

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas

Mestrado Profissional

Isadora Ferreira

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS INSUMOS NO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DO
MINÉRIO DE FERRO**

Araxá

2024

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIDADE ARAXÁ

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas

Mestrado Profissional

Isadora Ferreira

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DOS INSUMOS NO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO DO
MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

Área de concentração: Engenharia de Minas

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José

Coorientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende

Araxá

2024

F383e Ferreira, Isadora.
Estudo da utilização dos insumos no processo de pelletização do minério de ferro / Isadora Ferreira. – 2024.
89 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de São José.
Coorientador: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2024.
Bibliografia.

1. Aglomeração de minérios de ferro – Teses. 2. Pelotização – Teses. 3. Pellet Feed – Teses. 4. Insumos – Teses. I. De São José, Fábio. II. Resende, Domingos Sávio de. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.

CDU 622.788

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus Araxá* – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus que esteve comigo. Diante de todas as fraquezas, Ele não me deixou desistir. Saí de casa, fiquei longe das pessoas que mais amo, mesmo assim fui forte, pois tudo é no tempo de Deus. E hoje posso dizer eu venci, mesmo com choro, tristezas, alegrias, medos, ansiedades, eu só tenho gratidão à tamanha realização.

Ao meu pai José Lucídio (in memoriam) meu eterno protetor, foi difícil sem você por perto, mas eu superei e ofereço-lhe essa conquista. Ah, obrigada pelos ensinamentos e pelo presente que me deste, a minha mãe Emília, que sempre esteve comigo e nunca me deixou só, abdicou de seus sonhos para viver o meu. Sem palavras...eu amo vocês! Aos meus queridos irmãos Daiana, Kênia, Kleber, Kim e João Arthur vocês são meus alicerces, obrigada por todo cuidado e carinho. Com o coração cheio de amor, agradeço aos meus sobrinhos Pedro, Emanuelle, Isabel e Arthur, os meus olhos brilham quando os vejo, quero ser inspiração e orgulho para vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio, expresso meus agradecimentos por ter contribuído tanto com a minha formação, e ao meu coorientador Prof. Domingos Sávio por todo apoio e contribuição. Com carinho deixo meu agradecimento aos professores, Natal, Alexander, Mário, e Allan por todo apoio, presença e ajuda durante esse tempo.

Às empresas fornecedoras das amostras, Vallourec e Herculano Mineração agradeço pela parceria e toda ajuda necessária. Ao CEFET-MG Unidade Araxá e a PUC-MG Coração Eucarístico, pelo acolhimento e apoio, contribuído com as realizações das análises e testes.

Em especial ao Prof. e Coordenador do curso de Eng. Química-PUC MINAS, Leonardo Mitre juntamente com o técnico do laboratório de Tratamento de Minérios, André Ribeiro por não medir esforços para me ajudar, agradeço também à Maria Laura, estagiária do laboratório do CEFET-MG Unidade Araxá e ao Creso Silva responsável pelo Laboratório Físico e Químico da Vallourec, agradeço por toda ajuda e disponibilidade no laboratório.

À cada um, pais, irmãos, sobrinhos, tios(as), amigos(as), esposo. Vocês foram a base de tudo para que eu chegasse aqui nessa fase tão grandiosa da minha vida. E que nunca se apague em mim a vontade de lutar, a esperança de vencer, a capacidade de resistir e a alegria de comemorar! Enfim, meu muito obrigada a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização desse mestrado. Vocês, que são os verdadeiros heróis desta vitória, merecem o abraço mais apertado, o beijo mais demorado e o olhar mais carinhoso, obrigada por tudo!

“Você nunca achará o arco-íris, se você estiver olhando para baixo.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

O processo principal de aglomeração de finos de minério de ferro é a pelotização, porém a diminuição das reservas de minérios de ferro de alta qualidade, a crescente produção de ultrafinos e a necessidade de aumentar a produtividade requerem atualização constante e busca por aprimoramentos no processo. Sendo assim, o projeto teve como principal objetivo investigar a influência de insumos na pelotização do minério de ferro, além de articular uso dos insumos, análise de teor, concentração de óxidos, resistência e umidade das pelotas finais. A pesquisa buscou aprimorar a aglomeração utilizando os materiais escolhidos, visando obter os melhores resultados, comparando cada teste realizado. Para isso, usaram-se amostras de pellet feed (dividida em lotes 1, 2 e 3) da Herculano Mineração, Itabirito–MG, bentonita, calcário calcítico, calcário dolomítico e coque fornecidos pela Vallourec, Nova Lima–MG. Em relação aos testes, foram realizados ensaios de bancada no laboratório de tratamento de minério da PUC/MG Coração Eucarístico, o processo de pelotização foi realizado em um prato pelotizador da marca CDC, a determinação da umidade das pelotas e o teste de queda para avaliar a resistência mecânica à queda. A média de teor de ferro nas amostras de pellet feed é de cerca de 64%. Os lotes apresentaram PPC próximos a 3,56%, 3,84% e 4,19%, respectivamente, e granulometria de 100% abaixo de 150 μm . O produto, as pelotas verdes, tiveram umidade em torno de 8% e as pelotas secas obtiveram um valor médio de resistência à queda de $1,18 \pm 0,06$ kgf/pelota (2 quedas até a fissura). As pelotas do lote 1, usando o calcário calcítico, tiveram um maior teor de CaO, aumento do percentual de Fe de 65,48% e teor de Fe_2O_3 de aproximadamente 93%, esse mesmo lote foi o que melhor interagiu com o aglomerante. Em relação à basicidade, os lotes 1 e 2 apresentaram um índice entre 0,06 e 0,08, sendo considerados ácidos. No lote três, por utilizar ambos os fundentes juntos, houve um aumento na concentração de óxido de cálcio, atingindo 0,19%, sendo consideradas pelotas de baixa basicidade e são usadas na redução direta para a produção de ferro esponja.

Palavras-chaves: Minério de Ferro; *Pellet Feed*; Pelotização; Insumos

ABSTRACT

The main process for agglomerating iron ore fines is pelletizing, but the decrease in reserves of high quality iron ore, the growing production of ultrafines and the need to increase productivity require constant updating and the search for improvements in the process. As such, the main objective of the project was to investigate the influence of inputs on iron ore pelletizing, in addition to combining the use of inputs, analysis of content, oxide concentration, strength and humidity of the final pellets. The research sought to improve agglomeration using the chosen materials, in order to obtain the best results, comparing each test carried out. To this end, samples of pellet feed (divided into lots 1, 2 and 3) from Herculano Mineração, Itabirito-MG, bentonite, calcitic limestone, dolomitic limestone and coke supplied by Vallourec, Nova Lima-MG, were used. With regard to the tests, bench tests were carried out in the ore treatment laboratory at PUC/MG Coração Eucarístico. The pelletizing process was carried out on a CDC pelletizing plate, the pellet moisture content was determined and the drop test was carried out to assess the mechanical resistance to dropping. The average iron content of the pellet feed samples was around 64%. The batches had a PPC of around 3.56%, 3.84% and 4.19%, respectively, and a grain size of 100% below 150 μm . The product, the green pellets, had a moisture content of around 8% and the dry pellets had an average drop resistance value of 1.18 ± 0.06 kgf/pellet (2 drops to crack). The pellets from batch 1, using calcitic limestone, had a higher CaO content, an increase in the Fe percentage of 65.48% and an Fe_2O_3 content of approximately 93%; this batch was the one that interacted best with the binder. In terms of basicity, batches 1 and 2 had an index of between 0.06 and 0.08 and were considered acidic. In batch three, because both fluxes were used together, there was an increase in the concentration of calcium oxide, reaching 0.19%, which is considered a low basicity pellet and is used in direct reduction for the production of sponge iron.

Key-words: Iron Ore; Pellet Feed; Pelletizing; Inputs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos Específicos	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	Minério de ferro	4
3.2	Beneficiamento de minério de ferro.....	5
3.3	Pelotização	7
3.4	Etapa de mistura – aditivos	9
3.5	Etapa de pelotamento	10
3.5.1	Discos pelletizadores.....	11
3.6	Mecanismo de formação da pelota crua	14
3.7	Insumos	16
3.7.1	Aglomerantes	17
3.7.2	Bentonita	17
3.7.3	Fundentes	19
3.7.4	Calcário Calcítico (CaCO_3).....	21
3.7.5	Calcário dolomítico ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)	21
3.7.6	Combustível sólido.....	22
3.7.7	Coque	23
3.8	Influência de variáveis na pelota final	23

3.8.1	Distribuição granulométrica das partículas de minério do pellet feed	24
3.8.2	Dosagem dos insumos	24
3.8.3	Umidade	24
3.8.4	Controle de Basicidade.....	25
3.9	Caracterização das pelotas	26
3.9.1	Porcentagem de Carbono fixo	27
3.10	Atuação do Disco de Pelotização	28
4	MATERIAIS E METÓDOS	30
4.1	Caracterização das amostras e Preparação do <i>pellet feed</i>	31
4.2	Caracterização do <i>pellet feed</i>	32
4.3	Preparação dos insumos	34
4.4	Caracterização dos insumos	35
4.5	Dosagem dos insumos	35
4.6	Processo de aglomeração	37
4.6.1	Mistura	37
4.6.2	Aglomeração	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1	Caracterização do <i>pellet feed</i>	43
5.1.1	Análise química e granulométrica.....	43
5.1.2	Teor de Umidade.....	45
5.1.3	Determinação de densidade/picnometria	45
5.2	Caracterização dos insumos.....	47

5.2.1	Análise química e granulométrica dos insumos	47
5.3	Basicidade dos isumos	52
5.4	Características da Pelota Final	53
5.4.1	Umidade	53
5.4.2	Teste de resistência da pelota verde	54
5.4.3	Teste à compressão da pelota verde-seca	55
5.4.4	Análise química das pelotas secas.....	56
6	CONCLUSÕES.....	58
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
9	APÊNDICES	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DO BRASIL MOSTRANDO AS PRINCIPAIS PROVÍNCIAS FERRÍFERAS, EVIDENCIANDO OS PRINCIPAIS TIPOS DE MINÉRIOS ENCONTRADOS.	5
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DA USINA DE BENEFICIAMENTO DA MINA DO SAPO.	6
FIGURA 3 – MINÉRIO DE FERRO (A) GRANULADO; (B) <i>SINTER FEED</i> ; (C) <i>PELLET FEED</i> .	7
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA TÍPICO DO PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO	8
FIGURA 5 – PROCESSO DE AGLOMERAÇÃO DA BENTONITA	9
FIGURA 6 - ENDURECIMENTO CURA A FRIO	11
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DE UM ESBOÇO ESQUEMÁTICO DE UM DISCO	11
FIGURA 8 – EXEMPLO DE DISCO DE PELOTAMENTO INDUSTRIAL	11
FIGURA 9 – PRATO PELOTIZADOR CDC, DE USO EM ESCALA LABORATORIAL	12
FIGURA 10 – FORMA DE OPERAÇÃO DO DISCO	13
FIGURA 11 – DISCO DE PELOTAMENTO/PENEIRA DE ROLOS	14
FIGURA 12 – MECANISMO DE FORMAÇÃO DA PELOTA CRUA	15
FIGURA 13 – FIGURA ILUSTRATIVA DA BENTONITA	18
FIGURA 14 – FIGURA ILUSTRATIVA DO CALCÁRIO CALCÍTICO E DOLOMÍTICO	21
FIGURA 15 – FIGURA ILUSTRATIVA DO COQUE	23
FIGURA 16 – REQUISITOS BÁSICOS PARA BOA QUALIDADE DAS PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO	29
FIGURA 17 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS.	31
FIGURA 18 – PILHA ALONGADA	32
FIGURA 19 – EQUIPAMENTO AUTODENSITY 100	33
FIGURA 20 – CONJUNTO DE PENEIRAS E MASSA UTILIZADAS NA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	34
FIGURA 21 – INSUMOS	34
FIGURA 22 – MOINHO DE DISCO – CONTENCO	35
FIGURA 23 – MINÉRIO DE FERRO (<i>PELLET FEED</i>)	35
FIGURA 24 – DOSAGEM DO LOTE 1	36
FIGURA 25 – DOSAGEM DO LOTE 2	36
FIGURA 26 – DOSAGEM DO LOTE 3	37

FIGURA 27 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DE PELOTIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO: (1) MISTURA, (2) AGLOMERAÇÃO E (3) SECAGEM NA ESTUFA	38
FIGURA 28 – AGITADOR / HOMOGENEIZADOR	38
FIGURA 29 – ANALISADOR DE UMIDADE	39
FIGURA 30 – DISCO DE PELOTIZAÇÃO – CDC	39
FIGURA 31 – AJUSTES DO DISCO DE PELOTIZAÇÃO – CDC.	40
FIGURA 32 – ESQUEMA DO PROCESSO	40
FIGURA 33 – PELOTAS SELECIONADAS	40
FIGURA 34 – TESTE DE QUEDA	41
FIGURA 35 – MÁQUINA DE COMPRESSÃO DO FABRICANTE EMIC	41
FIGURA 36 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO <i>PELLET FEED</i>	43
FIGURA 37 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICAS DO <i>PELLET FEED</i> EM DUPLICATA	44
FIGURA 38 - ANÁLISE QUÍMICA DA BENTONITA	48
FIGURA 39 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DA BENTONITA	49
FIGURA 40 - ANÁLISE QUÍMICA CALCÁRIO CALCÍTICO	50
FIGURA 41 - ANÁLISE QUÍMICA CALCÁRIO DOLOMÍTICO	50
FIGURA 42 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS FUNDENTES	51
FIGURA 43 - ANÁLISE QUÍMICA DO COQUE	51
FIGURA 44 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO COQUE	52
FIGURA 45 - RESULTADO DA DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DAS PELOTAS	53
FIGURA 46 - NÚMERO DE QUEDAS. OS VALORES REPRESENTAM A MÉDIA DE 10 MEDIDAS E AS BARRAS DE ERRO APRESENTAM O DESVIO-PADRÃO	54
FIGURA 47 - MÉDIA DO RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS TÍPICAS DOS INSUMOS EMPREGADOS EM PELOTIZAÇÃO E SUA DOSAGEM TÍPICA (KG/T PELOTA).	16
TABELA 2 - DADOS TÍPICOS DE ANÁLISE QUÍMICA, ENSAIOS FÍSICOS E ENSAIOS METALÚRGICOS DE PELOTAS	27
TABELA 3 - EQUIPAMENTOS E ENSAIOS REALIZADOS NO <i>PELLET FEED</i>	33
TABELA 4 – DOSAGEM DOS INSUMOS	36
TABELA 5 - ANÁLISE QUÍMICA DO <i>PELLET FEED</i>	43
TABELA 6 – TEOR DE UMIDADE DO <i>PELLET FEED</i>	45
TABELA 7 - DADOS DA PICNOMETRIA	46
TABELA 8 - DADOS DA PICNOMETRIA A GÁS	47
TABELA 9 - ANÁLISE QUÍMICA DOS INSUMOS	47
TABELA 10 – BASICIDADE DOS INSUMOS ANALISADOS	52
TABELA 11 – UMIDADE FINAL DAS PELOTAS DE CADA LOTE	53
TABELA 12 – TESTE DE QUEDA (DROP TEST)	54
TABELA 16 – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	55
TABELA 17 – MÉDIA DO RESULTADO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	56
TABELA 18 – ANÁLISE QUÍMICA DAS PELOTAS SECAS	57

1 INTRODUÇÃO

O setor de mineração no Brasil desempenha um papel de extrema relevância na economia do país, sendo um dos principais pilares da indústria extrativa nacional. A indústria base, e como tal, induz a formação da cadeia produtiva, do processo de transformação de minérios até produtos industrializados (GOMES, 2015). Conforme a Agência Nacional de Mineração (ANM), o Brasil detém um dos maiores patrimônios minerais do mundo e é um importante produtor e exportador de minérios de alta qualidade. Essa é a razão pela qual a mineração é uma das forças da economia brasileira, esse segmento atrai muitos investimentos e tem bom retorno financeiro.

Por outro lado, a atividade de mineração resulta na geração de volumes consideráveis de resíduos, os quais demanda tratamento adequado e um manejo cuidadoso em relação à sua disposição final, dada a implicação ambiental e os riscos envolvidos. Diante dessa realidade, as empresas do setor minerador estão em busca de alternativas que não sejam só mais seguras, mas também mais viáveis economicamente no que diz respeito à destinação dos rejeitos produzidos. Além disso, explorar técnicas para o reprocessamento desses rejeitos se tornou uma abordagem importante. A busca por uma harmonia entre as práticas de processamento de produtos ferrosos e a preservação do meio ambiente agora representa um diferencial de mercado significativo.

A mineração no Brasil está presente em 2.699 municípios (48% dos municípios brasileiros), ocupando apenas 0,06% do território nacional, onde explorou no ano de 2022 um total de 91 tipologias minerais com uma produção estimada de 1,05 bilhão de tonelada, envolvendo mais de 7.300 empresas e microempreendedores individuais, sendo responsável pela geração de mais de 204 mil empregos diretos e 2,25 milhões de empregos ao longo da cadeia produtiva e mercado, além de um faturamento anual de R\$ 250 bilhões (IBRAM, 2023).

As reservas minerais brasileiras podem ser quantificadas da seguinte maneira: Minas Gerais detém a maioria com 57,2%, seguida pelo Pará com 21,5%, Mato Grosso do Sul com 19,8%, e outros estados contribuindo com o restante. O Brasil ostenta uma posição de destaque no âmbito internacional, especialmente quando se considera a quantidade de ferro presente nos minérios. Essa situação é impulsionada pelos elevados teores de ferro encontrados nas principais variedades de minérios presentes no país, como a hematita (com aproximadamente 60% de teor de ferro), que predomina no Pará, e o itabirito (com em média 50% de teor de ferro), que é mais comum em Minas Gerais, conforme ANM em 2022.

A exploração de jazidas de minério de ferro mais ricas de extrair tende a diminuir com o tempo, o que resulta na exploração de depósitos de minério de ferro mais complexos em termos de beneficiamento, como está ocorrendo atualmente no estado de Minas Gerais, necessitando da produção de finos e ultrafinos para permitir a concentração mineral.

Assim, diante do aumento na produção de partículas finas durante as fases de extração e processamento do minério de ferro, a pelletização se firma como uma solução tecnológica promissora. Pois tal tecnologia tem a capacidade de converter as partículas em um produto de considerável valor agregado, desempenhando um papel fundamental na promoção da sustentabilidade da indústria siderúrgica e na otimização eficaz dos recursos minerais disponíveis.

As pelotas constituem-se em uma carga com granulometria uniforme, teor de ferro bem próximo ao dos óxidos puros de ferro e boa resistência mecânica, o que é fundamental para suportar manuseio e transporte por um longo período. Todas essas características são muito importantes para atenderem as necessidades de qualidade e produtividade dos fornos siderúrgicos. Para se atingir essas características torna-se necessário a incorporação de insumos específicos ao processo de pelletização (HENRIQUES, 2012).

Os insumos desempenham um papel fundamental no processo de fabricação de pelotas, exercem influência direta sobre diversos aspectos cruciais, incluindo a eficiência operacional das instalações e a qualidade do produto final. Segundo Sabino *et al.* (2016) a mistura a pelletizar pode comportar diferentes tipos de minério e aditivos, esses utilizados para modificar a composição química e as propriedades metalúrgicas das pelotas.

A utilização de insumos na pelletização continua em constante desenvolvimento e pesquisa, visando melhorar o desempenho em suas aplicações, para tanto, atualmente existem estudos e parcerias com fornecedores destes insumos que está trabalhando para adicionar cada vez mais valor nas pelotas de minério de ferro.

A pelletização é essencial para os produtores de minério de ferro, pois permite otimizar o processo de forma sustentável, eficaz e economicamente vantajosa. Esse processo de compressão ou moldagem do material, na forma de um pellet, é fundamental para o avanço da indústria siderúrgica e para impulsionar o crescimento econômico dos países envolvidos na exploração mineral.

Diante disso, essa pesquisa se justifica por avaliar a viabilidade da mistura a frio de diferentes proporções de insumos alternativos, como ligantes e/ou carga metálica alternativa, em conjunto com o pellet feed. Essa investigação visa contribuir com uma base sólida para empreendimentos que enfrentam flutuações constantes na tipologia da mina e na qualidade dos diversos insumos utilizados. Ademais, o uso dos insumos eleva a eficiência da etapa de pelletização, o que também justifica a realização desse estudo. É conhecido que a utilização dos insumos pode promover melhorias nas propriedades mecânicas dos pellets, assim como as características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias para produção eficaz das pelotas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência dos insumos na etapa de pelletização do minério de ferro utilizando o *pellet feed* como matéria-prima principal.

2.2 Objetivos Específicos

- Comparar insumos usais na mineração (bentonita, calcário calcítico, calcário dolomítico, coque) por meio de testes em triplicata variando somente o fundente;
- Testar o equipamento de pelletização em escala de bancada;
- Avaliar a resistência dos aglomerados produzidos;
- Apresentar os resultados das análises físicas e químicas das amostras e correlacioná-los com a análise da pelota final, a fim de identificar como as características iniciais dos insumos influenciam nas propriedades das pelotas produzidas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo desse capítulo serão abordados assuntos importantes para o presente trabalho. Primeiramente, serão apresentadas algumas características do minério de ferro e sua rota de beneficiamento mais comumente utilizada. Posteriormente, serão apresentadas etapas do processo de pelotização, seus conceitos, principais agentes ligantes, além de uma explanação sobre as principais variáveis no processo de pelotização do minério de ferro.

3.1 Minério de ferro

O termo "minério de ferro" possui uma ampla gama de significados, o que pode dificultar entender exatamente como ele é utilizado. Inicialmente, o termo "mineral-minério" era empregado na petrografia para descrever minerais acessórios opacos. No entanto, ao longo do tempo, sua aplicação evoluiu, considerando que o conceito de "minério" possui uma natureza essencialmente econômica e está sujeito a influência de fatores políticos, tecnológicos e de infraestrutura. Como resultado, o termo "mineral-minério" passou a ser uma alternativa mais abrangente e flexível (EVANS, 1987). Nesse contexto, o termo "minério de ferro" deve ser principalmente empregado para se referir a um conjunto de minerais que são explorados ou podem ser explorados com viabilidade econômica devido ao seu teor de ferro.

O minério de ferro é, na sua quase totalidade, utilizado na indústria siderúrgica (99%), para produção do ferro-gusa em altos-fornos e do ferro-esponja nos fornos de redução direta, que depois são transformados em aço. O restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas (QUARESMA, 2001).

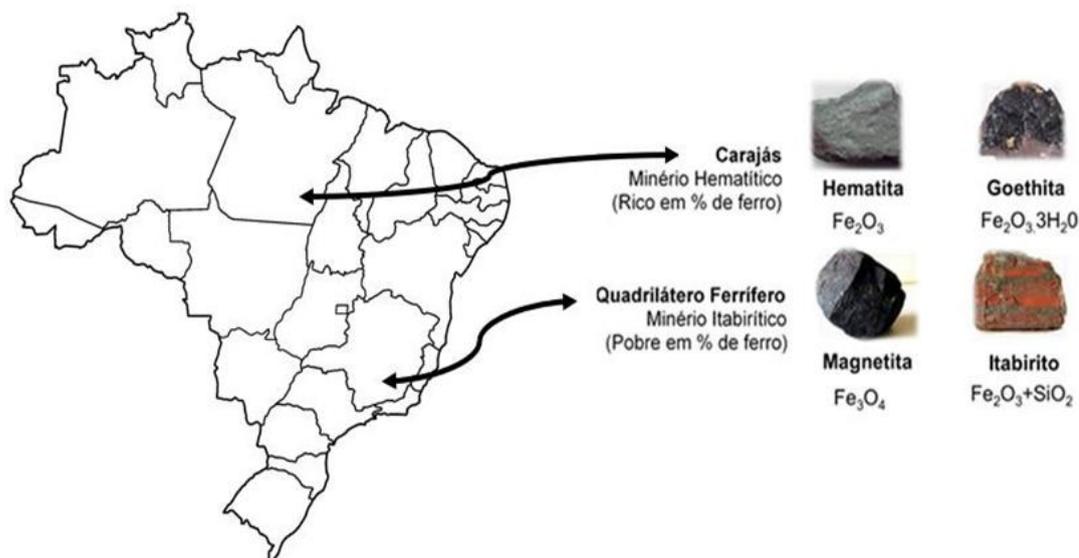
Os tipos de minérios de ferro encontrados na Terra são classificados conforme a composição química aniônica do mineral que fornece o elemento. São eles: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Mas apenas os óxidos possuem uma importância no sentido econômico por apresentarem em suas composições maior concentração de ferro, além de serem os mais comuns (ANDRADE, 2014). Os mais importantes para a indústria siderúrgica são os óxidos:

- ✓ Magnetita (óxido ferroso-férrico) → Fe_3O_4 (contém 72,4% de Fe);
- ✓ Hematita (óxido férrico) → Fe_2O_3 (contém 69,9% de Fe);
- ✓ Limonita (óxido hidratado de ferro) → $2\text{FeO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (contém 48,3% Fe).

O Brasil é um país extremamente rico do ponto de vista de recursos minerais (Figura 1). Cada minério apresenta uma composição mineralógica distinta, e este aspecto deve ser avaliado ao se estudar as melhores rotas de extração e beneficiamento. Identificar e quantificar os tipos de minerais

presentes no minério, bem como nas faixas granulométricas avaliadas durante as etapas de concentração, é fundamental para que se obtenha melhores resultados (PINHEIRO, 2000).

Figura 1 - Mapa do Brasil mostrando as principais províncias ferríferas, evidenciando os principais tipos de minérios encontrados.



Fonte: Pinheiro (2000)

O estudo explora a importância do concentrado de minério de ferro e os benefícios da pelletização. Destaca-se a relevância desse bem mineral para o Brasil e para o cenário global, enfatizando a necessidade de compreender o processo de produção para um entendimento completo.

3.2 Beneficiamento de minério de ferro

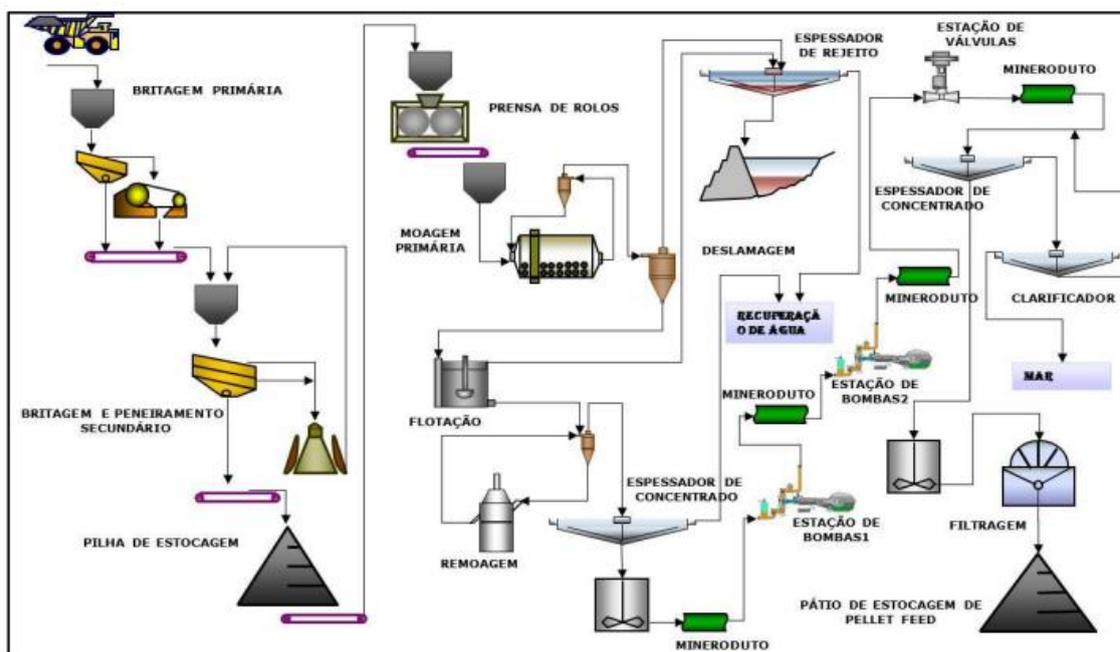
Segundo as Normas Reguladoras de Mineração (NRM), o processo de beneficiamento de minérios visa realizar a preparação granulométrica, concentração ou purificação de minérios por meio de métodos físicos ou químicos, sem causar alterações na composição química dos minerais, assim todo projeto de beneficiamento de minérios deve:

- ✓ Otimizar o processo, visando alcançar a máxima eficiência na utilização do minério e dos recursos envolvidos, levando em consideração aspectos de viabilidade econômica e condições de mercado;
- ✓ Realizar a atividade com rigoroso respeito aos princípios de segurança, proteção da saúde ocupacional e preservação do meio ambiente.

O beneficiamento do minério de ferro é um processo intrinsecamente flexível e adaptável, moldando-se conforme as características do minério e as necessidades da indústria, como pode ser observado na Figura 2. Como nem sempre estão na forma em que serão utilizados pelas indústrias, seja por sua granulometria ou por conter impurezas indesejáveis ao processo, os minérios de ferro precisam passar pela etapa de beneficiamento. Essa etapa visa modificar sua granulometria, a sua

forma e a proporção de suas espécies componentes, mediante métodos físicos ou químicos sem que haja alteração da constituição química dos minerais em si (LUZ & LINS, 2004). A Figura 2, mostra um fluxograma típico de beneficiamento do minério de ferro na Mina do Sapo - Anglo American.

Figura 2 - Fluxograma da Usina de Beneficiamento da Mina do Sapo.



Fonte: Anglo American (2016)

Os produtos do beneficiamento têm características e granulometrias distintas, cada qual passará ou não por mais etapas de beneficiamento, dependendo de sua classificação, para posterior utilização (CETEM, 2010) e são eles:

- ✓ Granulado: tem granulometria entre 31,7 mm e 6,3 mm e forma irregular;
- ✓ *Sínter Feed*: partículas com tamanho variando entre 6,3 mm e 0,15 mm;
- ✓ *Pellet Feed*: partículas finas, com granulometria abaixo de 0,15 mm.

No âmbito deste estudo, o foco recai sobre a matéria-prima destinada ao processo de pelotização. Especificamente, é o produto denominado "pellet feed" (conforme ilustrado na Figura 3-c) que se apresenta como o centro de interesse desta pesquisa.

Figura 3 – Minério de ferro (a) Granulado; (b) *Sinter Feed*; (c) *Pellet Feed*.



Fonte: CETEM (2010)

3.3 Pelotização

O processo de pelotização de minérios de ferro iniciou-se em 1912 na Suécia com A. G. Andersson, quem inventou esse processo de aglomeração. Industrialmente, a pelotização se desenvolveu a partir dos anos de 1950 nos Estados Unidos da América (EUA). Muitos processos foram estudados e testados a partir de então. Com o passar do tempo alguns se tornaram obsoletos e caindo em desuso. De lá para cá, a indústria de pelotização expandiu-se mundo afora e o crescimento da produção de pelotas tem-se acelerado nos últimos tempos, especialmente na China. Essa evolução é devida, na maioria, à exaustão das reservas de minério de ferro de alto teor, o que torna os processos de preparação de cargas ferrosas para a siderurgia mais complexos e caros (MOURÃO, 2017).

Devido as possíveis exaustões das reservas de minério de ferro, os processos de aglomeração (sinterização e pelotização) passaram a desempenhar um importante papel na preparação de matérias-primas para alimentação em altos-fornos e fornos de redução direta (MOURÃO, 2008).

Por muitos anos, os minérios carregados nos altos-fornos eram britados e parcialmente classificados na mina ou nas usinas siderúrgicas, a fração grossa (*lump ore*) era carregada, a fração fina acumulava-se continuamente em pilhas e bacias, sem uso econômico viável. Naquela época, a busca pelo aproveitamento desta fração fina do minério de ferro foi importante para o desenvolvimento das tecnologias de aglomeração que conhecemos atualmente, como nos casos da sinterização e da briquetagem (CETEM, 2010).

Diante desse contexto, é fundamental definir os principais processos utilizados atualmente na produção do ferro.

O processo de sinterização consiste em aglomerar os finos de minério de ferro, geralmente com outros materiais, como fundentes e combustíveis, por meio de um processo térmico. Os finos

são aquecidos em um leito contínuo a uma temperatura abaixo do ponto de fusão, mas suficientemente alta para promover a aglomeração parcial das partículas. O resultado é um material poroso e resistente chamado sinter, que pode ser utilizado como carga nos altos-fornos (CETEM, 2010).

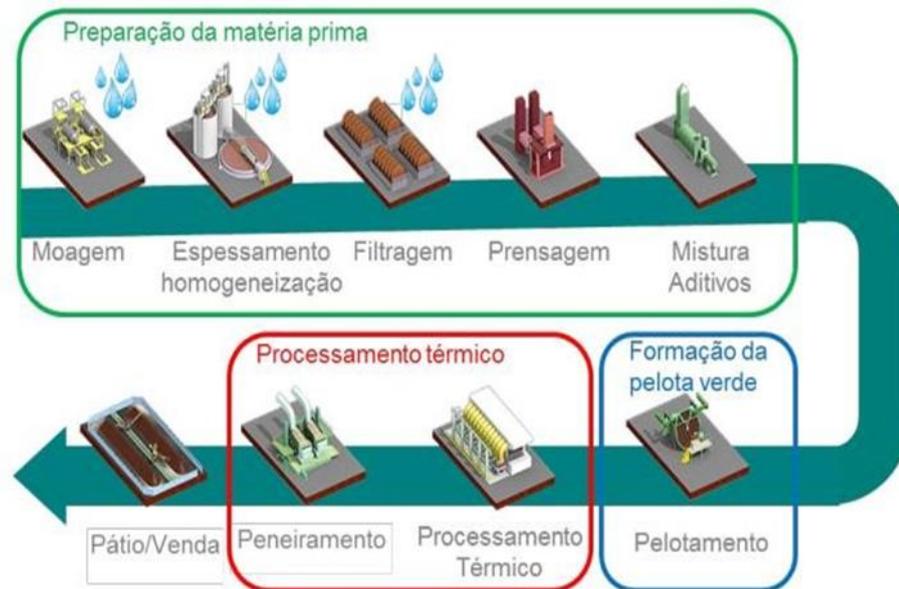
Posteriormente, surgiu o processo de pelletização, que representa uma técnica mais sofisticada. Esse método envolve a aglomeração dos finos de minério de ferro em pelotas esféricas, caracterizadas por seu tamanho controlado e alta resistência mecânica e química (FONSECA, 2004).

Meyer (1995) comenta que o processo de pelletização pode ser entendido como um processo de aglomeração que, mediante tratamento térmico, converte a fração ultrafina gerada no beneficiamento do minério de ferro (abaixo de 0,15 mm) em esferas de tamanhos na faixa de 8 a 18 mm, com características apropriadas para alimentação das unidades de redução. Especificamente no caso do minério de ferro, a pelletização é um aglomerado de forma esférica, obtido pelo rolamento (em tambores, cones ou discos), de óxidos de ferro, finamente moídos e misturados a aditivos e aglomerantes umedecidos e depois submetidos à queima, a temperaturas entre 1250°C a 1320°C, quando então a pelota é consolidada pelo intercrescimento dos grãos e reforçada pelo processo de sinterização e dos aglomerantes.

Assim, a pelletização é um processo que contém inúmeros subprocessos ou segmentos de processo. A Figura 4 demonstra um fluxograma típico do processo de pelletização, com o *pellet feed* e os aditivos na etapa de mistura.

O concentrado utilizado como matéria-prima na fabricação das pelotas é transportado até uma usina de pelletização. A polpa recebida passa por diversas etapas de separação sólido-líquido conforme ilustrado na Figura 4, sendo a primeira etapa, o espessamento, onde este material é armazenado em tanques homogeneizadores, e então bombeado para a área de filtragem, no qual se separa o líquido do sólido por meio de filtros a vácuo, obtendo-se o *pellet feed* com umidade adequada ao processo de pelotamento. A umidade do *pellet feed* varia entre 10,0 e 10,5% (FONSECA, 2004). Ainda segundo o autor, o *pellet feed* prensado é transportado por correias transportadoras até o silo de minério localizado na área denominada mistura, onde recebe a adição de insumos essenciais para que as pelotas adquiram as características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias a sua utilização nos processos subsequentes. Os principais insumos utilizados são: carvões minerais, calcários e aglomerantes. Estes insumos são adicionados ao *pellet feed* em proporções adequadas e posteriormente misturados, para se obter uma perfeita homogeneização do material a ser alimentado nos discos pelletizadores.

Figura 4 - Fluxograma típico do processo de pelletização



Fonte: Cruz et al., (2004)

Este estudo abordará as fases da mistura dos aditivos e a formação da pelota verde-pelotamento que serão minuciosamente explicadas em cada subitem correspondente.

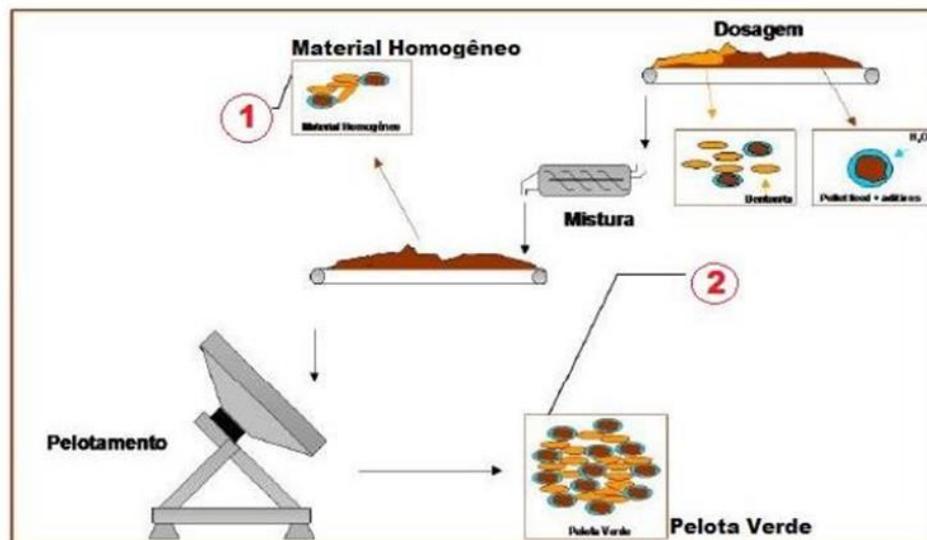
- ✓ A primeira fase aborda a preparação da matéria-prima;
- ✓ A segunda fase engloba o processo de formação das pelotas verde;
- ✓ A terceira fase envolve o tratamento térmico das pelotas, ou seja, o processo de queima das mesma.

3.4 Etapa de mistura – aditivos

No segundo estágio de formação das pelotas verdes acontece a mistura de insumos, o pelotamento e a classificação. Na etapa de mistura são realizadas adições de insumos como bentonita e calcário, para obtenção das pelotas com características (basicidade, resistência a compressão, abrasão, etc.) conforme especificações (ROCHA, 2023).

A etapa de mistura é de fundamental importância para o processo e que possibilita a dispersão uniformemente das partículas de bentonita, permitindo uma distribuição adequada entre as partículas de minério. O poder aglomerante da bentonita possibilita uma maior coesão entre as partículas do minério, fornecendo a resistência suficiente para suportar as etapas subsequentes do processo. Na Figura 5 apresenta-se o processo de aglomeração utilizando a bentonita (SABINO *et al.*, 2016).

Figura 5 – Processo de aglomeração da bentonita



Fonte: Sabino et al., (2016)

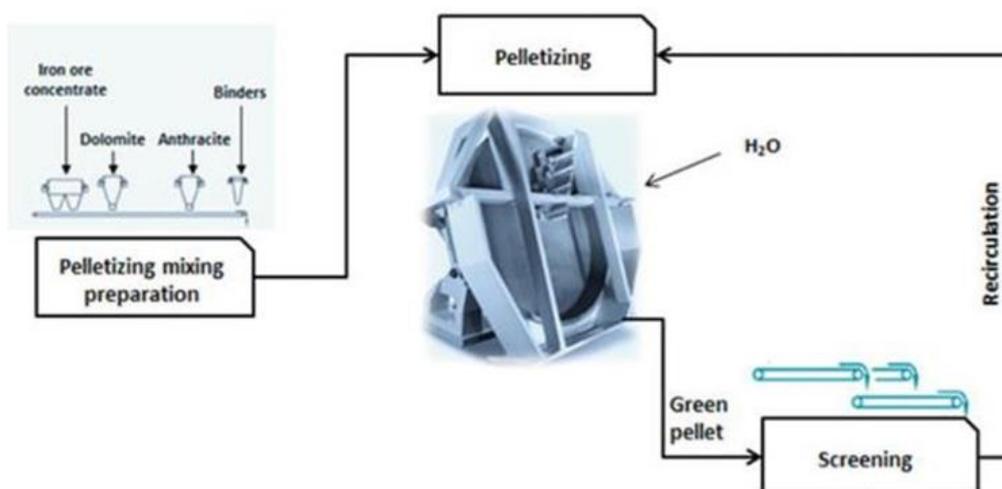
O *pellet feed* está pronto para seguir no processo de pelotamento, cujas etapas consistem na mistura de aditivos e aglomerantes. Dessa maneira, a formação de pelotas ocorre quando o minério fino é misturado com água e aglomerante, para criar bolas esféricas iniciais (“sementes”) e passam por meio de discos ou tambores de pelotização. A pelota assim formada é denominada por pelota verde ou crua (*green pellet*). O tamanho das pelotas cruas pode ser ajustado, através das variáveis de controle nessa operação, tais como: taxa de alimentação, inclinação, velocidade do disco, dentre outras (MOURÃO, 2017).

3.5 Etapa de pelotamento

As pelotas são produzidas com granulometria apropriada e resistência mecânica suficiente para suportar as etapas de transporte da área de pelotamento e em seguida para o forno de endurecimento das pelotas. Nessa etapa de pelotamento o minério de ferro é devidamente preparado com os aditivos necessários, alimentado nos discos pelotizadores onde se inicia a formação das pelotas cruas. É uma das etapas mais importantes do processo de pelotização e a mais influenciada pela ação do *roller press* (FONSECA, 2004).

Conforme Mantovani (1996) o processo de endurecimento das pelotas a frio se dá pelas alterações físico-químicas do aglomerante ocorrido em baixas temperaturas. Em contrapartida, no método de cura a quente, que é mais convencional e remonta a um período mais longo de processamento, o endurecimento é resultado da recristalização ou intercrescimento das partículas, além da fusão da ganga. Este trabalho versará apenas sobre o processo de endurecimento por cura a frio, de acordo com fluxograma da Figura 6.

Figura 6 - Endurecimento cura a frio

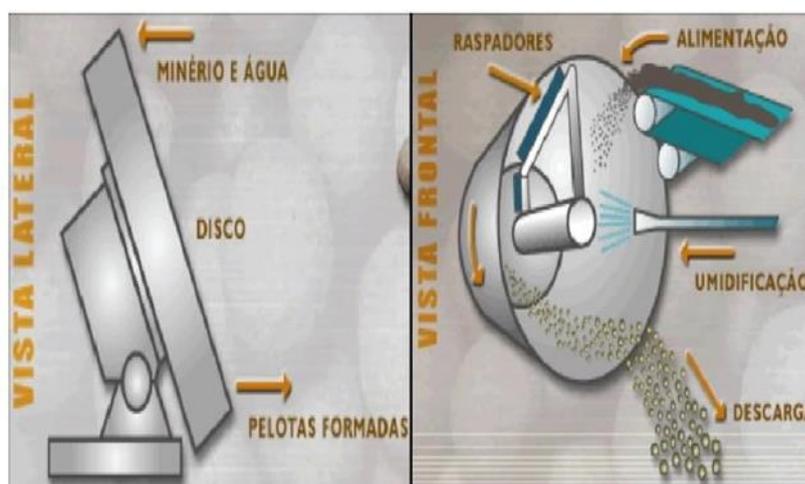


Fonte: adaptado Costa (2013)

3.5.1 Discos pelletizadores

Os discos de pelletização são equipamentos responsáveis por gerar as pelotas de minério de ferro cruas. O produto a ser pelletizado é umedecido e através do contínuo movimento de rotação do disco e do contato com o seu fundo o produto toma a forma esférica. Um esboço esquemático de um disco é demonstrado na Figura 7, um exemplo da indústria é apresentado na Figura 8 e um, exemplo utilizado em laboratórios na Figura 9. A empresa fabricante CDC fornecem discos de pelletização para laboratório com diâmetro de 0,4 ou 0,6 m, com inclinação de até 60° com a vertical, rotação que pode ser ajustada entre 0 e 100 rpm, feito em aço inoxidável e dotado de raspadores reguláveis com bico aspersor de água para o controle de vazão por válvula.

Figura 7 – Representação de um esboço esquemático de um disco



Fonte: Mourão (2017)

Figura 8 – Exemplo de disco de pelletamento industrial



Fonte: vale.com (2024)

Figura 9 – Prato pelotizador CDC, de uso em escala laboratorial



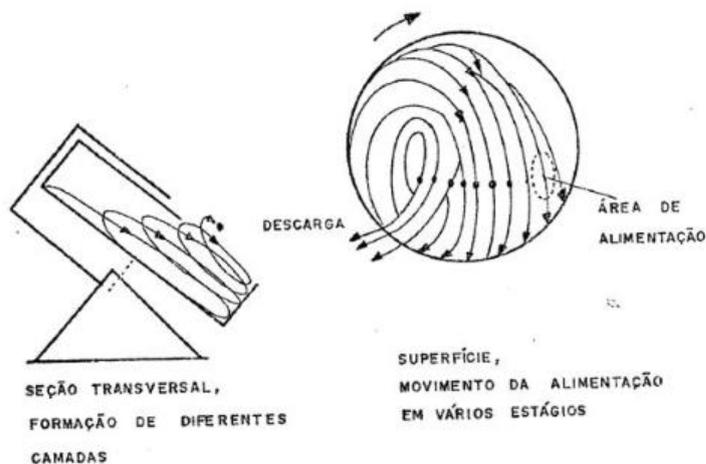
Fonte: CDC equipamentos (2024)

Os discos de pelotamento possuem um dispositivo para controle da rotação (5 a 7,6 rpm), inclinação (45 a 48°) e alimentação (140 a 200 t/h) e com diâmetro dos discos é de 7,5 m. Os mesmos possuem 4 raspadores alinhados para controle da espessura da camada de minério formada no fundo do disco, de forma a garantir boas condições para o rolamento e aglomeração do minério. O ponto de alimentação no disco também exerce grande influência na formação das pelotas e pode ser modificado. A disposição e a forma de operação do disco permitem a classificação das pelotas em função do diâmetro, devido à combinação da força centrífuga e do próprio peso das pelotas formadas, conforme ilustrado na Figura 10 (FONSECA, 2004).

Ainda segundo Fonseca (2004) a carga é alimentada numa determinada posição do disco (que pode ser alterada) e as pelotas sofrem rolamentos sucessivos sobre as partículas finas alimentadas, acarretando o aumento gradativo do diâmetro das pelotas. Os raspadores também funcionam como direcionadores de fluxo, orientando a trajetória dos aglomerados de diferentes tamanhos até sua descarga, na região oposta à região de alimentação. Após a saída dos discos, existem mesas de rolos

classificadoras, cujo objetivo é a retirada da fração abaixo de 8 mm e acima de 18 mm. O material rejeitado retorna ao silo de pelotamento.

Figura 10 – Forma de operação do disco



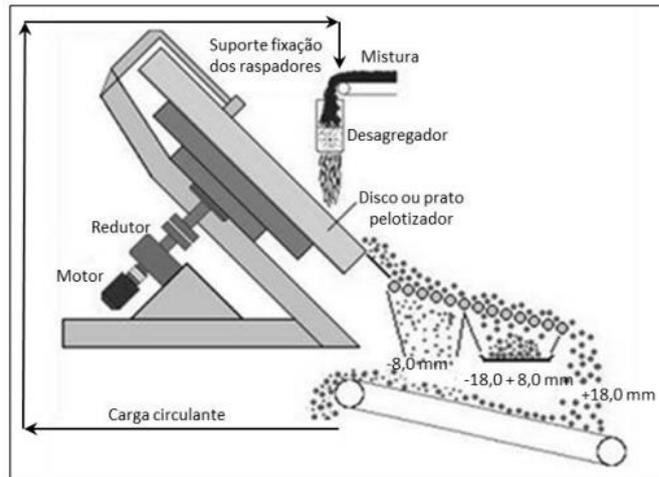
Fonte: Fonseca (2004)

A principal variável a ser controlada no disco de pelotamento é o tempo de residência do material dentro do disco pelotizador. Este tempo de residência é influenciado diretamente pelas seguintes variáveis operacionais do disco:

- ✓ Alimentação do disco (t/h);
- ✓ Velocidade de rotação (rpm);
- ✓ Inclinação (45 a 48°);
- ✓ Características do equipamento (profundidade útil, inclinação de raspadores, camada de fundo, ponto de alimentação, etc.).

Após a formação das pelotas verdes, estas são levadas para um sistema de classificação, chamado de peneira de rolos ilustrada na Figura 11, para separar as mesmas na faixa de tamanhos de interesse a ser determinada pela abertura dos rolos. Caso as pelotas se encontrem fora dessa faixa desejada, ou seja, menores que 8 e maiores que 18 mm, são diretamente recirculadas no processo, retornando primeiramente à mistura antes de serem alimentadas novamente no disco de pelotização (FONSECA, 2003).

Figura 11 – Disco de Pelotamento/Peneira de Rolos



Fonte: Fonseca (2003)

3.6 Mecanismo de formação da pelota crua

Como fatores importantes para a formação das pelotas cruas, podemos citar a forma, o tamanho médio, a mineralogia, distribuição granulométrica do minério e aditivos, a estrutura de poros, a molhabilidade das partículas, o teor de umidade, as características químicas da mistura, o tipo e quantidade do aglomerante utilizado, as condições operacionais dos equipamentos utilizados, os parâmetros operacionais (inclinação, tempo de residência, rotação), etc. (FONSECA, 2004).

E entre todas as etapas de produção das pelotas, a formação dos aglomerados no equipamento é a etapa mais difícil de ser controlada. Isso ocorre porque as características relacionadas à forma e ao tamanho são variáveis, interferindo na quantidade de água necessária na etapa de pelotamento. O tamanho das pelotas cruas pode ser ajustado, através das variáveis de controle nessa operação, tais como: taxa de alimentação, inclinação, velocidade do disco, dentre outras (MOURÃO, 2017). Ainda segundo Mourão (2017), para a formação das pelotas cruas, nos discos ou tambores de pelotamento, o teor de umidade da mistura de minério de ferro e aditivos deve ser ajustado ao ponto ótimo (8% a 10%). Um valor aquém desse ponto conduz à formação de pelotas cruas de qualidade inferior e à perda de produtividade no pelotamento. Por outro lado, um excesso de umidade prejudica a etapa seguinte de queima das pelotas, pois esse excedente tem de ser evaporado, causando aumento do consumo de energia térmica no forno.

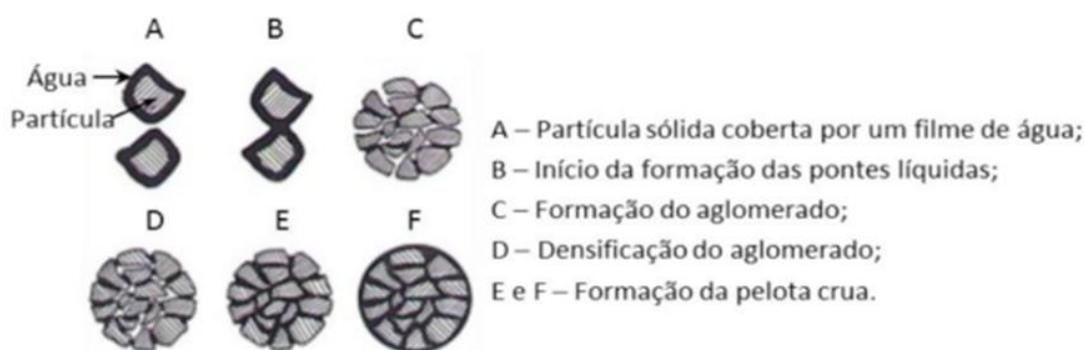
O fenômeno de formação das pelotas cruas envolve além da fase sólida, composta por *pellet feed* e aditivos, uma fase líquida, a água. As forças interfaciais que surgem entre os constituintes/água tem um efeito coesivo entre as partículas de sólido - líquido - ar. Essas forças interfaciais consistem na tensão superficial do líquido e nas forças capilares atuantes sobre as superfícies côncavas das

pontes líquidas formadas entre as partículas que compõem o aglomerado (MEYER, 1980).

Nas situações em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota (constituindo poros externos), a sucção capilar desenvolvida na interface ar/água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas unidas.

Conforme descrito na Figura 12, as partículas da mistura para a pelletização, envolvidas por um filme de água (A), tocam umas nas outras. Devido à tensão superficial do filme de água, pontes de líquido são formadas (B) e como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelletização e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (C). Mais e mais água é depositada no interior e os aglomerados tornam-se mais densos (D). Neste estágio da formação das pelotas, as forças capilares das pontes líquidas individuais estão essencialmente ativas. O ótimo desta fase de formação das pelotas é alcançado, quando todos os poros dentro das mesmas são preenchidos com o líquido, mas ainda não reveste completamente o aglomerado (E). O estágio final é obtido quando as partículas sólidas estão completamente cobertas pelo filme de água. A tensão superficial das gotas de água que mantém as partículas sólidas torna-se inteiramente ativa (F) e o efeito das forças capilares reduz drasticamente (FONSECA, 2004).

Figura 12 – Mecanismo de formação da pelota crua



Fonte: Fonseca (2004)

De acordo com estudos realizados por Mourão (2017), os fatores mais importantes na formação e nas propriedades das pelotas cruas são:

Forças Físicas: forças físicas desempenham um papel importante na aglomeração das partículas durante o processo de pelletização. Entre essas forças, destacam-se as forças de Van der Waals, as forças magnéticas e as forças eletrostáticas. As forças de Van der Waals são forças atrativas de curto alcance entre moléculas e partículas, que podem ajudar a unir as partículas durante a aglomeração. As forças magnéticas, em casos específicos onde o minério é ferromagnético, podem contribuir para a formação das pelotas. Já as forças eletrostáticas surgem devido às cargas elétricas

nas partículas, podendo favorecer ou inibir a aglomeração, dependendo da sua natureza;

Fatores Dependentes das Partículas: as características das partículas de minério de ferro também exercem influência significativa no processo de pelletização. Fatores como área superficial, forma, estrutura cristalina e distribuição granulométrica desempenham papéis críticos na aglomeração das partículas. Uma maior área superficial pode facilitar a adesão e a aglomeração das partículas, enquanto uma distribuição granulométrica adequada contribui para a formação de pelotas mais uniformes. Além disso, a forma das partículas e a estrutura cristalina podem influenciar as interações entre elas e afetar a resistência e integridade das pelotas formadas;

Forças Capilares e Tensões Superficiais: a adição de água ao processo de pelletização é essencial para a formação das pelotas. A água atua como um agente aglomerante, facilitando as interações entre as partículas e permitindo a formação das pelotas "verdes". As forças capilares surgem devido à atração entre a água e as partículas do minério, contribuindo para a coesão entre elas. As tensões superficiais, por sua vez, surgem na interface entre a água e as partículas, influenciando a forma e a estrutura das pelotas durante o processo de formação.

Durante a formação das pelotas, pelo efeito da capilaridade, a água percola, ou seja, penetra através dos vazios e se aloja nos poros dos grãos dos minérios, preenchendo os interstícios entre as partículas sólidas e revestindo cada grão. Forma-se, então, um sistema capilar. Na aproximação de dois grãos ocorre o contato das películas aquosas que os revestem, situação em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota (constituindo poros externos), e a sucção capilar desenvolvida na interface ar/água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas coesas (FONSECA, 2004).

3.7 Insumos

Insumos podem ser definidos, de acordo com site do dicionário online de língua portuguesa, como “cada um dos materiais fundamentais para o desenvolvimento ou para a produção de algo (matéria-prima, força de trabalho, consumo de energia, equipamentos, mão de obra, entre outros)”, ou seja, material utilizado na produção industrial.

Na pelletização de minério de ferro, três principais tipos de insumos são utilizados: aglomerantes, fundentes e combustíveis sólidos. Cada um desempenha um papel fundamental no processo de produção de pelotas de minério de ferro. Iremos analisar brevemente cada um deles. Na Tabela 1 está apresentada as características químicas típicas dos insumos empregados em pelletização e sua dosagem típica (kg/t pelota).

Tabela 1 - Características químicas típicas dos insumos empregados em pelletização e sua dosagem típica (kg/t pelota).

FUNÇÃO	INSUMO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	PPC	Dosagem (kg/t pelota)
FUNDENTES	CALCÁRIO CALCÍTICO	4,0	0,7	49,5	3,35	40,83	13,0
	CALCÁRIO DOLOMÍTICO	3,35	0,2	37,4	17,7	42,9	18,0
AGLOMERANTE	BENTONITA	54,0	15,5	1,0	2,3	8,7	5,0

COMBUSTÍVEL SÓLIDO	COQUE	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	S (%)	Poder Calorífico (kcal/kg)	Dosagem Típica (kg/t pelota)
		89,6	9,8	0,6	1,8	7890	12,0

Fonte: adaptado de Lingstan, Yang e Lu (1983)

3.7.1 Aglomerantes

Como sabido, o processo de aglomeração combina partículas pequenas em agregados maiores. Durante a pelletização, partículas concentradas do minério de ferro úmidas são envoltas em forma de pelotas com o auxílio de aglomerantes. Os ligantes, tipicamente bentonita ou material orgânico, segundo Halt e Kawatra (2013), são aglomerantes responsáveis por manterem as pelotas unidas e facilitarem o processo de pelletização.

Ainda segundo os autores, nas pelotas verdes, os ligantes interagem com a água e as partículas de minério por meio de forças capilares e viscosas, e são utilizados principalmente pelas seguintes razões: ajudam no controle do transporte da umidade durante o processo de pelletização, pois os ligantes aumentam a viscosidade do líquido no interior das pelotas e diminuem o transporte deste líquido do interior para a superfície das pelotas verdes. Esta ação controla a taxa de crescimento das pelotas verdes que é dependente da umidade livre encontrada na superfície das pelotas.

Segundo Lima e Chaves (1993), os aglomerantes são utilizados no processo de pelletização para auxiliar a formação e manutenção das pelotas e melhorar suas características durante o tratamento térmico, evitando que estas entrem em colapso. Devem ainda melhorar as qualidades finais das pelotas tratadas termicamente, seja pelo aumento da resistência mecânica, seja pela melhora das características de redutibilidade. O aglomerante deve exercer ainda as seguintes funções:

- ✓ Aumentar a resistência mecânica das pelotas “verdes”;
- ✓ Incrementar a resistência ao choque térmico nas etapas de secagem e tratamento térmico; e
- ✓ Possibilitar a formação de compostos químicos de interesse nas etapas posteriores.

3.7.2 Bentonita

No processo de pelletização, o aglomerante mais utilizado é a bentonita (Figura 13), de origem inorgânica. Esse insumo, devido principalmente aos elevados teores de sílica, favorece a redução do

teor de ferro das pelotas para redução direta. Alguns pesquisadores afirmam que no caso específico da bentonita, ela ajuda na etapa do processo de secagem, facilitando o transporte da água do centro para a periferia da pelota (RESENDE et al., 2014).

A bentonita é o nome genérico das argilas montmorilonita (Figura 13), constituídas essencialmente de minerais do grupo das esmectitas, independentemente de sua origem ou ocorrência, conforme descrito em Porto e Aranha (2010).

O arranjo cristalino da montmorilonita está organizado em várias camadas, as quais são capazes de absorver abundância de água. A água é parte substancial da bentonita, está presente na forma de moléculas de H₂O e grupos hidroxilas (OH⁻).

Figura 13 – Figura ilustrativa da bentonita



Fonte: elaborado pelo autor

A montmorilonita tem a propriedade de possuir água nos intervalos de sua estrutura cristalina. Isto está relacionado com a característica típica de inchamento da bentonita, que é de grande importância para o pelletamento, porque melhora a coesão das partículas na pelota (SABINO et al., 2016). Ainda segundo o autor, a melhor bentonita usada como aglomerante é a bentonita sódica natural, com alta percentagem de montmorilonita. Para este tipo de material, uma dosagem de 0,5% ou 5 kg/t mistura no processo é suficiente para um bom desempenho na aglomeração dos finos.

Na determinação da sua composição química aparecem como elementos essenciais a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃), além de óxidos de ferro (Fe₂O₃), magnésio (MgO), cálcio (CaO), sódio (Na₂O), potássio (K₂O) e outros, como também quantidades variáveis de água na estrutura.

Contudo, sua utilização apresenta algumas restrições, uma vez que os compostos inorgânicos presentes na bentonita, tais como a sílica e alumina, tendem a reduzir o percentual de ferro da pelota aumentando os custos operacionais, uma vez que demandam maiores cuidados com manuseio e transporte. Também promovem o aumento do consumo energético, além de introduzir contaminantes

à pelota como (SiO_2 e Al_2O_3) (SABINO et al., 2016). Como uma alternativa para o problema da ganga gerada nas pelotas, tem-se a bentonita sódica superativada que confere ao produto final uma menor incorporação de ganga ácida, a quantidade dosada na etapa da mistura é menor (evitando o problema com estocagem) e otimização da segurança (devido baixa dosagem no processo).

De acordo com Ripke (2002), a bentonita aumenta a resistência das pelotas de minério de ferro por dois motivos. Primeiramente, pela ação do material coloidal que diminui as distâncias entre partículas e, então, aumenta a força de Van der Waals. Segundo, forma uma ligação sólida pelo gel endurecido, que gera resistência das partículas nos pontos de contato.

A adição de bentonita durante a fase de mistura confere resistência aos *pellets* crus, garantindo a manutenção de sua forma durante todo o processo de pelotização e subseqüentes etapas de manuseio. Além disso, segundo Tavares (2002), essa característica desempenha um papel vital ao garantir que as pelotas resistam às quedas até adentrar o forno. O trajeto de manipulação das pelotas verdes compreende transferências em diferentes níveis, sujeitas a quedas e impactos. Nestes pontos, é observável uma prevalência maior de degradação das pelotas. O efeito preponderante dessas sucessivas quedas é a geração de fissuras que comprometem a estrutura das pelotas, culminando na produção de partículas finas e, por conseguinte, na diminuição da sua resistência física.

3.7.3 Fundentes

Os fundentes desempenham um papel crucial no aprimoramento das características do minério de ferro durante o ciclo de pelotização e na subseqüente produção de ferro-gusa. Sua presença promove a fusão e a formação de uma escória líquida no decorrer da etapa de redução do minério nas instalações siderúrgicas, facilitando assim a eliminação de impurezas e cinzas indesejáveis ao processo. Dentre os fundentes comuns, destaca-se o calcário, que é amplamente escolhido devido à sua alta disponibilidade e baixo custo (SIQUEIRA, 2017).

Segundo Fonseca (2004) o calcário é fundamental para o endurecimento das pelotas através da formação das fases escorificadas que fortalecerão as ligações entre as partículas de minérios, fornece o óxido de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) incorporados ao processo por permitirem a correção química das pelotas em controle de basicidade.

Durante o aquecimento das pelotas, no processo de queima, ocorre calcinação do calcário (CaCO_3), através da reação $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, liberando dióxido de carbono (CO_2). A liberação de CO_2 possibilita a geração de poros e trincas na secagem devido à expansão volumétrica deste gás (LINGSTAN et al., 1983). O monóxido de cálcio formado (CaO) reage com o minério de ferro (Fe_2O_3), formando compostos denominados ferritos de cálcio (CF), de baixo ponto de fusão, os quais

se mantém líquidos nas temperaturas de queima, fluindo imediatamente pelos capilares existentes no interior das pelotas, devido a tensão superficial e/ou forças de capilaridade. Na pelotização, aumentar a basicidade das pelotas implica em aumento de custo operacional e queda no teor de ferro (queda no preço de venda, em base %Fe). Para tal, há de se fazer maior dosagem de fundentes básicos (CaO + MgO). Além do custo desses materiais, há uma redução no desempenho do forno de queima, com aumento nos consumos de energia e queda na produtividade (t/m²/h). Por outro lado, como essa escória básica beneficia o desempenho das pelotas no alto-forno e na redução direta, há um valor adicionado às pelotas que deve ser explorado pelos produtores (*value-in-use*) (MOURÃO, 2017).

Baseando-se na concentração de MgO, a Secretaria de Fiscalização Agropecuária, citada por NAHASS e SEVERINO (2008), classifica os tipos de calcário em:

- ✓ Calcítico - teor de MgO inferior a 5%;
- ✓ Magnesiano - teor de MgO entre 5 e 12%;
- ✓ Dolomítico - teor de MgO superior a 12%.

Os compostos calcários encontrados na natureza estão geralmente associados ao quartzo e a silicatos como a argila, como o calcário calcítico e dolomítico (Figura 14).

Sendo assim, a utilização do calcário é desejada para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas as etapas subsequentes. A seguir será abordado os principais fundentes utilizados no processo.

Figura 14 – Figura ilustrativa do calcário calcítico e dolomítico



Fonte: elaborado pelo autor

3.7.4 *Calcário Calcítico (CaCO₃)*

Segundo Mourão (2017) o calcário calcítico (CaCO₃) é a fonte principal de CaO e o mais demandado no mercado, havendo grandes reservas e disponibilidade. Sendo básico, o CaO corrige a acidez da pelota, conferindo-lhe propriedades físicas e metalúrgicas adequadas ao uso nos reatores siderúrgicos. O controle de dosagem é função do índice de basicidade binária especificado, caracterizado pela relação CaO/SiO₂ na pelota queimada. Segundo Sabino et al. (2016) o CaCO₃ é fundamental no processo físico-químico de formação dos compostos que irão favorecer a geração de uma ganga ácida nas temperaturas mais baixas, fortalecendo a ligação entre os grãos de minério. Observou-se também que através da adição de calcário calcítico, é feito o controle do índice de basicidade, uma vez que possuem grande teor de MgO, CaO em suas composições químicas, respectivamente, e possuem menor influência no custo final da pelota queimada. Assim, esse insumo é utilizado para a produção de pelotas de alto-forno. A sua dosagem é de aproximadamente 13 kg por tonelada de minério, o que equivale a uma dosagem de 1,13%.

Para Fonseca (2004) esse carbonato é insolúvel em água e por isso não apresenta efeito aglomerante na etapa de formação da pelota crua. Sua adição visa à neutralização da ganga ácida e influencia na temperatura de formação das fases líquidas durante a etapa de endurecimento, impactando nas características físicas e metalúrgicas da pelota.

3.7.5 *Calcário dolomítico (CaMg(CO₃))₂*

Segundo Mourão (2017) 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 pelotização. A disponibilidade e reservas são também muito grandes.

De acordo com Romano et al. (1956) o calcário dolomítico apresenta um teor elevado em magnésio, 25-30% em CaO e 15-20% em MgO. A opção pelo uso calcário dolomítico é necessária quando um maior teor de MgO é exigido na especificação da pelota queimada. Observou-se também que quando o MgO é adicionado à pelota, a temperatura de queima pode ser elevada sem o perigo de fusão das pelotas e atuará melhorando as propriedades das pelotas durante o processo de redução, pela formação de gangas com ponto de fusão mais elevados, assim o consumo de carvão pode ser menor em virtude da melhoria das propriedades das pelotas. Este insumo é utilizado na produção de pelotas de redução direta. A dosagem é de aproximadamente 18,5 kg por tonelada de minério, o que equivale a uma percentagem de 1,85%.

3.7.6 Combustível sólido

Segundo Machado (2012) o combustível sólido é usado, em mistura com o minério e fundentes, como fonte energética de menor custo na produção das pelotas de minério de ferro, para reduzir o consumo de óleo combustível no forno. Além de ser um importante fator energético, o combustível sólido proporciona uma melhor distribuição de calor na pelota durante a etapa de queima, contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como aumento de produtividade do processo. Ele também contribui na formação de poros nas pelotas em virtude da liberação de gás durante a queima.

A queima desses combustíveis em fornos ou grelhas aquece as partículas de minério e promove a sinterização e endurecimento dos *pellets*. Além disso, a energia térmica é necessária para secar e pré-aquecer o minério antes da pelotização (FONSECA, 2004).

No processo de pelotização podem ser utilizados vários tipos de carvões como aditivos energéticos sólidos dependendo de estudos de influências na qualidade e facilidades para o processo, além da disponibilidade para o fornecimento. Dentre os combustíveis utilizados, o coque de petróleo se destaca devido ao seu alto poder calorífico e disponibilidade, o carvão mineral (antracito) pode ser usado como alternativa ao coque de petróleo, dependendo da disponibilidade regional e das considerações ambientais (MOURÃO, 2017). Neste presente trabalho foi utilizado o coque apenas com intuito de elevar a dosagem de carbono fixo e verificar o impacto do coque nos resultados de ensaio de compressão.

3.7.7 Coque

O coque (Figura 15) é derivado do carvão mineral por meio do processo conhecido como coqueificação, no qual o carvão mineral é submetido a temperaturas elevadas sem a presença de oxigênio. Esse processo resulta na formação de coque, um resíduo sólido e poroso gerado após a queima. O coque desempenha um papel fundamental como matéria-prima combustível nos altos-fornos, sendo crucial na produção de aço (FONSECA, 2004). Ainda segundo o autor, a principal finalidade da adição de carvão é a introdução de energia térmica no processo de endurecimento da pelota, resultando em uma redução parcial do consumo de óleo combustível do forno. Além de ser um importante fator energético, o carvão proporciona uma perfeita distribuição de calor na pelota durante a etapa de queima, contribuindo para uma melhoria na qualidade física da pelota, assim como aumento de produtividade do processo. Ademais, o consumo de carvão pode ser menor em virtude da melhoria das propriedades das pelotas.

Figura 15 – Figura ilustrativa do coque



Fonte: elaborado pelo autor

3.8 Influência de variáveis na pelota final

Conforme apontado por MOURÃO (2017), a qualidade da pelota resultante no processo de pelletização de minério de ferro é suscetível à influência de múltiplas variáveis ao longo de todo o procedimento.

Desta forma, é de extrema importância conhecer a influência direta dessas variáveis no resultado do processo produtivo (exemplos: natureza dos insumos, taxas de dosagem de carvão da etapa de homogeneização, distribuição granulométrica, superfície específica e umidade da polpa retida (filtrada e prensada), taxas de adição de aglomerantes na etapa de mistura, rotação e taxas de

dosagem/produção e retorno, e rotação dos discos de pelotamento, tempo de residência, e aspectos mecânicos não variáveis no tempo – posição de alimentação, da altura e posição dos raspadores, e da inclinação do disco) (MEYER, 1980). Na sequência, serão apresentadas algumas das variáveis primordiais que exercem impacto direto sobre a formação da pelota crua.

3.8.1 Distribuição granulométrica das partículas de minério do pellet feed

Um fator importante que afeta a resistência das pelotas cruas e queimadas (resistência à compressão e resiliência ou resistência a quedas) é a distribuição granulométrica do minério – variável muito importante para o controle da porosidade das pelotas. Se a distribuição granulométrica é ampla, ou seja, variando desde a fração menor que 10 µm até a fração passante em 0,044 mm, a resistência dos aglomerados é alta devido ao melhor empacotamento e ao grande número de pontos de contato, alterando a porosidade dos aglomerados (o que influencia nas propriedades das pelotas queimadas) (CETEM, 2010). Partículas muito finas, durante a formação das pelotas, ocupam os espaços vazios (poros) dos aglomerados, reduzindo os interstícios e as ramificações capilares do sistema, favorecendo o aumento da densidade da pelota (DIAS, 2021).

3.8.2 Dosagem dos insumos

O aglomerante, devido à sua característica aglutinante, exerce uma adesão às partículas de minério durante a etapa de pelotamento, possibilitando uma maior resistência mecânica às pelotas.

De acordo com Dias (2021) a elevada dosagem de aglomerante na etapa de mistura irá secar o material, de forma que os discos de pelotamento tenderão a produzir pelotas de tamanho reduzido. Neste caso, deve-se imediatamente aumentar a rotação dos discos e/ou reduzir a produção, para adequá-la à granulometria ideal para a etapa de queima. A redução na dosagem de aglomerantes deixará o material úmido e sem resistência mecânica, o que acarretará a geração de finos e formação de cachos durante o processo de queima.

3.8.3 Umidade

O teor de umidade do minério de ferro tem um impacto significativo na formação das pelotas. Um teor de umidade inadequado pode levar à formação de pelotas desintegradas ou com problemas de resistência. O nível de umidade dos insumos está relacionado com a boa operacionalidade do sistema de moagem. O alto grau de umidade dos insumos pode dificultar ou comprometer a cominuição das partículas, afetando diretamente o percentual ideal da distribuição granulométrica (SABINO *et al.*, 2016).

Para determinar o percentual de umidade as pelotas são inicialmente pesadas para se obter a massa úmida (Peso Inicial). Em seguida são colocadas em estufas ou analisadores próprios, onde passam por um processo de secagem e depois são pesados novamente para se obter a massa da pelota

crua seca (Peso Final). A umidade da pelota crua é calculada através da equação 1 conforme o padrão ISO 3087 de 19/10/2012.

$$\text{Umidade (\%)} = 100 * (\text{Peso Inicial} - \text{Peso Final}) / \text{Peso Inicial} \dots \dots \dots (1)$$

Segundo Dias (2021) a variável umidade interfere diretamente nas forças de ligação entre as partículas, conseqüentemente na distribuição granulométrica das pelotas e em sua resistência à compressão. O aumento da umidade acelera o processo de formação da pelota, também aumentando o seu diâmetro. O aumento excessivo da umidade prejudica a qualidade das pelotas cruas (saturação dos poros), com redução da resistência à compressão e ao número de quedas, além de permitir a ocorrência de trincas durante etapa de secagem e elevar o consumo específico de combustível e energia elétrica no processo de queima.

A falta de resistência das pelotas e as variações provocam um retorno muito alto de finos. É necessário que seja evitado que estes finos entrem no forno, pois isso acarretaria a vedação do mesmo (redução da permeabilidade), com conseqüente produção de cachos. O ideal é controlar a umidade do *pellet feed*, de forma que no pelotamento haja um nível de saturação de poros que resulte em resistência à compressão aceitável ao processo (DIAS, 2021).

3.8.4 Controle de Basicidade

Esse padrão de controle de processo é utilizado para buscar uma maior uniformidade nas características químicas e metalúrgicas das pelotas. Desta forma, o índice de basicidade indica um padrão de qualidade, independentemente do tipo de minério utilizado na produção da pelota. Este índice é um valor adimensional e possui grande importância no controle da cadeia produtiva dos altos-fornos e dos fornos de redução direta, pois está ligado intimamente ao grau de inchamento da carga. Umadevi et al. (2011) realizaram estudos com pelotas de minério de ferro com basicidade binária variando de 0,08 a 1,15 com a intenção de analisar o efeito da adição de calcário (basicidade) nas propriedades microestruturais, físicas e metalúrgicas das pelotas de minério de ferro e concluíram que pelotas com basicidade de 0,33 apresentaram um bom desempenho físico bem como propriedades metalúrgicas devido às fases de ligação presentes nos pellets.

Frazer et al. (1975) estudaram o efeito da variação da basicidade no inchamento de pelotas de minério de ferro. Em seu trabalho, os autores estudaram pelotas de diversos minérios diferentes, variadas quantidades de ganga e diversas basicidades binárias. Eles separaram as pelotas em três níveis de basicidade: pelotas ácidas ($\text{CaO/SiO}_2 < 0,1$), pelotas de baixa basicidade (CaO/SiO_2 entre 0,1 e 0,8) e pelotas de alta basicidade ($\text{CaO/SiO}_2 > 0,8$). Nos casos de pelotas com baixa basicidade e pelotas ácidas, há pouca recristalização das partículas de hematita e a estrutura de poros permanece aberta e há pouco contato entre as partículas. Segundo os autores, não ocorre reação entre a sílica

presente e as partículas de hematita.

De acordo com as equações 2, 3 e 4 existem tipos de relação de basicidade que podem ser utilizados pelas equipes de controle de processo.

- ✓ Basicidade quaternária: considera o percentual de MgO, CaO, SiO₂ e Al₂O₃ presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade quaternária} = \frac{\% \text{MgO} + \% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \dots\dots\dots(2)$$

- ✓ Basicidade ternária: considera o percentual de MgO, CaO, e SiO₂ presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade ternária} = \frac{\% \text{MgO} + \% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2} \dots\dots\dots(3)$$

- ✓ Basicidade binária: considera o percentual de CaO e SiO₂ presentes na pelota e tem a seguinte relação:

$$\text{Basicidade binária} = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2} \dots\dots\dots(4)$$

Na prática, normalmente, o controle do índice de basicidade é controlado ou ajustado através da adição de calcário calcítico, uma vez que possuem grande teor de MgO, CaO em suas composições químicas, respectivamente, e possuem menor influência no custo final da pelota queimada.

3.9 Caracterização das pelotas

Os parâmetros mais usuais para caracterizar a qualidade de pelotas são obtidos por análises químicas, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos (MEYER, 1980; KANAYAMA et al., 1983; ARAGÃO et al., 2000). Nas análises químicas, são obtidos os percentuais dos principais elementos químicos e alguns compostos que formam a estrutura das pelotas. Nos ensaios físicos, procura-se avaliar a granulometria e a resistência física das pelotas para resistir ao manuseio desde a produção até o seu carregamento nos altos-fornos. Nos ensaios metalúrgicos, procura-se avaliar o comportamento das pelotas durante a redução nos altos-fornos e nos reatores de redução direta. Para a realização destes ensaios, são seguidos padrões adotados mundialmente. A seguir são descritos os principais padrões ISO (*International Organization for Standardization*) adotados para a realização de ensaios físicos e ensaios metalúrgicos em pelotas de minério de ferro. A Tabela 2 apresenta dados típicos de análise química, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos de pelotas de minério de ferro comercializadas no mercado transoceânico.

Tabela 2 - Dados típicos de análise química, ensaios físicos e ensaios metalúrgicos de pelotas

Composição (%)		Pelotas para Alto-Forno	Pelotas para Redução Direta
Análise química			
Fe	ISO2597	64,5 a 67,2	66,7 a 67,7
SiO ₂	ISO11535 ou ISO2598	2,0 a 5,0	1,2 a 1,5
Al ₂ O ₃	ISO11535	0,45 a 1,45	0,45 a 0,55
CaO	ISO11535	1,0 a 2,65	0,8 a 1,60
MgO	ISO11535	0,1 a 1,0	0,1 a 1,0
P	ISO4687	0,030 a 0,060	0,030 a 0,040
S	ISO9686	0,001 a 0,005	0,001 a 0,003
Basicidade Binária	(%CaO/%SiO ₂)	0,25 a 1,10	0,50 a 1,10
Ensaio Físicos			
Resistência a Compressão (kgf/pelota)	ISO4700	250 a 350	250 a 350
Índice de Abrasão	ISO3271	3,5 a 6,0	3,5 a 6,0
(%-0,5mm)			
Índice de Tamboramento	ISO3271	93,5 a 96,0	93,5 a 96,0
(%+6,3mm)			
-16mm+8mm (%)	ISO4701	85,0 a 95,0	88,0 – 95,0
-6,3mm (%)	ISO4701	2,0 a 5,0	2,0 a 5,0
Ensaio Metalúrgicos			
LTD(+6,3mm)	ISO13930	75 a 88	-
LTD(-0,5mm)	ISO13930	6 a 12	-
dR/dt	ISO7992	1,0 a 1,6	-
DeltaP (mmH ₂ O)	ISO7992	10 a 15	-
Inchamento (%)	ISO4698	15 a 20	-
Metalização(%)	ISO11257	-	94 a 97
Clustering (%)	ISO11256	-	12 a 20

Fonte: Meyer (1980) adaptado de Cetem, 2010.

3.9.1 Porcentagem de Carbono fixo

Segundo FONSECA (2004), dependendo da composição do combustível sólido, pode-se obter até 78% de carbono fixo, que é um elemento químico com alto poder de liberação calorífica. Carbono fixo é a quantidade de carbono, resíduo combustível, que ficou retida após a liberação do material volátil. Essa propriedade é utilizada para fornecer mais energia ao processo de queima da pelota, gerando economia direta no consumo de gás dentro do processo e consequentemente redução no custo específico da pelota. Por outro lado, a incorporação do mesmo é limitada devido à sua influência na redução dos índices de compressão da pelota, quando adicionados acima de determinados limites.

As tentativas das plantas de pelletização de encontrar mais alternativas de insumos para a utilização em seus processos, são fundamentadas em algumas estratégias, entre as quais se destaca a diminuição dos consumos e custos específicos de insumos por tonelada de pelota (SABINO et al., 2016). Ainda segundo o autor os relatórios da qualidade do material recebido pelas usinas de beneficiamento devem ser analisados a todo momento por técnicos especializados. A qualidade do *pellet feed* tem grande influência na formação das pelotas, e as variáveis como: umidade, densidade, superfície específica, % de carbono fixo, sílica e outros contaminantes são altamente controladas e podem modificar a qualidade da pelota final.

3.10 Atuação do Disco de Pelotização

A variação de velocidade de rotação interfere diretamente no ajuste da granulometria das pelotas cruas. Aumentando a rotação do disco, o percurso do material em seu interior será maior, devido ao aumento da força centrífuga criada sobre as pelotas em movimento. O tempo de residência para formação da pelota será maior, aumentando a captação de partículas de minério, e conseqüentemente, o tamanho das pelotas. Quando a rotação do disco é reduzida, o percurso do material em seu interior é menor, fazendo com que o tamanho das pelotas diminua. Rotações muito baixas tendem a causar aglomeração de material no disco, gerando pelotas malformadas e pequenas. Já na situação inversa aumenta-se significativamente a carga constante de material no disco, podendo causar sobrecarga no motor de acionamento (DIAS, 2021).

Igualmente à rotação, a taxa de alimentação influencia diretamente no tempo de residência do minério para a formação das pelotas. Elevadas taxas de alimentação geram pelotas fora do tamanho desejado, com menor resistência e que se desfazem no momento seguinte à saída do disco, gerando assim, partículas finas (CETEM, 2010).

A qualidade intrínseca das pelotas desempenha um papel vital na eficiência da produção de aço, assegurando a conformidade do produto final com os requisitos estabelecidos pelo mercado siderúrgico, como ilustrado na Figura 16.

A busca por tais objetivos afim de alcançar a melhor qualidade das pelotas implica na adoção de uma abordagem abrangente e que engloba todas as normas ISO pertinentes, exercendo um impacto significativo na regulação e aprimoramento do processo de produção de concentrado minério de ferro. Essa abordagem tem como foco a qualidade, a segurança e a conformidade com padrões internacionais (MOURÃO, 2017). Algumas ISO's comuns e suas funções incluem:

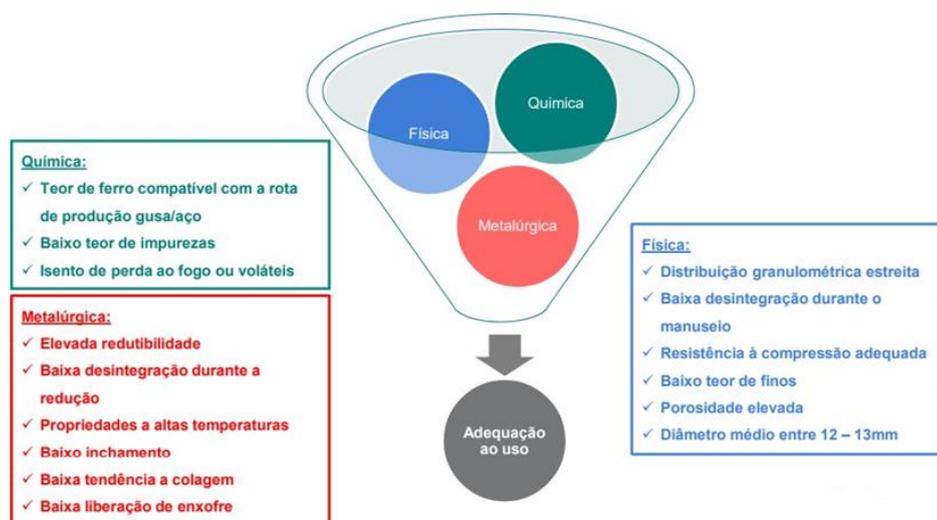
- ISO 9001 - Sistema de Gestão da Qualidade: Esta norma estabelece os requisitos para um sistema de gestão da qualidade, abrangendo etapas como mineração, beneficiamento e manuseio do minério de ferro. Seu objetivo é garantir melhoria contínua e conformidade com padrões internacionais.
- ISO 14001 - Sistema de Gestão Ambiental: A ISO 14001 define critérios para um sistema de gestão ambiental eficaz, sendo relevante para a indústria do minério de ferro ao contribuir para a redução de impactos ambientais e a adoção de práticas sustentáveis.
- ISO 45001 - Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional: Essa norma aborda questões de saúde e segurança no ambiente de trabalho. No setor de minério de ferro, onde a segurança é primordial devido às atividades de mineração e processamento, a ISO 45001 desempenha um papel fundamental na prevenção de acidentes e na promoção de um ambiente seguro.
- ISO 3082 - Amostragem de Minério de Ferro e Produtos de Diferentes Tamanhos Essa ISO

estabelece diretrizes para amostragem representativa de minério de ferro e produtos relacionados, contribuindo para a precisão das análises e resultados de qualidade.

- ISO 4700 - Determinação do Índice de Redutibilidade em Pelotas de Minério de Ferro Reduzidas em Leito Fixo: Essa norma aborda a determinação do índice de redutibilidade em pelotas de minério de ferro, avaliando sua aptidão para processos de redução em leito fixo.
- ISO 3271 - Minério de Ferro e Produtos de Ferro - Determinação do Índice de Solidez sob Redução Direta: Essa ISO especifica o método para determinar a solidez de minério de ferro e produtos de ferro sob redução direta, um aspecto crucial para o processamento subsequente.
- ISO 4695 - Minério de Ferro e Produtos de Ferro - Determinação do Ensaio Tumble: A ISO 4695 trata do ensaio de tambor para minério de ferro, utilizado para avaliar a resistência ao desgaste durante o manuseio e transporte.

As normas técnicas e regulamentações relevantes para a produção de pelotas, como aquelas estabelecidas por órgãos como a ABNT e a ISO, também guiam a seleção dos insumos. A escolha dos insumos no processo de pelotização de minério de ferro é um processo multifacetado que envolve a consideração de propriedades do minério, finalidade das pelotas, testes, custos e experiência, tudo isso visando produzir pelotas de alta qualidade de forma eficaz e econômica. Cada uma dessas normas ISO desempenha um papel crucial na regulação e otimização do processo de produção de minério de ferro, garantindo qualidade, segurança e conformidade com padrões internacionais (MOURÃO, 2017).

Figura 16 – Requisitos básicos para boa qualidade das pelotas de minério de ferro



Fonte: elaborado pelo autor

4 MATERIAIS E METÓDOS

Nesse capítulo serão descritos os materiais, os equipamentos e a metodologia da pesquisa e a metodologia experimental utilizada para a condução dos experimentos realizados em escala de bancada para atender o objetivo do estudo. Diante disso, a pesquisa será aplicada, quanto aos objetivos é exploratória, a abordagem é quantitativa, os procedimentos são experimentais e levantamento bibliográfico por meio de técnicas e descrição dos dados utilizando o método hipotético-dedutivo e raciocínio lógico para levantar hipóteses sobre o problema levantado. Quanto ao campo de ciência, ou seja, quanto as disciplinas estudadas, trata-se de uma pesquisa interdisciplinar. Por fim, a pesquisa objetiva é um importante instrumento de conhecimento e informação para profissionais da área, e mais especificamente da área de processamento mineral.

Para a execução desse trabalho foi utilizada uma amostra de minério de ferro *pellet feed* proveniente de uma mina localizada na região de Itabirito em Minas Gerais, Herculano Mineração. A principal atividade da Herculano Mineração consiste na extração, beneficiamento e comercialização de minério de ferro e minério de ferro-manganês. Seus principais produtos compreendem *pellet feed*, *sínter feed*, hematitinha e granulado.

O trabalho foi estruturado em duas fases distintas, sendo a primeira fase denominada de caracterização das amostras (*pellet feed* e os insumos escolhidos), nessa etapa, diversas atividades foram executadas de forma sistemática. A amostra de *pellet feed*, já caracterizada quimicamente e com granulometria adequada ao processo de pelletização, foi submetida ao processo de preparação e secagem para reduzir a umidade ao nível de especificação.

Posteriormente, ocorreu a etapa de homogeneização, com o intuito de assegurar que a amostra fosse representativa e livre de variações internas. Em seguida, o quarteamento foi realizado, resultando em porções menores representativas da amostra principal. A análise do teor de umidade e a picnometria foram conduzidas em triplicata, visando obter dados precisos e confiáveis. Além disso, a análise granulométrica foi realizada em duplicata, proporcionando uma avaliação mais abrangente das características da amostra. Todos esses procedimentos foram conduzidos meticulosamente no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG.

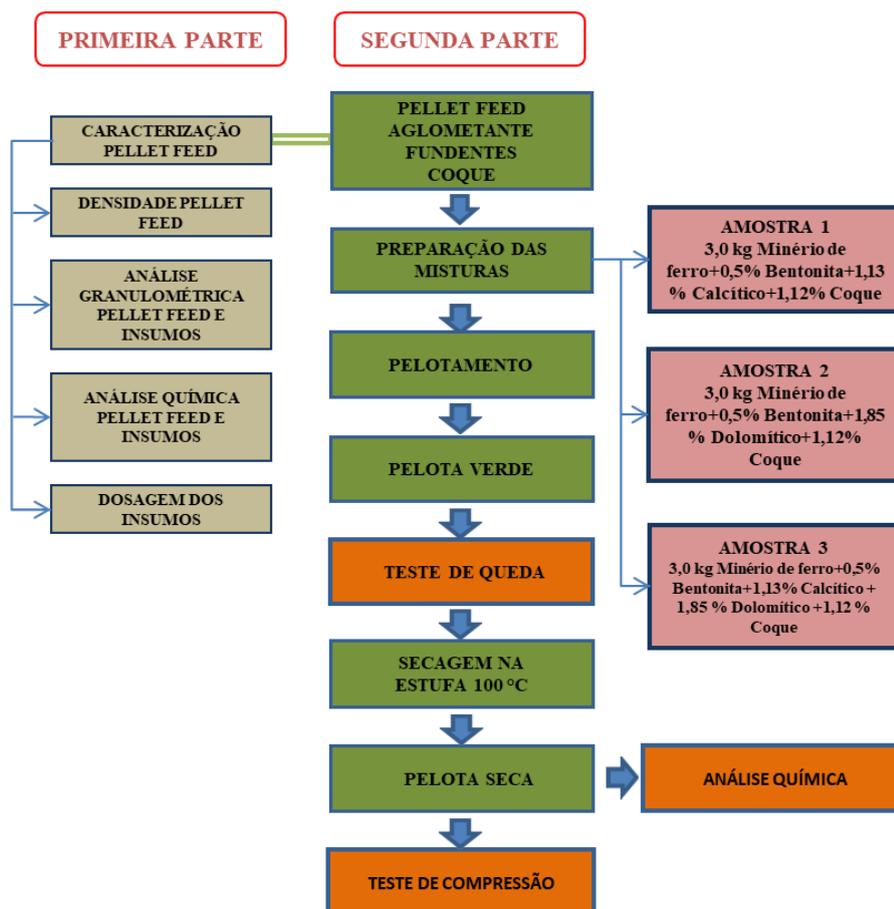
Logo em seguida foram realizadas a preparação e caracterização dos insumos, provenientes da Mina Pau Branco, uma mina localizada na região de Nova Lima em Minas Gerias e pertencente a empresa Vallourec Mineração. A moagem do coque foi conduzida no laboratório de tratamento de minérios da Vallourec, assim como as análises granulométricas de todos os insumos.

Foram realizadas as dosagens dos insumos previamente escolhidos, sendo eles: bentonita, calcário calcítico, calcário dolomítico e coque juntamente com o *pellet feed* nas proporções

adequadas.

A segunda fase do estudo foi denominada de "processo de aglomeração", nessa etapa foi realizado o processo de pelletização em escala de bancada, utilizando o *pellet feed* juntamente com os insumos usuais da mineração. Esta parte específica do estudo foi conduzida no Laboratório de Beneficiamento de Minério da PUC-MG, Unidade Coração Eucarístico, onde foram analisados os efeitos da aglomeração com base nas composições definidas, posteriormente os testes de resistência e análise química foram realizados na pelota seca. A (Figura 17) mostra um fluxograma das etapas.

Figura 17 - Fluxograma das etapas.



Fonte: elaborado pelo autor

4.1 Caracterização das amostras e Preparação do *pellet feed*

Inicialmente a amostra passou pela etapa de secagem. A amostra foi recebida em estado úmido, contida em um saco de aproximadamente 20 kg. Em virtude disso procedeu-se à etapa de secagem do material. Para essa finalidade, o material foi distribuído em quatro bandejas distintas e devidamente pesado e mantido na estufa por 24 horas, a uma temperatura de 100°C.

Após a secagem do material, a amostra foi novamente pesada, permitindo assim a determinação da umidade, através da equação 5.

$$\%Umidade = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

Onde :

Mu = Massa do corpo úmida (g);

Ms = Massa do corpo seca (g).

Após a secagem resultou-se em uma quantidade de massa seca de aproximadamente 18 kg, para obtenção da amostra final realizou-se a homogeneização e quarteamento com auxílio de quarteador jones, sendo necessário dividir a amostra primária em alíquotas de menor massa. Sendo assim, no processo foram dividido em 9 alíquotas de 2 kg e posteriormente subdivididos em 18 alíquotas de 1kg para contribuir nas etapas subseqüentes.

Logo em seguida, dentre essas 18 alíquotas foi separado uma para ser utilizada nos outros testes, sendo assim foi feito novamente a homogeneização por meio da construção de uma pilha alongada de 50 centímetros com uso de lona conforme ilustrado na Figura 18. Após finalizada, foram coletadas amostras para os ensaios de picnometria e caracterização granulométrica.

Figura 18 – Pilha alongada



Fonte: elaborada pelo autor

4.2 Caracterização do *pellet feed*

Já dentro da etapa de caracterização foram realizados ensaios para verificar densidade, granulometria e composição química das amostras. A Tabela 3 lista os equipamentos utilizados para tais ensaios. Cabe ressaltar que a análise química da amostra foi realizada na empresa colaboradora Herculano Mineração, também foi disponibilizado pela mesma uma análise granulométrica utilizando uma massa total de 500g, e as peneiras utilizadas foram em mesh(#):

16, 20, 32, 60, 100, 150, 200, 250, 325 e 400. Após esse processo pesou-se cada fração para a construção da curva granulométrica, assim foi possível comparar com a análise realizada em laboratório do CEFET.

Tabela 3 - Equipamentos e ensaios realizados no *pellet feed*

Equipamento	Ensaio
Peneirador suspenso	Granulometria
Picnômetro a gás ACP	Picnômetria
Espectrômetro de Fluorescência de Raios X	Análise química

Fonte: elaborada pelo autor

Para determinar o peso específico dos sólidos empregou-se o método de picnometria, esta técnica explora a variação de massa e volume de uma substância em diferentes condições para calcular sua densidade. Foram conduzidos testes utilizando tanto o frasco (balão de picnometria) quanto a medição a gás. O ensaio de picnometria utilizando o frasco foi realizado em triplicata para determinar massas específicas. O processo foi realizado até que um desvio inferior a 5% fosse encontrado.

A picnometria a gás foi realizada utilizando o equipamento Autodensity 100, com similar ilustrado na Figura 19. Foi inserido no equipamento uma amostra de 20 ml e foram realizadas 6 aferições, onde se determinou uma densidade média de 4,795 g/cm³ com um desvio de 0,486%, conforme descritos nos resultados na Tabela 10.

Figura 19 – Equipamento Autodensity 100



Fonte: (ACP Instruments)

Todas as análises granulométricas das amostras foram realizadas por meio de peneiras das marcas Granutest e a Brozinox que mais se adequaram à granulometria da amostra de minério, como mostrado na Figura 20. A análise granulométrica foi realizada em duplicata e utilizadas amostras de 150 gramas (Figuras 20a e 20b), e o método empregado foi o

peneiramento a úmido. As peneiras seleccionadas foram, em mesh(#): 60, 100, 150, 200, 250, 325 e 400. Após esse processo, pesaram-se cada fração, para a construção das curvas granulométricas.

Figura 20 – Conjunto de peneiras e massa utilizadas na análise granulométrica



Fonte: elaborada pelo autor

4.3 Preparação dos insumos

Foram utilizados os insumos: bentonita (aglomerante), calcário dolomítico e calcítico (fundentes) e coque (combustível sólido) com massa entre 2kg – 3,5kg respectivamente, (Figura 21). Todos insumos disponibilizados pela empresa Vallourec.

Segundo Fonseca (2003), o minério de ferro deve apresentar granulometria 100% passante na malha de 44 μm . Assim sendo, o coque, o qual estava fora de especificação granulométrica, foi previamente moído no moinho de disco da marca PAVITEST (Figura 22) para se adequar à carga ferrosa quanto ao critério.

Figura 21 – Insumos



Figura 22 – Moinho de disco – Contenco



Fonte: elaborada pelo autor

4.4 Caracterização dos insumos

As análises químicas foram disponibilizadas pelo laboratório químico da empresa Vallourec. Em seguida foram realizados os ensaios de análise granulométrica dos insumos por peneiramento a úmido e somente o combustível sólido, o coque, foi peneirado à seco. O conjunto de peneiras selecionadas para tais análises de granulometria foram, em mesh(#): 60, 100, 150, 200, 250, 325. Nos quatro tipos de materiais utilizou-se a mesma série de peneiras, acopladas a um agitador suspenso com frequência média de 4,5 Hz, num tempo de 10 minutos.

Após esse processo os materiais foram secos e divididos em 150 gramas para a construção da curva granulométrica.

4.5 Dosagem dos insumos

O minério utilizado nos ensaios foram separados em 3 lotes de aproximadamente 3,2 kg cada em peso de minério (Figura 23).

Figura 23 – Minério de ferro (*pellet feed*)



Fonte: elaborada pelo autor

Foram realizados 3 testes fixando o aglomerante e o coque, variando somente o tipo de fundente e mantendo as devidas proporções conforme descrito na Tabela 4. Sendo assim: o lote 1 utilizou-se o calcário calcítico, o lote 2 utilizou-se o calcário dolomítico e o lote 3 utilizou-se os dois juntos, com o intuito de auxiliar na correção da composição química das pelotas em controle de basicidade, demonstrado nas (Figuras 24, 25 e 26).

Tabela 4 – Dosagem dos insumos

	Dosagem Típica %	Lote 1	Lote 2	Lote 3
MINÉRIO DE FERRO kg	-	3.186	3.106	3.196
CALCÁRIO CALCÍTICO	1,13	35,98	-	36,11
CALCÁRIO DOLOMÍTICO	1,85	-	57,46	59,10
BENTONITA	0,5	15,92	15,53	15,98
COQUE	1,12	35,66	34,79	35,80
PESO TOTAL (kg)		3.273,56	3.213,78	3.342,99

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 24 – Dosagem do Lote 1



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 25 – Dosagem do Lote 2



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 26 – Dosagem do Lote 3



Fonte: elaborada pelo autor

4.6 Processo de aglomeração

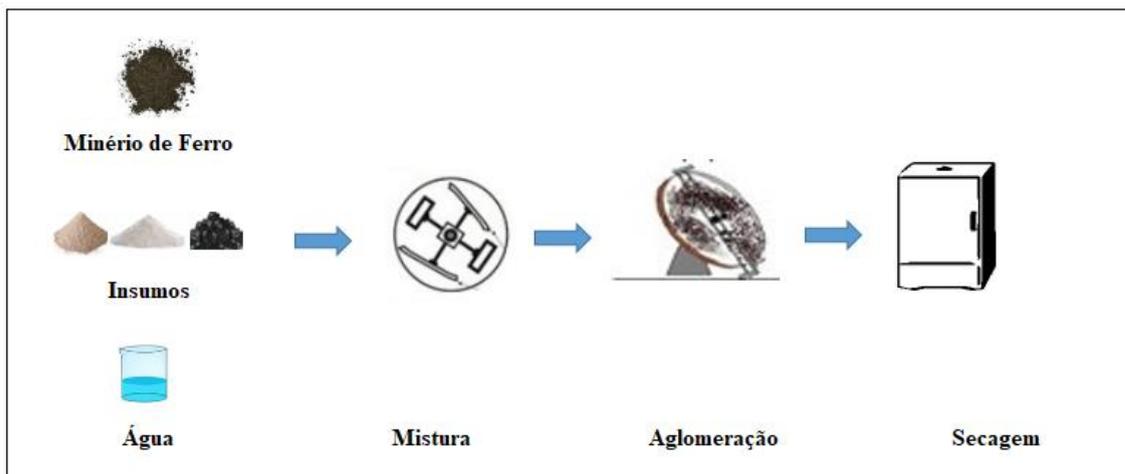
4.6.1 Mistura

Para o presente trabalho o processo de pelotização do minério de ferro foi realizado nas instalações do Laboratório de Beneficiamento da PUC/MG e pode ser dividido em três etapas distintas: mistura, aglomeração e secagem, conforme ilustrado na Figura 27.

Assim, com as amostras já preparadas, seguiram para a etapa de mistura, etapa importante para se obter pelotas com qualidade dentro das especificações desejadas. Nessa etapa, os componentes são misturados em proporções adequadas para formar uma massa homogênea que possa ser compactada e moldada em *pellets*. A mistura realizada de forma adequada permite obter uma massa homogênea de minério com os outros materiais adicionados.

A mistura do *pellet feed* juntamente com os insumos já nas devidas proporções foram realizados no agitador/homogeneizador em Y da marca Marconi, no tempo de 20 minutos para cada teste (Figura 28).

Figura 27 – Esquema simplificado de pelletização do minério de ferro: (1) mistura, (2) aglomeração e (3) secagem na estufa



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 28 – Agitador / Homogeneizador



Fonte: elaborada pelo autor

Durante a etapa de mistura há a possibilidade da massa inicial sofrer alterações devido algumas variáveis que podem contribuir em perda de material como: manuseio, agitação, operador, dentre outras. Após a mistura, todas as amostras foram pesadas novamente.

Logo após foi calculado a quantidade de água adicionada ao processo, pois a umidade do concentrado, assim como a dosagem da água podem influenciar no percentual de umidade final da mistura antes do pelletamento.

Cada teste teve sua devida proporção de água e no final foram selecionadas três pelotas de cada lote para verificação do percentual de umidade final, utilizando um analisador da marca Marte (Figura 29).

Figura 29 – Analisador de Umidade



Fonte: elaborada pelo autor

4.6.2 Aglomeração

Após a mistura foram realizados os ensaios de pelletização. Para tal, utilizou-se o prato pelletizador da marca CDC, que permitem a obtenção de pelotas de minérios a partir de materiais pulverizados, de uso em laboratórios. Assim sendo, seguiu-se o padrão do equipamento com rotação de 80 rpm, inclinação 45° e taxa de alimentação entre 30 a 50%, utilizando o potenciômetro para variar as vibrações da calha alimentadora (Figura 30 e 31), pois a taxa de crescimento das pelotas é diretamente proporcional a taxa de alimentação. Contudo, elevadas taxas de alimentação geram pelotas com menor resistência e que se desfazem no momento seguinte à saída do disco, gerando assim, partículas finas e fora do tamanho desejado.

Figura 30 – Disco de pelletização – CDC



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 31 – Ajustes do disco de pelotização – CDC.



Fonte: elaborada pelo autor

O processo de pelotização em cada teste foi realizado num tempo de 30 minutos, a Figura 32 demonstra um esquema do processo: (a) iniciação e rotação do disco, (b) alimentação, (c) formação da película de água, (d) aglomeração dos sólidos, (e) formação das pelotas e (f) pelotas cruas formadas.

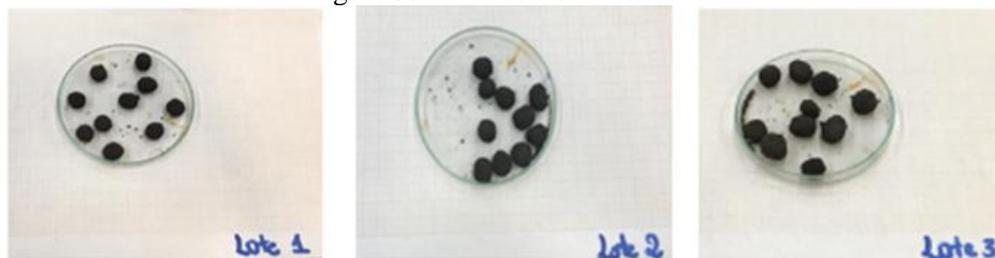
As pelotas assim que saíram do disco de pelotização ainda úmidas foram submetidas ao teste de queda (*drop test*) portanto foram selecionadas um número de 10 pelotas de cada lote entre ~10,0 a ~12,0 mm e sem trincas Figura 33. Após selecionadas as mesmas foram colocadas a uma altura de 45 cm e soltas em movimento de queda livre até que a primeira fissura aparentemente surgisse, conforme demonstra na Figura 34.

Figura 32 – Esquema do processo



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 33 – Pelotas Selecionadas



Fonte: elaborada pelo autor

Figura 34 – Teste de queda



Fonte: elaborada pelo autor

O procedimento é realizado para cada pelota da amostra até que todas apresentem uma trinca, o número de quedas que cada pelota suportou estão apresentados nos resultados, conseqüentemente foi possível contabilizar um valor médio, em relação à quantidade de pelotas selecionadas na amostra e o número de quedas que cada uma suportou.

As demais pelotas que restaram de cada lote foram levadas a estufa a 100 °C, durante vinte e quatro horas, aproximadamente.

Após passar pela etapa de secagem as pelotas foram levadas para a máquina de compressão universal do fabricante EMIC (Figura 35). Foram conduzidas ao teste na prensa de compressão dez pelotas escolhidas aleatoriamente de cada lote na faixa granulométrica de aproximadamente 15 a 18 mm, numa célula de carga de 5kN. A média aritmética dos valores representa o resultado do ensaio, onde a unidade é expressa em kgf /pelota.

Figura 35 – Máquina de compressão do fabricante EMIC



Fonte: elaborada pelo autor

Logo em seguida foram separados 150 gramas de cada lote para as análises químicas das pelotas por fluorescência de raio X, realizadas no laboratório da empresa Vallourec, o teste é rápido sendo de extrema importância para identificar a composição química das amostras e adequação das matérias-primas para processamento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados e discutidos os resultados da caracterização das amostras (pellet feed e insumos), teor de umidade, densidade, análise química e granulométrica, processo de pelotização, influências dos insumos no processo, bem como os testes de resistência à queda (pelota verde) e compressão (pelota seca).

5.1 Caracterização do *pellet feed*

5.1.1 Análise química e granulométrica

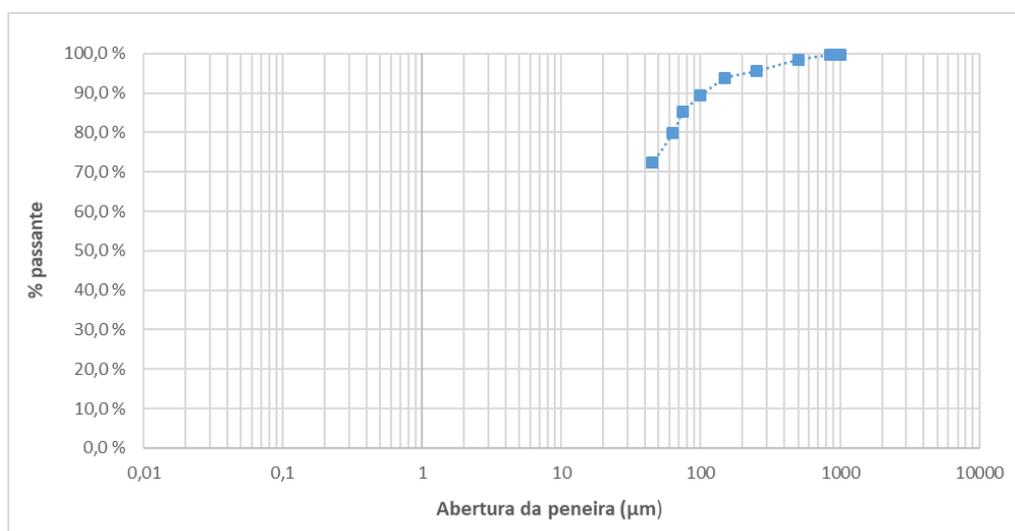
A partir dos dados fornecidos pela Herculano Mineração a amostra de *pellet feed* possui uma composição química com alto teor de ferro, aproximadamente 64%. A Tabela 5 mostra a análise química da amostra de *pellet feed*. Além da análise química, também foram fornecidos os dados da distribuição granulométrica, apresentados na Figura 36.

Segundo os dados das Tabela 5 e Figura 36 a, amostra fornecida pela mineração Herculano está dentro dos parâmetros para ser utilizada como matéria-prima para a produção de pelotas, pois há uma concentração de ferro maior que 63% e distribuição uniforme de tamanho abaixo de 0,015 mm, com diâmetro no qual 80% do material é passante de 0,074mm ou 74 μm .

Tabela 5 - Análise química do pellet feed

Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	Mn	P	PPC
63,93	5,22	0,63	0,22	0,053	2,28

Figura 36 – Curva de distribuição granulométrica do *pellet feed*



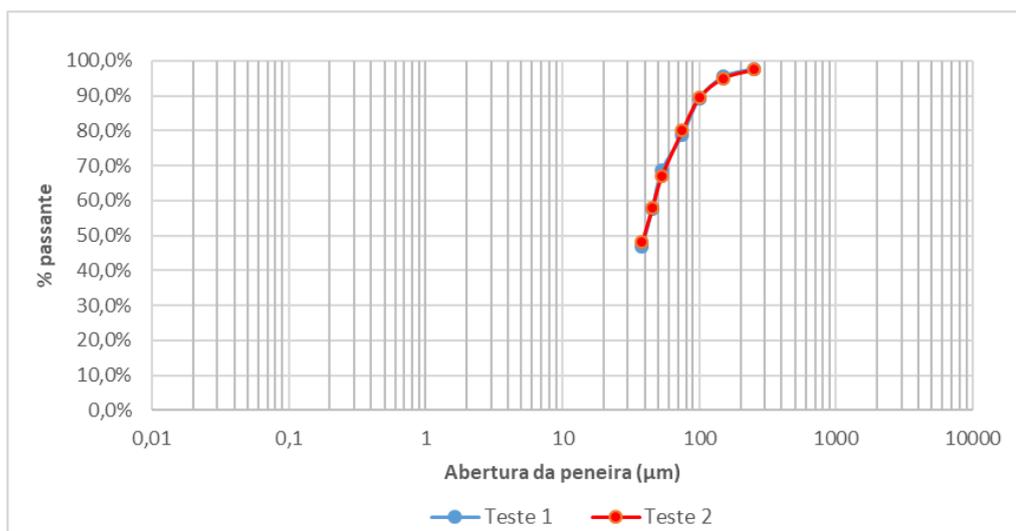
Fonte: elaborada pelo autor

Em relação à análise química, o silício (Si) é frequentemente encontrado como impureza em minérios de ferro e fora da especificação pode afetar as propriedades do aço resultante, como causar fragilidade e outros efeitos indesejáveis nesse produto final. O terceiro elemento é o alumínio (presente na forma Al_2O_3) que apresenta uma concentração de 0,63%, podendo estar presente em níveis relativamente baixos, porém também devem ser controlados para evitar maiores danos no produto final; o quarto elemento identificado é o manganês (Mn), a presença de manganês em uma concentração de 0,22% não é preocupante, pois o manganês é frequentemente utilizado como elemento de liga para melhorar algumas propriedades físicas do aço.

Por fim, foi detectado o fósforo (P) na amostra com uma concentração de 0,053%. O fósforo é considerado um contaminante indesejável em muitas aplicações de aço, uma vez que pode tornar o aço quebradiço e prejudicar sua soldabilidade. Na Tabela 5 está apresentado também o resultado do teste de perda ao fogo, (também denominado de Perda Por Calcinação - PPC) e expressa a volatilização de compostos, como matéria orgânica, carbonatos durante a queima, usado para determinar a massa após secagem e queima, apresentando o valor de 2,28% no caso da amostra submetida à análise.

Foi realizado a análise granulométrica da amostra no Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET – e para determinar a distribuição granulométrica foram utilizadas 150 gramas de amostra seca e as peneiras: em mesh(#): 60, 100, 150, 200, 250, 325, 400 e -400.

Figura 37 - Curvas de distribuição granulométricas do *pellet feed* em duplicata



Fonte: elaborada pelo autor

A análise foi realizada em duplicata e o gráfico da Figura 37 mostra os resultados. A empresa fornecedora da amostra disponibilizou a análise granulométrica utilizando também essa sequência

de peneiras, assim foi possível comparar os dados e verificar os resultados em ambas as análises.

A amostra possui o diâmetro no qual 80% do material é passante em aproximadamente 74 µm. Isso sugere que a maioria das partículas é relativamente fina, com apenas 20% das partículas maiores que esse diâmetro, ou seja, as análises realizadas em laboratório coincidem com a análise disponibilizada pela empresa fornecedora da amostra.

5.1.2 Teor de Umidade

Com a massa do material úmido e seco foi possível calcular o teor de umidade por diferença de massas, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teor de umidade do *pellet feed*

	Massa úmida (g)	Massa seca (g)	Massa de água (g)	Umidade
1	5.326	4.700	626	13,32%
2	5.286	4.602	684	14,86%
3	5.136	4.462	674	15,11%
4	5.048	4.380	668	15,25%
TOTAL	20.796	18.144	2.652	14,62%

Fonte: elaborada pelo autor

A interpretação desses valores é de suma importância em diversas situações, a umidade desempenha um papel crítico em seu desempenho. Cabe salientar que na mineração as análises de umidade do concentrado são realizadas diariamente nos silos de abastecimento de usina. O índice de umidade do material homogeneizado é o que está mais diretamente ligado com o grau de desempenho do pelotamento, o material filtrado deve conter um teor de água de aproximadamente 9 a 10%. Por essa razão, ele serve como uma referência rápida para que as equipes de operação e processo identifiquem e compreendam mais facilmente as possíveis variações do material dentro dos discos do pelotamento.

A umidade da amostra foi de 14,62% em uma amostra de aproximadamente 21 kg de *pellet feed*, ou seja, indica a quantidade de água presente nesse material em relação à sua massa total. Isso significa que dos 21 kg de amostra, aproximadamente 2.652 kg correspondem à água contida na amostra, um teor de água acima do ideal para pelotização, portanto esse excesso de água pode afetar a densidade, a resistência, a capacidade de manuseio e até a eficácia do *pellet feed* em processos industriais, vale ressaltar que o material foi recebido úmido e teve a secagem na estufa por 24 horas.

5.1.3 Determinação de densidade/picnometria

A densidade média encontrada foi de 4,59 g/cm³ com um desvio de 2,38% da média conforme

descrito na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados da picnometria

	Massa 1	Massa 2	Massa 3	Massa 4	Densidade do sólido
1	14,25 g	18,69 g	43,33 g	39,85 g	4,62 g
2	15,46 g	19,22 g	44,07 g	41,13 g	4,59 g
3	16,00 g	20,02 g	44,37 g	41,23 g	4,57 g
				Média	4,59 g/cm³
				Desvio	2,38%

Fonte: elaborada pelo autor

Os dados apresentados correspondem a uma análise das massas e densidades de uma amostra de *pellet feed*, realizada em diferentes conjuntos de medições. Esses resultados são necessários para avaliar as características do *pellet feed* e oferecer informações assertivas sobre a uniformidade e consistência do material.

A observação das densidades calculadas revela um padrão interessante: Embora as densidades tenham algumas variações entre as medições, elas parecem se agrupar em torno de um valor médio de 4,59 g/cm³, conforme indicado na linha "Média". Isso pode indicar uma consistência geral nas características do *pellet feed*, apesar de algumas flutuações experimentais. O desvio padrão relativo, apresentado como "Desvio" com um valor de 2,38%, indica uma medida da dispersão dos dados em relação à média. Isso mostra que as densidades medidas não estão muito distantes da média, sugerindo um grau aceitável de precisão nos resultados obtidos. Um desvio relativamente baixo sugere que as medições foram realizadas de maneira coerente e confiável. No contexto de análise em uma amostra de *pellet feed*, esses dados têm um papel significativo. Eles proporcionam uma visão detalhada das características do material, especialmente sua densidade. Além disso, a consistência das densidades médias e o desvio relativo indicam a confiabilidade dos resultados.

Na fase subsequente da análise de determinação da densidade, empregou-se o método de picnometria a gás. Foram conduzidas seis medições, resultando em uma densidade média de 4,795 g/cm³, com um desvio de 0,486%, conforme apresentados na Tabela 8.

Utilizando a densidade média da amostra como base, procedeu-se ao cálculo da proporção mineral, levando em consideração a presença de apenas dois componentes em sua composição: hematita e quartzo. O cálculo foi realizado empregando os valores de densidade desses minerais conhecidos na literatura, ou seja, 5,25 e 2,65 g/cm³ para hematita e quartzo respectivamente. O resultado obtido revelou uma proporção de 90,32% de hematita. O teor mineral é uma medida crucial da qualidade do *pellet feed*, pois os minerais presentes afetam diretamente suas propriedades físicas e comportamento durante processos industriais, como a pelotização e a

redução. Uma alta porcentagem de um determinado mineral pode influenciar a resistência, a capacidade de fusão e outros atributos do *pellet feed*.

Tabela 8 - Dados da picnometria a gás

Picnometria a gás		
	Massa	Densidade
1	165,88	4,80 g/cm ³
2	165,88	4,80 g/cm ³
3	165,88	4,80 g/cm ³
4	165,88	4,79 g/cm ³
5	165,88	4,79 g/cm ³
6	165,88	4,80 g/cm ³
Média		4,80 g/cm ³
Desvio		0,486%
Densidade da amostra		4,79 g/cm ³
Densidade hematita		5,25 g/cm ³
Densidade quartzo		2,65 g/cm ³
Proporção de hematita recalculada		90,32%

Fonte: elaborada pelo autor

5.2 Caracterização dos insumos

5.2.1 Análise química e granulométrica dos insumos

A partir dos dados fornecidos pela Vallourec, verifica-se que os insumos possuem em sua composição química maiores porcentagens de SiO₂, Al₂O₃, CaO e MgO. Na prática, o minério propriamente moído é combinado com agentes aglomerantes, como bentonita ou aglomerantes orgânicos, e agentes fundentes, como calcário, e se o minério for uma hematita, com coque ou carvão de antracito, como um combustível interno. A Tabela 9 apresenta a análise química dos insumos.

Tabela 9 - Análise química dos insumos

	MnO	SiO₂	Al₂O₃	CaO	MgO	P₂O₅	Mn	Fe₂O₃	PPC
Bentonita	0	50,21	19,47	1,48	1,22	0,04	1,25	3,77	20,49
Calcário Calcítico	0,46	2,21	0,44	53,93	0,52	0,20	0,36	0,93	41,54
Calcário Dolomítico	0,26	2,96	0,58	29,64	21,35	0,02	0,17	2,24	43,20
	Umidade	Mat. Volátil	Cinzas	Carbono Fixo					
Coque	1,09	7,87	1,28	90,86					

Fonte: elaborada pelo autor

A partir dos dados da análise química dos insumos pode-se perceber que a bentonita incorpora alumina e sílica na pelota, que são contaminantes e os fundentes apresentam maiores

concentrações de CaO e MgO esses elementos presentes na pelota controlam o índice de basicidade, como o calcário calcítico que possui grande teor de CaO em sua composição química.

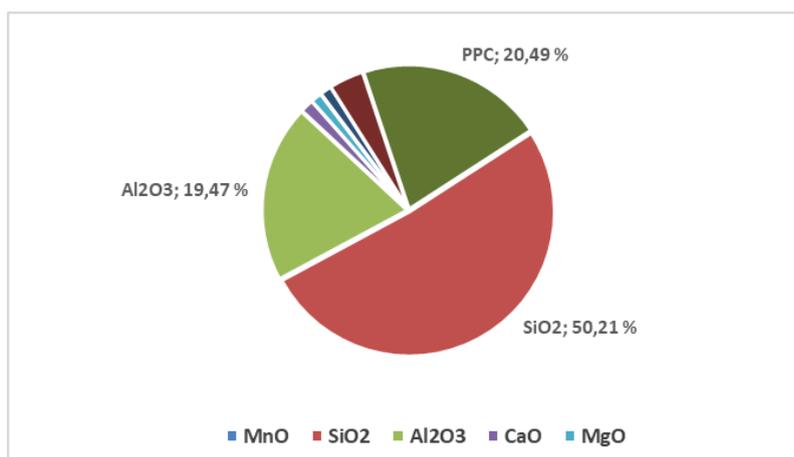
A empresa fornecedora da amostra disponibilizou também a análise granulométrica utilizando a sequência de peneiras: em mesh(#): 60, 100, 150, 200, 250, 325 e 400 assim foi possível comparar os dados e realizar a curva granulométrica das amostras. O combustível sólido passou pelo moinho e depois foi classificado com finalidade de adequar sua granulometria a dos demais insumos.

- Bentonita

A bentonita, o aglomerante utilizado, possui 50,21% SiO₂, 19,47% Al₂O₃, 3,77% Fe₂O₃, 1,48 CaO e 1,22 MgO, além de PPC de 20,49% conforme a Tabela 9 e sintetizado na Figura 38. A bentonita, por ser um tipo de argila e, portanto, um silicato, tem uma composição química variando geralmente de 11 a 22% de Al₂O₃ e de 48 a 56% de SiO₂ (principais constituintes), onde eleva consideravelmente o nível de contaminação da pelota.

Apesar do esforço da concentração para produzir pelotas de baixo teor em sílica, a sílica adicionada na forma do silicato bentonita, diminui o teor metálico na pelota como produto final. Além de alguns pesquisadores afirmam que no caso específico da bentonita, ela ajuda na etapa do processo de secagem, facilitando o transporte da água do centro para a periferia da pelota (MARTINS, 2007; VIEIRA, 2014).

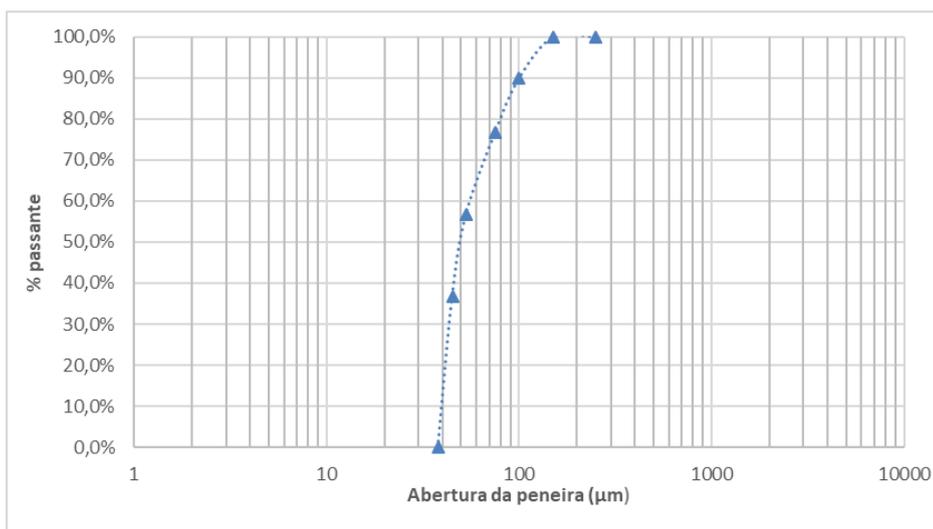
Figura 38 - Análise química da bentonita



Fonte: elaborada pelo autor

A amostra de bentonita possui o diâmetro no qual 80% do material passante é de 74 µm com uma faixa granulométrica similar ao do pellet feed, respondendo os critérios químicos e físicos para ser utilizada como aglomerante. Conseqüentemente, foi possível realizar a curva granulométrica da bentonita (Figura 39).

Figura 39 - Curva de distribuição granulométrica da bentonita



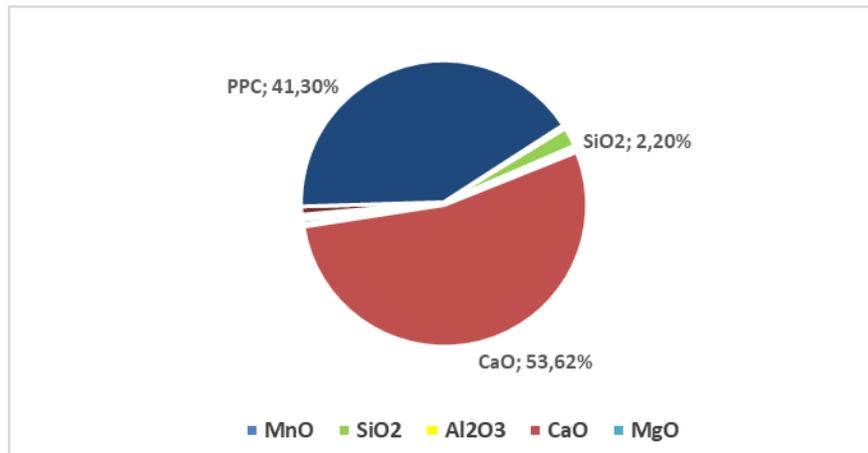
Fonte: elaborada pelo autor

- Calcário Calcítico e Dolomítico

Os calcários participam das reações químicas que ocorrem durante a queima das pelotas. Eles podem reagir tanto com os componentes da ganga quanto com os óxidos de ferro e quando são incorporados ao processo ajudam na correção química das pelotas em controle de basicidade, os fundentes utilizados no presente trabalho foram: calcário calcítico e dolomítico e conforme a Tabela 9 a composição química presente são: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO e MgO com 2,21%; 0,44; 0,93; 53,93; 0,52 e 2,96%; 0,58%; 2,24; 29,64% e 21,35 e uma perda ao fogo de 41,5% e 43,20% respectivamente (Figuras 40 e 41).

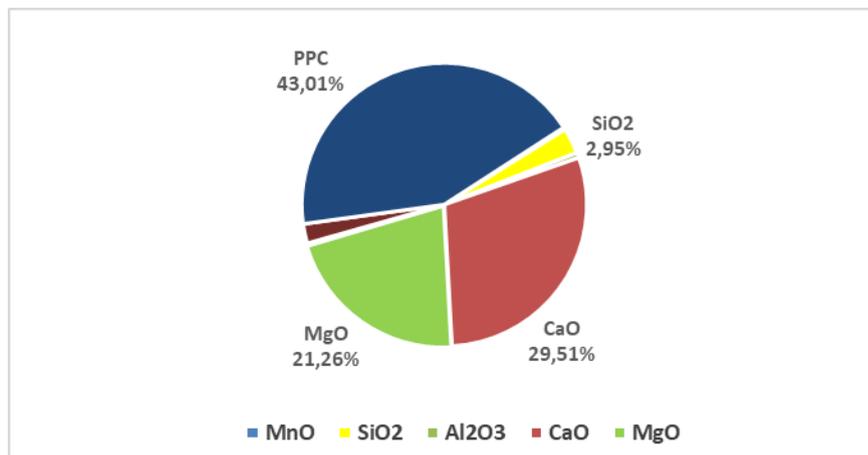
Para o calcário calcítico o ideal é apresentar um teor elevado em cálcio, 40% ou mais em CaO e menos de 5% em MgO, ou seja, o calcário calcítico utilizado possui o percentual necessário para contribuir numa boa resistência na pelota final, e o tornam adequado para utilização em alto-forno, já o calcário dolomítico o ideal é um teor elevado em magnésio, 25-30% em CaO e 15-20% em MgO, também possui o percentual necessário na produção de pelotas e este insumo já é utilizado na produção de pelotas de redução direta.

Figura 40 - Análise química calcário calcítico



Fonte: elaborada pelo autor

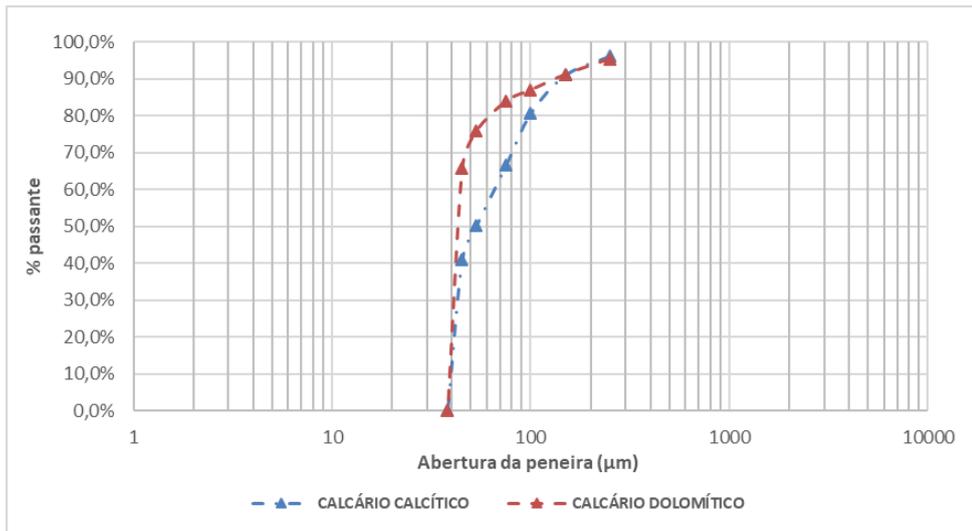
Figura 41 - Análise química calcário dolomítico



Fonte: elaborada pelo autor

Ambas as amostras de calcário possuem diâmetros no qual 80% do material é passante em 100 μm (Figura 42) com uma faixa granulométrica atendendo os critérios químicos e físicos para ser utilizados como fundentes no processo.

Figura 42 - Curva de distribuição granulométrica dos fundentes

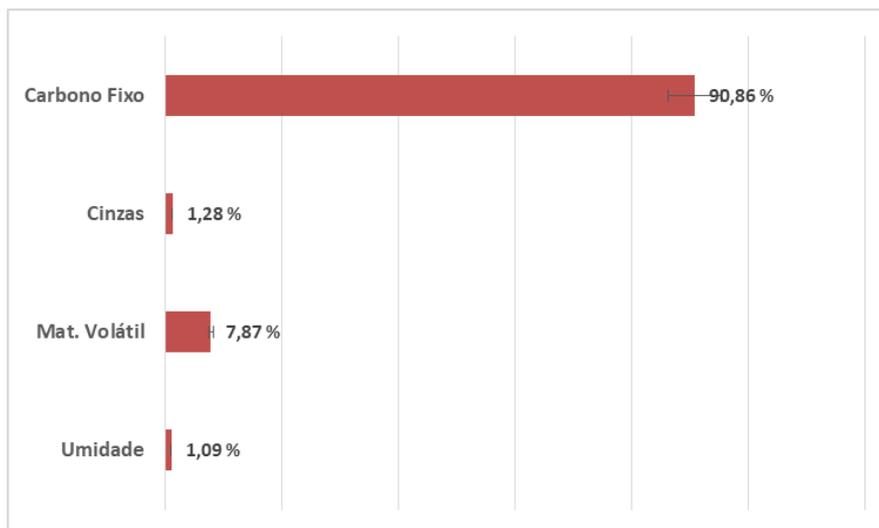


Fonte: elaborada pelo autor

- Coque

O coque é utilizado como fonte de carbono, adicionado para homogeneizar a temperatura nas pelotas durante a queima, a fim de melhorar a resistência mecânica da pelota, foi incorporado ao processo com uma adição de dosagem fixa em todos os testes. Determinou-se também a porcentagem de carbono fixo, cinzas e materiais voláteis com teores de 90,86%; 1,28%; 7,87%; e umidade de 1,09% (Figura 43).

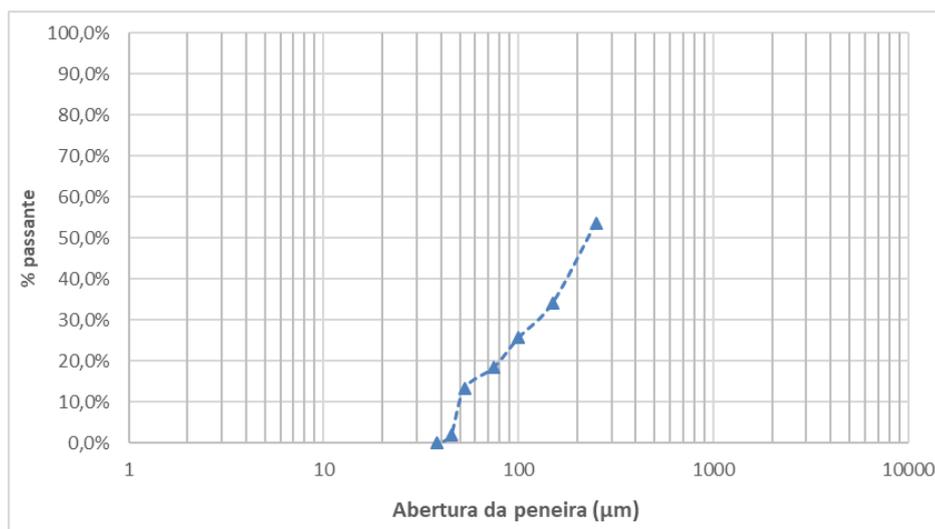
Figura 43 - Análise química do coque



Fonte: elaborada pelo autor

O coque mesmo realizando a moagem não atingiu granulometria menor que 74 μm e obteve um P50 passante na peneira de 60 mesh, ou seja, 50% do material possui uma distribuição granulométrica menor que 250 μm (Figura 44).

Figura 44 - Curva de distribuição granulométrica do coque



Fonte: elaborada pelo autor

Para a processo de pelotização da pelota verde, o combustível sólido não impacta tanto, uma vez que o presente estudo contempla até essa etapa e o seu principal papel é fornecer mais energia ao processo de queima da pelota, vale ressaltar que analisando os dados da análise química, a amostra possui um percentual de carbono fixo de 90,86% e cinzas abaixo de 2% acima dos níveis aceitáveis para pelotização da pelota seca.

5.3 Basicidade dos insumos

Conforme já apresentado, existem tipos de basicidade que podem ser utilizadas no controle de processo e a partir dos dados da análise química, foi possível calcular a basicidade de cada insumo utilizado no processo, pois cada um tem sua particularidade e está ligado intimamente com o grau de inchamento de carga. A Tabela 10 apresenta os dados da basicidade dos insumos analisados.

Tabela 10 – Basicidade dos insumos analisados

Insumo	Basicidade Quaternária (%)	Basicidade Ternária (%)	Basicidade Binária (%)
Bentonita	0,04	0,05	0,03
Calcário Calcítico	20,58	24,66	24,42
Calcário Dolomítico	14,37	17,20	10,00

Fonte: elaborada pelo autor

Segundo Sabino (2016), o índice de basicidade indica um padrão de qualidade, independentemente do tipo de minério utilizado na produção da pelota. Este índice é um valor adimensional e possui importância no controle da cadeia produtiva dos altos-fornos e dos fornos de redução direta. Segundo os autores, a basicidade ternária considera o percentual de MgO,

CaO, e SiO₂ presentes na pelota da seguinte forma: (%MgO + %CaO/%SiO₂) e basicidade binária considerada na razão entre os percentuais de CaO e SiO₂ respectivamente, ou seja: (%CaO/%SiO₂). Assim, os resultados de basicidade estão relacionados ao percentual de cada elemento químico presente, ou seja, a amostra que apresentar menores quantidades de SiO₂ e Al₂O₃ aumentará conseqüentemente a basicidade, a qual é o caso do calcário calcítico, que possuem grande teor de MgO, CaO em suas composições químicas conforme descrito na tabela 9.

5.4 Características da Pelota Final

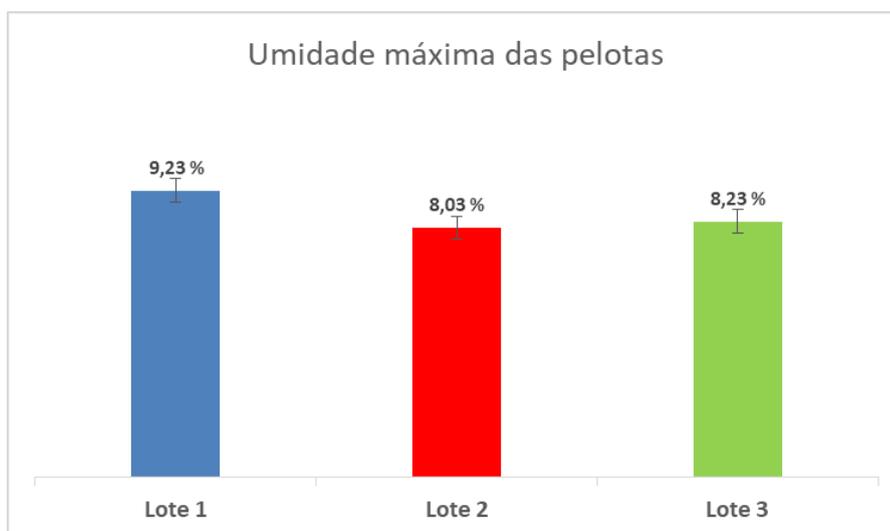
5.4.1 Umidade

A Tabela 11 apresenta o resultado do percentual de umidade de cada pelota selecionada, a partir dos dados pode-se gerar a média final da umidade de cada lote. Conforme citado por Fonseca (2003), a matéria-prima principal, o *pellet feed*, deve possuir teor de umidade entre 8 e 10%. Conforme os dados da Tabela 11 e Figura 45, a média do percentual de umidade de cada lote manteve dentro do parâmetro citado pelo autor.

Tabela 11 – Umidade final das pelotas de cada lote

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
PELOTA A	10	8,1	8,2
PELOTA B	9,8	8,2	8,6
PELOTA C	7,9	7,8	7,9
MÉDIA FINAL	9,23	8,03	8,23

Figura 45 - Resultado da determinação de umidade das pelotas



Fonte: elaborada pelo autor

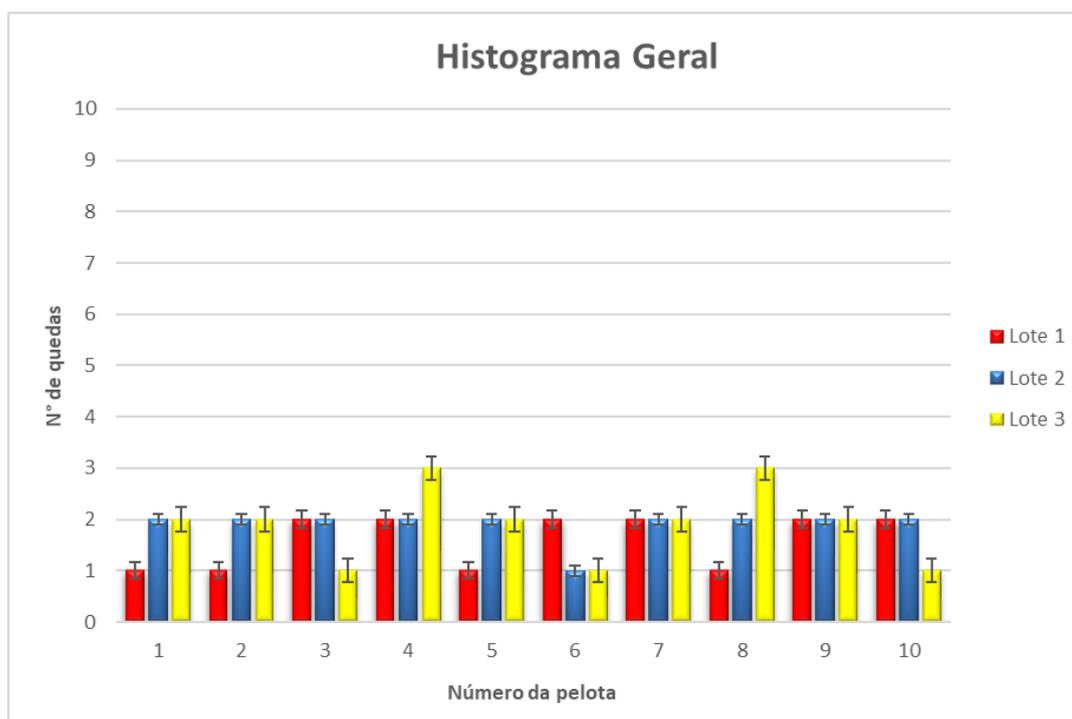
5.4.2 Teste de resistência da pelota verde

As pelotas cruas úmidas de tamanho entre 10 mm a 12 mm, medidas com paquímetro, foram submetidas ao teste de queda (*drop test*) imediatamente. E o número de quedas suportado por pelota foi anotado, a média aritmética desses valores indicou os resultados de cada lote, em números de quedas por pelota, seguindo como padrão o número de quedas até o rompimento, isto é se a pelota fissurou na primeira queda o valor será 1 e assim seguindo a sequência numérica conforme apresentados na Tabela 12 e Figura 46.

Tabela 12 – Teste de queda (drop test)

	LOTE 1	LOTE 2	LOTE 3
Número da pelota	Nº de quedas	Nº de quedas	Nº de quedas
1	1	2	2
2	1	2	2
3	2	2	1
4	2	2	3
5	1	2	2
6	2	1	1
7	2	2	2
8	1	2	3
9	2	2	2
10	2	2	1
Média	1,6	1,9	1,9

Figura 46 - Número de quedas. Os valores representam a média de 10 medidas e as barras de erro apresentam o desvio-padrão



Fonte: elaborada pelo autor

Pode-se perceber que a média dos lotes 2 e 3 foram iguais, e os valores médios foram aproximadamente de 2 quedas que as pelotas suportaram até a fissura. Já o lote 1 pode-se considerar que as pelotas não resistiram e se romperam na primeira queda.

Comparando os valores de umidade de cada lote com a quantidade de quedas, é possível conjecturar que a umidade que apresentou melhores resultados é em torno de 8%, sendo que o lote 2 e 3 apresentaram resultados iguais e satisfatórios e ambos possuem a mesma umidade pós pelotização, e as pelotas do lote 1 com umidade em torno de 9% teve uma pior resistência e 40% não resistiram a primeira queda, mesmo com a diferença de cerca de 1% na umidade obteve efeito na resistência da pelota verde.

5.4.3 *Teste à compressão da pelota verde-seca*

Assim, as pelotas foram selecionadas aleatoriamente, medidas com paquímetro e em seguida submetidas ao teste de compressão, realizado 10 dias após a etapa de pelotização, aguardando um tempo de cura a frio. A Tabela 16 está apresentado os resultados obtidos de cada lote, a máquina de compressão fornece os dados de força máxima (kgf) \pm resistência à compressão (MPa), pelotas que possuem diâmetro na faixa de tamanho entre 15,0 e 17,5 mm apresentaram uma média de resistência à compressão das pelotas cruas secas de $1,35 \pm 0,07$ kgf/pelota (Tabela 17 e Figura 47) e pelotas de tamanho menores ou maiores não apresentaram resultados satisfatórios como apresentados nos anexos em apêndice 1. As pelotas que obtiveram uma melhor resistência à compressão foram as do lote 2, assim como uma melhor resistência ao teste de queda.

Tabela 13 – Ensaio de Resistência à Compressão

LOTES	Resistência à compressão (kgf)									
	PELOTA VERDE SECA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,95 \pm 0,05	1,44 \pm 0,07	0,75 \pm 0,04	1,28 \pm 0,07	1,32 \pm 0,07	0,92 \pm 0,04	1,16 \pm 0,05	0,54 \pm 0,02	0,49 \pm 0,03	0,75 \pm 0,03
2	1,44 \pm 0,08	1,33 \pm 0,06	1,33 \pm 0,7		1,51 \pm 0,07	1,66 \pm 0,09	1,28 \pm 0,07	1,13 \pm 0,05	0,88 \pm 0,04	0,17 \pm 0,01
3	0,16 \pm 0,01	0,16 \pm 0,01	0,31 \pm 0,02	0,81 \pm 0,03	0,47 \pm 0,02	1,42 \pm 0,06	1,91 \pm 0,08	0,59 \pm 0,03	0,62 \pm 0,03	1,06 \pm 0,05

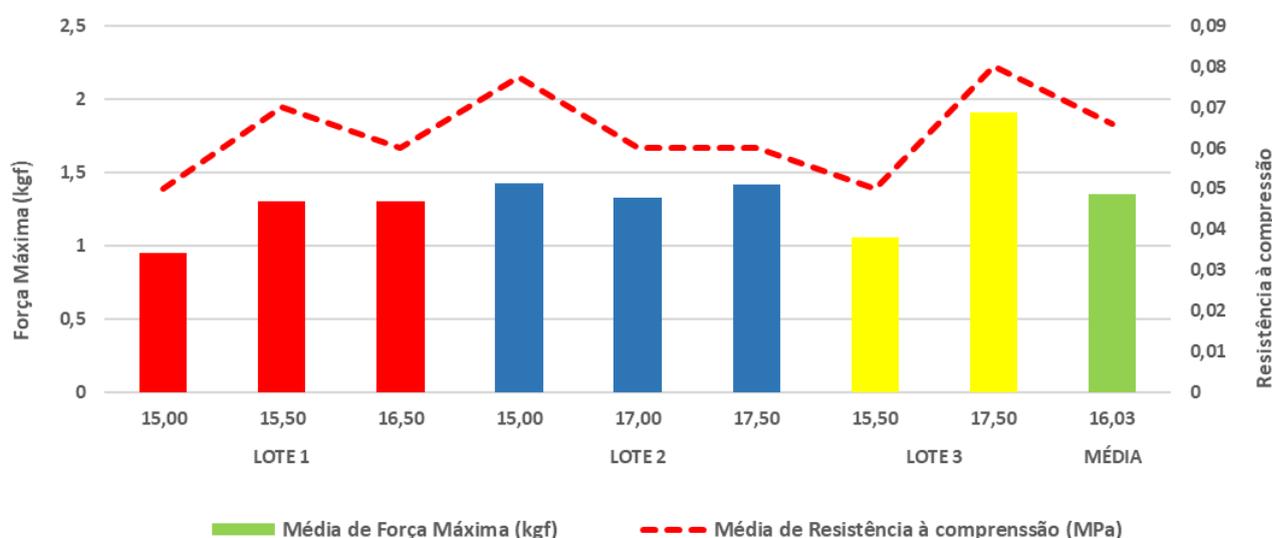
Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 14 – Média do resultado da Resistência à Compressão

LOTES	Diâmetro (mm)	Força Máxima (kgf)	Resistência à compressão (MPa)
LOTE 1	15	0,95	0,05
LOTE 1	16,5	1,44	0,07
LOTE 1	15,5	1,28	0,07
LOTE 1	15,5	1,32	0,07
LOTE 1	16,5	1,16	0,05
LOTE 2	15	1,44	0,08
LOTE 2	17	1,33	0,06
LOTE 2	15	1,33	0,07
LOTE 2	17	1,51	0,07
LOTE 2	15	1,66	0,09
LOTE 2	15	1,28	0,07
LOTE 2	17	1,13	0,05
LOTE 3	17,5	1,42	0,06
LOTE 3	17,5	1,91	0,08
LOTE 3	15,5	1,06	0,05
MÉDIA	16,03	1,35	0,07

Fonte: elaborada pelo autor

Figura 47 - Média do resultado da Resistência à Compressão



Fonte: elaborada pelo autor

Conforme o gráfico da Figura 47 e Tabela 17, podemos observar que as pelotas com melhores resultados de resistência foram as pelotas com diâmetro entre 15 a 17,5 mm, no lote 2, 80% das pelotas testadas obtiveram esse diâmetro, já o lote 1 e 3 somente 50% e 30%, respectivamente.

5.4.4 Análise química das pelotas secas

A Tabela 18 apresenta os resultados da análise química das pelotas, pode-se perceber que as pelotas de cada lote atingiram percentuais de PPC em torno de 3,56%; 3,84%; 4,19%

respectivamente e teores de sílica em torno de 4,5%.

Tabela 15 – Análise Química das Pelotas Secas

	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	TiO ₂	Fe	Fe ₂ O ₃	Mn	P	PPC	CaO/SiO ₂
Lote 1	0,36	4,42	0,72	0,37	0,15	0,095	0,1	65,486	93,645	0,281	0,041	3,56	0,083
Lote 2	0,38	4,15	0,74	0,28	0,62	0,097	0,1	63,162	90,322	0,292	0,042	3,84	0,067
Lote 3	0,36	4,3	0,75	0,85	0,64	0,097	0,09	62,237	88,999	0,28	0,042	4,19	0,19

Fonte: elaborada pelo autor

As pelotas do lote 1 utilizando o calcário calcítico possuem um maior percentagem de CaO, e interagiram bem com o aglomerante (bentonita), pois segundo Américo (2012), o CaO presente é fundamental no processo físico-químico e fortalece a ligação entre os grãos dos minerais presentes na formação da pelota, assim manteve um percentual de sílica, e aumento do percentual de Fe, obtendo um teor de Fe aproximadamente 65,49%, já o lote 2 utilizando o calcário dolomítico manteve o % de Fe do concentrado inicial e o lote três utilizando os dois fundentes diminuiu esse percentual.

Em relação à basicidade os lotes 1 e 2 obtiveram um percentual entre 0,06 e 0,08%, ou seja, pelotas com basicidade menores que 0,1 são consideradas ácidas, classificadas pelotas de redução direta na produção de ferro esponja, no lote três por utilizar os dois fundentes juntos, teve um aumento na concentração de óxido de cálcio, e atingiu o percentual de 0,19% consideradas pelotas de baixa basicidade, que também são utilizadas na redução direta. Nos casos de pelotas com baixa basicidade e pelotas ácidas, há pouca recristalização das partículas de hematita e a estrutura de poros permanece aberta e há pouco contato entre as partículas. Conforme citado por Frazer et al. (1975) não ocorre reação entre a sílica presente e as partículas de hematita, pois possuem uma formação de fase vítrea entre as partículas de hematita formada por sílica e ganga e a reação ocorre em pelotas de alta basicidade.

Os lotes atingiram percentuais de PPC próximos de 3,56%; 3,84%; 4,19% respectivamente. Em relação a PPC, é um parâmetro extremamente importante para o comportamento do minério dentro do alto forno e para a qualidade física dos produtos provenientes de processos de pelotização e sinterização.

Pode-se perceber que os insumos utilizados influenciam em cada variável, os lotes 2 e 3 apresentaram melhores umidades em relação à resistência da pelota verde, pois foi possível conjecturar que a umidade influenciou no teste de queda e pelotas com umidade acima de 8% não suportaram a primeira queda ocorrendo a fissura e para o teste de resistência à compressão os lotes 1 e 2 apresentaram maior força dada em (kgf/pelota), ou seja, a capacidade do material de suportar cargas de compressão antes de ocorrer a falha.

6 CONCLUSÕES

Com base nos testes realizados e na análise dos seus resultados, foi viável chegar às seguintes conclusões:

- A amostra de pellet feed tem um teor de ferro de cerca de 64%, ideal para ser usada como matéria-prima para a produção de pelotas.
- A umidade da amostra de pellet feed foi de 14,62%, com um desvio de aproximadamente 5% do descrito na literatura. O material filtrado deve conter um teor de água entre 9 e 10%. Portanto, para reduzir o percentual da amostra, era necessário remover essa umidade durante as etapas unitárias ou mantive-la por um período maior de secagem na estufa. Dessa forma, o material permaneceu em uma estufa por 24 horas a uma temperatura de 100 °C.
- De acordo com os resultados das curvas de distribuição granulométrica das amostras de pellet feed, aglomerante e fundentes têm diâmetros abaixo de 150 µm e composição química dentro do padrão para serem usadas no processo de pelotização.
- Pode-se observar que os insumos com a distribuição granulométrica uniforme contribuíram para a formação de pelotas na faixa de 8-18mm em todos os testes;
- Aproximadamente 50% da amostra de coque ficou abaixo de 250 µm, mesmo passando pelo moinho e não atingiu uma faixa granulométrica com P80 passante abaixo de 150 µm, todavia sua análise química foi bem satisfatória em relação ao percentual de carbono fixo, com 90,86%, ideal para o processo de queima;
- Para os três testes de pelotização realizados foram mantidos a bentonita (aglomerante) e coque (combustível sólido), ambos tiveram suas contribuições nas pelotas, variou-se o fundente de modo a verificar a influência e resistência final;

- Em relação a basicidade as pelotas do lote 3 possuem uma basicidade maior em relação aos outros lotes, pois utilizaram os dois fundentes juntos, teve aumento de CaO e MgO na composição química da pelota final.
- O aglomerante (bentonita) apresenta uma maior proporção de SiO₂ e Al₂O₃, enquanto os fundentes (calcário calcítico e dolomítico) apresentam maiores percentagens de CaO e MgO. Dessa forma, amostras com maiores concentrações de cálcio, como as do lote 1, auxiliam na neutralização da ganga ácida e correção da basicidade, e consequentemente aumenta o percentual de Fe na amostra final, conforme demonstrado na tabela 18.
- O coque (combustível sólido) introduz energia térmica na etapa de endurecimento, além de reduzir o consumo de gás natural, ideal para o processo de queima; como o presente trabalho foi realizado até a formação da pelota crua, o coque contribuiu para gerar pellets com maior resistência mecânica, sem que haja interferências significativas nas demais propriedades energéticas;
- O calcário calcítico e o calcário dolomítico são fundamentais para o endurecimento das pelotas através da formação das fases escoriificadas que fortalecem as ligações entre as partículas de minérios.
- Na mineração existem plantas diferentes e separadas para produzir cada tipo de pelota, cada qual com um silo dosador de fundente, posto isso; o uso do fundente separado e posteriormente juntos, proporcionou pelotas com variáveis diferentes: granulometria, química, umidade, resistência, podendo assim verificar a influência em cada parâmetro citado. Também pode-se perceber que a variação do fundente promoveu diferença estatística nos testes de resistência de queda e compressão;
- Ao analisar os testes de pelletização, é possível concluir que a quantidade de água é um fator significativo e teve uma influência maior na resistência ao teste de queda. Pelotas com um percentual de umidade menor resistiram mais à fissura, sendo as formadas nos lotes 2 e 3.
- Houve uma maior resistência à compressão em pelotas com diâmetros entre 17,5 e 15 mm, a maior parte deles no lote 2. Chegou-se à conclusão de que a diminuição da resistência à pressão está diretamente relacionada à ocorrência de trincas.
- Os três lotes produziram pelotas com as características físicas, químicas e metalúrgicas necessárias para a pelletização. Testá-las em um equipamento de bancada proporcionou resultados satisfatórios em relação à granulometria, química, umidade e resistência.

- Os lotes 1, 2 e 3 produziram pelotas contendo dimensões granulométricas, teores de Fe, umidade e resistência à compressão de 16,5mm; 15,5mm; 16,2mm; 65,48%; 63,16%; 62,37%; 9,23%; 8,03%; 8,23%; 0,96; 1,18; 0,68. Dessa forma, é perceptível que as do lote 2 com uma faixa granulométrica menor e umidade em torno de 8% tiveram melhor aproveitamento amostral, maior reciprocidade dos resultados e menor desvio padrão, mas mantiveram sua composição química inicial. O percentual de Fe aumentou somente no lote 1, e no 3 diminuiu com o uso dos dois fundentes.

Cabe salientar que os insumos são usados na mineração, mas não com outros tipos de partículas/estruturas e apresentam bons resultados. Este trabalho tem como objetivo fornecer informações para os especialistas da área, especialmente na área de processamento mineral. Ademais, a pelotização tem sido a tecnologia mais adequada para o uso de minérios finos, e os investimentos em plantas de pelotização são significativos, com as mineradoras assumindo essa atividade e dominando o mercado mundial de pelotas.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estudar a influência de outros aglomerantes como: Peridur® (Akzo), Cal; aglomerante orgânico ou bentonita super ativada juntamente com uso de fundentes;
2. Avaliar o desempenho do coque na produção de pelotas queimadas;
3. Realizar testes de resitência à abrasão das pelotas queimadas; assim como porosidade para diferentes perfis de queima;
4. Variar o tempo de secagem, pois quanto maior o tempo de secagem, para uma mesma temperatura e vazão, melhor seja a resistência final do aglomerado.
5. Testar a possibilidade de utilização de resíduo sólidos, ex: rejeitos de mineração.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. 2022. **Anuário Mineral Brasileiro**: Principais substâncias metálicas. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/PreviaAMB2022.pdf>> Acesso em 12 jan. 2024.

AMÉRICO, J. A. D. **Revisão Sobre A Utilização De Misturadores No Processo De Pelotização Do Minério De Ferro**. Monografia da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Publicação 2012.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2014.

ANGLOAMERICAN. Relatório técnico: **Relação entre as litologias de minério da Serra do Sapo – Região da Cava de 2016 - Mina do Sapo** – Conceição do Mato Dentro (MG). p.17. 2016.

ARAGÃO, R.V.; PEREIRA, H.C.; ARAUJO, D.R.; GOUVEIA, J.F.; RANGEL, E.P.; FONSECA, M.C.; COSTA, R.V.P. **Desenvolvimento de aglomerantes orgânicos na Samarco Mineração S/A**. In: XXXI Seminário de Redução de Minério de Ferro, XV Seminário de Controle Químico em Metalurgia Extrativa e XI Seminário de Carboquímicos, Santos - SP, 2000, p. 147-157.

CDC. **Equipamentos**, 13 jan. 2024. Disponível em <http://cdc.ind.br/equipamentos-laboratorio/>

CETEM LUZ, Adão Benvindo (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); ALMEIDA, Salvador Luiz Matos (Ed.). **Tratamento de Minérios** 2010. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

CETEM LUZ, Adão Benvindo da (Ed.); SAMPAIO, João Alves (Ed.); FRANÇA, Silvia Cristina A. (Ed.). **Aglomerado**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. – Cap. 16 - pág. 683-750.

COSTA, J. C. V. **Caracterização do itabirito dolomítico da Mina de Conceição, visando aproveitamento como matéria-prima na siderurgia**. 153 2013. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

CRUZ, ARTUR FREDERICO FONSECA DA; HAAGENSEN, EDERSON BARCELOS; ZANON, Leandro Resinentti; Regattieri, William Wagner Dettoni; Machado, Marcos Meyer. **Aumento da eficiência energética em fornos de pelotização**, p. 127-139. In: 6º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-357X DOI 10.5151/2594-357X-31608de Janeiro: Cetem, 2004. p. 3 – 16.

DIAS, F. B. **Proposta de sensores virtuais baseados em aprendizado de máquina para estimativa de parâmetros de qualidade na etapa de pelotamento de minério de ferro**, 2021. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/influencia-da-qualidade-do-pellet-feed-para-dosagem-de-insumos-na-pelotizacao>> Acessado em: 09/01/2024.

EVANS A.M, & Evans N.D.M. (1987) **Some preliminary palaeomagnetic studies of mineralization in the Mendip Orefield**. *Trans. Instn. Metall. (Sec. B. Appl. Earth Sci.)*, 86, B149-B151.

FRAZER, F. W., et al., et al. **The relationship between basicity and swelling on reduction of iron-ore pellets**. *International Journal of Mineral Processing*. 1975, Vol. 2, pp. 353-365.

FONSECA, M. C. **Influência da distribuição granulométrica do pellet feed no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta**. 2004. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

FONSECA, V. O. **Envelhecimento de Pelotas de Minério de Ferro com Diferentes Basicidades e Teores de MGO**. Universidade Federal de Ouro Preto: Curso de PósGraduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, 2003.

GOMES, M. T . Contribuição técnica ao 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de **Agglomeração de Minério de Ferro**, parte integrante da ABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HALT, J.A., KAWATRA, S.K. Review of Organic Binders for Iron Ore. **Agglomeration**. Michigan Technological University, 2013. Page 117. 104.

HENRIQUES, A.B. **Caracterização e estudo das propriedades eletrocínéticas dos minerais**

de ferro: hematita, goethita e magnetita. 2012. 233f. Tese de Doutorado-Universidade Federal de Minas Gerais/MG, Belo Horizonte, 2012.

IBRAM, 2023. **Mineração no Brasil.** Disponível: Mineração em Números - IBRAM. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027/> Acesso em: 15 de jan.2024.

KANAYAMA, H.; YAMAGUSHI, H.; MAECKAWA, M.; NARITA, K.; UENAKA, T. **Properties of Pellets, Sinter and Crushed pellets Taken from the Cohesive zone in the blast furnace.** Proceedings of the 42nd Ironmaking Conference (Published by Iron & Steel Society of AIME). Atlanta, GA, USA, 1983, p. 531-540.

LIMA, J.R.B.; CHAVES, A.P. **Study of properties in agglomeration process.** In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 18th,1993, Sydney. Selected papers. Parkville: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1993. v. 5, p. 1395-1402.

LINGSTAN, K.; YANG, L.; LU, W.K. **The Role of Magnesia in Iron Ore Pellets.** Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 4, 1983, p. 166-176.

LUZ, Adão Benvindo da.; Lins, Fernando Antonio Freitas. **Tratamento de Minérios.** 4. ed. Rio de Janeiro: Cetem, 2004. p. 3 – 16.

MACHADO J, Nascimento L, Maranha S, Pereira R, Tolentino J, Mafra W. **Analyses of Solid Fuels in the Pelletizing Process: The Use of Different Coal Characterization Techniques.** In: 6th International Congress of the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012.

MANTOVANI, M.C. **Comportamento a frio e a quente de pelotas auto redutoras de resíduo de aciaria elétrica,** 1996. 143p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade São Paulo, São Paulo, 1996.

MARTINS, J. **Procedimentos para avaliação de aglomerantes na pelotização.** Ouro Preto - MG: UFOP, 2007. p 499-502. Disponível em: <https://www.artigos.entmme.org/download/2007/aglomeração-agglomeration/1690>. Acesso em: 15 jan. 2024.

MEYER, K. - **Pelletizing of Iron Ores** - Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1995.

MEYER, K. - **Pelletizing of Iron Ores** - Springer - Verlag Berlin, Heidelberg, and Verlag

Stahleissen mbH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1980.

MOURÃO, J. M., 2008. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico: NT minério de ferro e pelotas situação atual e tendências 2025**. Brasília – DF, Brasil: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008. 50 folhas.

MOURÃO, Jose Murilo, 2017. **Aspectos Conceituais Relativos Á Pelotização De Minérios De Ferro**, 2017. 8º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, São Paulo, 2022. Conceitual consultoria mínero-siderúrgica. 2017. 244f, cap 2.

NAHASS, S.; SEVERINO, J. **Calcário Agrícola no Brasil**. In: LUZ, A. B. da (Dir.). Fertilizantes: Agroindústria & Sustentabilidade. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 409 - 443.

PINHEIRO, João César de Freitas. **A mineração brasileira de ferro e a restrição do setor siderúrgico**. 2000. 371 pág. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP.

PORTO, J. P. P.; ARANHA, I. B. **Caracterização Cristalográfica Preliminar de Bentonitas Brasileiras**. Anais da JIC, 2010.

QUARESMA, L.F. **Balanco Mineral Brasileiro**, Elemento Ferro. DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília - DF, 2001. 27 folhas. Brasília. Disponível: <http://www.anm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineralbrasileiro-2001-ferro>. Acesso em 09 de jan.2024.

RESENDE Valadares de Andrade Frederico; João Júlio Tolentino; Leandro Resinentti Zanon. **Aplicação industrial da bentonita sódica superativada após modificação da composição química, para aplicação em produção de pelotas de minério de ferro**, p. 5350-5356. In: *44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 15º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 2º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro*, Belo Horizonte - Brasil, 2014. ISSN: 2594-357X, DOI 10.5151/2594-357X-25458.

RIPKE, S.J. **Advances in iron ore pelletization by understanding bonding and strengthening mechanisms**. 2002. 186. Tese (Doutorado) - Michigan Technological University, Houghton, MI, 2002.

ROCHA, Valéria. **Pontes de avaliação de corpos moedores de ferro fundido branco alto cromo utilizados na moagem da pelotização**. 2023. 66 f. Conclusão de Curso apresentado à

Coordenadoria do Curso de Metalurgia-Bacharel em Engenharia Metalúrgica - Instituto Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2023.

ROMANO GALLO, J. **Efeito de três tipos de calcários na reação do solo e no desenvolvimento da soja.** *Bragantia* *Bragantia*, Volume: 15, Issue: unico, Pages: 121-130, Published: 1956.

SABINO, Ana Flavia. **Influência da qualidade do pellet feed para dosagem de insumos na pelotização.** *Revista Científica Semana Acadêmica*. Fortaleza, ano MMXVI, Nº. 000085, 01/07/2016.

SIQUEIRA, Humberto Fauller de. **Efeitos de aditivos na qualidade de pellets para uso energético.** 2017. 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2017.

TAVARES, L.M., KING, R.P. **Modeling of particle fracture by repeated impacts using continuum damage mechanics.** *Powder Technology*, v.123, p.138-146, 2002.

UMADEVI, T. et al. **Influence of Pellet Basicity (CaO/SiO₂) on Iron Ore Pellet Properties and Microstructure.** *Isij International*, [s.l.], v. 51, n. 1, p.14-20, 2011. Iron and Steel Institute of Japan. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.51.14>.

VALE. Sobre a Vale, 13 jan. 2024. Disponível em: <https://vale.com/pt/tecnologia>.



Data Emissão: 30/01/2024
(Date)

Nº Relatório: 04/2024
(Report Number)

Cliente (Customer): PUC - Coração Eucarístico- Belo Horizonte

Descrição Material (Material Description): Pesquisa Pelota Disco Piloto

Composição Química (Chemical Composition) % *

Identificação (Identification)	Data autorização (Date authorised)	MnO	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	P2O5	TiO2	Fe	Fe2O3	Mn	P	Perda por Calcinação (Loss on Ignition) %
LOTE 01	30/01/2024	0,36	4,42	0,72	0,37	0,15	0,095	0,100	65,486	93,645	0,281	0,041	3,56
LOTE 02	30/01/2024	0,38	4,15	0,74	0,28	0,62	0,097	0,100	63,162	90,322	0,292	0,042	3,84
LOTE 03	30/01/2024	0,36	4,30	0,75	0,85	0,64	0,097	0,090	62,237	88,999	0,280	0,042	4,19

Teste Granulométrico (Granulometry Test) %

Identificação (Identification)	Data autorização (Date authorised)	mm %											
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Umidade (Moisture) %	Perda por Calcinação (Loss on Ignition) %	Cinzas (Ash Dry) %	Material Volátil (Volatile Dry) %	Carbono Fixo (Fixed Carbon Dry) %	%	%	%	%
-	-	-	-	-	-	-	-	-

Detalhes do ensaio (test details):

- Esse ensaio foi realizado conforme procedimentos internos baseados nas normas ABNT ISO/TR 18336:2022 ;NBR ISO3087; NBR ISO 4701; ASTM D7348-21; ASTM D5142; e NBR ISO 9516-1:2003
The test was performed according to Internal procedures based on ABNT ISO/TR 18336:2022 ;NBR ISO3087; NBR ISO 4701; ASTM D7348-21; ASTM D5142; and NBR ISO 9516-1:2003
- Os resultados apresentados nesse relatório referem-se exclusivamente às amostras submetidas aos ensaios nas condições especificadas, não sendo extensível a nenhuma outra amostra que não esteja relacionada acima.
The results presented in this report refer exclusively to the samples submitted to the tests under the specified conditions. These results are not extended to any other samples listed above.
- As condições ambientais conforme exigências técnicas são: 22,6°C <= temperatura <= 30°C e 41% <= umidade relativa <= 80%.
The environmental conditions are according to technical requirements: 22,6 °C <= temperature <=30 ° C and 41% <= relative humidity <= 80%

* Análises Qualitativas.

Rastreabilidade: Controle Interno 8M 3211269; 3211270 e 3211271 respectivamente.

Aprovação dos Resultados: (Results Approval)


Maria Fátima Pereira B. Freitas
Téc. Lab. / 5400880240260 de 16/07/21
CRL 029821/04 - 107 75225

VALLLOUREC SOLUÇÕES TUBULARES DO BRASIL
Rua Industrial S/N - Distrito Industrial - CEP 35488-000 - Jezebra - MG - BRASIL
<http://brazil.vallourec.com/> / E-mail: maria.freitas@vallourec.com / Tel: +55 31 2141-8814

