, 118, p.1326-1335, 2016.

SANTOS, P. Ciência e Tecnologia de Argilas. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 514p. v1.

SILVA, L. Influência da qualidade e proporção de diferentes tipos de bentonita nas propriedades das pelotas cruas e queimadas de minério de ferro: estado da arte. 2021. 109f.

Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2021.

SILVA, T. Bentonita. SUMARIO MINERAL. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2014.

TERTRE, E.; HUBERT, F.; BRUZAC, S.; et. al. Ion-exchange reactions on clay minerals coupled with advection/dispersion processes: Application to Na⁺/Ca²⁺ exchange on vermiculite: Reactive-transport modeling, batch and stirred flow-through reactor experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. v. 112, p. 1-19, 2013.

TIPOS DE ARGILA. Agência Nacional de Mineração. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br>>. Acesso em: 18 set. 2024