



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE E PROPORÇÃO DE DIFERENTES
TIPOS DE BENTONITA NAS PROPRIEDADES DAS PELOTAS CRUAS
E QUEIMADAS DE MINÉRIO DE FERRO: ESTADO DA ARTE

Lucas Matheus Magalhães Silva

Ouro Preto, 30 de setembro de 2021

Lucas Matheus Magalhães Silva

**INFLUÊNCIA DA QUALIDADE E PROPORÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE
BENTONITA NAS PROPRIEDADES DAS PELOTAS CRUAS E QUEIMADAS DE
MINÉRIO DE FERRO: ESTADO DA ARTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia
Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade
Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para
a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis

Coorientador: Dr. Rubén Antônio Llobell Solé (*in memorian*)

Ouro Preto, 30 de setembro de 2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao trigésimo dia do mês de setembro de 2021, às 16 horas, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pelo(a) aluno(a) **Lucas Matheus Magalhães Silva**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. DSc. Paulo Santos Assis (Orientador), pelo Prof. DSc. Jorge Luiz Bréscia Murta (DEPRO/UFOP), pelo Eng. Eder Lana de Oliveira (ArcelorMittal Tubarão) e pelo Eng. Raphael Dias de Medeiros (Samarco Mineração). O(A) aluno(a) apresentou a monografia intitulada: *"Influência da Qualidade e Proporção de Diferentes Tipos de Bentonita nas Propriedades das Pelotas Cruas e Queimadas de Minério de Ferro: Estado da Arte"*. O referido trabalho foi coorientado pelo Eng. Rubén António Llobell Solé (Fundação Gorceix, in memorian). A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao(à) aluno(a) um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo(a) aluno(a).

Ouro Preto, 30 de setembro de 2021.

Prof. DSc. Paulo Santos Assis
Orientador – Presidente

Prof. DSc. Jorge Luiz Bréscia Murta
Membro – DEPRO/UFOP

Eng. Eder Lana de Oliveira
Membro – Arcelor Mittal Tubarão

Eng. Raphael Dias de Medeiros
Membro – Samarco Mineração

Lucas Matheus Magalhães Silva
Aluno(a)

Dedico este trabalho à minha querida Mãe Maria Tereza de Fátima Magalhães e ao meu saudoso Pai Jairo Valério Ribeiro Silva que não mediram esforços para eu me tornar um Engenheiro.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, Nossa Senhora da Piedade e a meu São Jorge pelo dom da minha vida, por sempre guiarem meus passos e me ajudarem superar os momentos difíceis.

A toda minha família, em especial meus pais Tereza e Jairo, e minha irmã Anna por todo apoio, carinho, compreensão, educação, valores e incentivos dados. Vocês são a base e o motivo de tudo, sem vocês nada disso seria possível.

Agradeço ao meu orientador científico Professor Doutor Paulo Santos Assis, pelo acompanhamento e apoio científico durante esta investigação. Agradeço em especial ao meu coorientador Doutor. Rubén Antônio Llobell Solé (*in memoriam*) pelo suporte prestado do início ao fim da construção deste trabalho. Essa foi por você professor.

Também ao Doutor Henrique Nogueira Soares, por toda experiência e ensinamentos prestados durante a construção deste estudo, sendo também como um coorientador para mim.

Agradeço a Gloriosa Escola de Minas pelo ensino público e de qualidade. Ao secretário do DEMET Philipe Silva Cardoso de Castro e a chefe da Seção de Ensino Da Escola de Minas Adriana Cristina Cardoso Rodrigues pela disposição e serviços prestados.

Aos integrantes da minha banca de defesa da monografia Éder Lana de Oliveira, Raphael Dias de Medeiros e o Professor Dr. Jorge Luiz Brésia.

Aos meus amigos universitários contemporâneos com quem tive a oportunidade de viver junto na minha Gloriosa República Pasárgada: Camilo Carnog, Matheus da Silva Santos, Gabriel Brandão, Marcos Antônio Souza, Thales Reis, Junio de Oliveira, João Pedro Siqueira, Nicolas Vasca, Ranan de Sá, Rafael Marozzi, Gian Luca Calabro e Matheus Magalhães, pelas melhores conversas e trocas de ideias sobre o trabalho e a vida. À Maria do Carmo Carlos Angelo por ser uma segunda mãe para mim em Ouro Preto.

Agradeço aos meus amigos de infância João Pedro Apolinário, Daniel Mendes e Mateus Leonardo e a todos os bons amigos que conquistei ao longo da minha jornada por todo apoio e incentivo.

Pôr fim agradeço especialmente meu irmão Felipe Theodoro pelo apoio, carinho e confiança incondicional durante todos esses anos que se passaram do período de graduação.

O meu muito obrigado.

“A vida é a arte do encontro,
embora haja tantos desencontros
pela vida”

Vinicius de Moraes

RESUMO

A bentonita é um dos principais orgânicos utilizado na indústria mundial, sendo considerável a sua oferta no mercado, portanto, uma grande disponibilidade deste argilomineral para o seu uso em grande escala, além do fato de possuir propriedades que possibilitam a obtenção de uma enorme gama de produtos. Assim, um material extremamente versátil e de perfil adequado para a confecção de insumos de alto valor agregado. Pode-se afirmar também, que ela é o principal aglomerante utilizado no processo de pelotização de minério de ferro, devido as suas características físico-químicas e o seu custo. Porém, tem o impertinente fato, da bentonita conferir às pelotas cruas e queimadas uma significativa quantidade de óxidos ácidos (SiO_2 e Al_2O_3) e, em menor teor, alguns deletérios como K_2O e Na_2O , oque limita a adição deste aglomerante na fabricação das pelotas de minério de ferro. Sendo assim, o presente trabalho busca realizar um estudo de revisão bibliográfica a respeito da bentonita e a influência do controle sobre sua qualidade e proporção no processo de pelotização de minério de ferro. Assim, será apresentado os impactos que esse aglomerante tem sobre a qualidade da pelota crua ou queimada e a importância do conhecimento sobre as principais características da argila: índice colóide, absorção d'água, grau de inchamento, teor de montmorilonita e granulometria. Neste trabalho, também é mostrado as principais características das pelotas cruas e queimadas, sendo elas: resistência à compressão, porosidade, número de queda, RI, RDI, FSI, como o uso da bentonita impacta diretamente nessas propriedades e como elas são importantes para um bom comportamento da pelota de minério de ferro dentro do alto-forno.

Palavras chaves: Bentonita. Pelotas. Pelotização de minério de ferro.

ABSTRACT

Bentonite is one of the main organics used in the world industry, and its offer on the market is considerable, therefore, there is a great availability of this clay mineral for its use on a large scale, in addition to the fact that it has properties that make it possible to obtain a huge range of products. Thus, an extremely versatile material with a profile suitable for the production of high added value inputs. It can also be stated that it is the main binder used in the iron ore pelletizing process, due to its physicochemical characteristics and its cost. However, there is the impertinent fact that bentonite gives the raw and burned pellets a significant amount of acid oxides (SiO_2 and Al_2O_3) and, to a lesser extent, some deleterious ones such as K_2O and Na_2O , which limits the addition of this binder in the manufacture of iron ore pellets. Therefore, the present work seeks to carry out a literature review about bentonite and the influence of control over its quality and proportion in the iron ore pelletizing process. Thus, this study presents the impacts that this binder has on the quality of either raw or burnt pellets and the importance on knowledge about the main characteristics of the clay: colloid index, degree of swelling, montmorillonite content and granulometry. It is also highlighted the main characteristics of raw and burnt pellets, which are: resistance to compression, porosity, drop number, RI, RDI, FSI, how the use of bentonite directly impacts these properties and how they are important for a good behavior of the iron ore pellet inside the blast furnace.

Keywords: Bentonite, pellets, iron ore pelletizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Estágios de tratamento do minério de ferro, visando à produção de pelotas.	24
Figura 3.2: Fluxograma típico do processo de Pelotização.	25
Figura 3.3: Disco de Pelotamento.	28
Figura 3.4: Formação das Pelotas Cruas em um Disco Pelotizador.	29
Figura 3.5: Forno de queima ou endurecimento da pelota.	31
Figura 3.6: Relação causa x efeito de algumas variáveis.	31
Figura 3.7: (a) Micrografia de uma pelota crua e seca para alto-forno. (b) Micrografia de uma pelota para alto-forno sinterizada a 1360°C.	34
Figura 3.8: Mecanismos de formação das fases presentes na microestrutura da pelota de minério de ferro.	35
Figura 3.9: Desenho esquemático do fenômeno de sinterização.	37
Figura 3.10: Passo a passo do processo de queima das pelotas cruas dentro do forno.	38
Figura 3.11: Microestruturas do interior das pelotas queimadas com diferentes razões de cinza de pirita no MO.	40
Figura 3.12: Análise microestrutural de fases.	41
Figura 3.13: Quantidade de oxigênio removido nas diversas etapas de redução do óxido de ferro.	42
Figura 3.14: Processo de adição do aglomerante à mistura homogeneizada.	45
Figura 3.15: Estrutura montmorilonita.	48
Figura 3.16: Representação da hidratação da montmorilonita cálcica e da montmorilonita sódica.	49
Figura 3.17: Distribuições de tamanho de partícula de amostras de bentonita.	57
Figura 3.18: Distribuição granulométrica da bentonita.	59
Figura 3.19: A distribuição em tamanho real do concentrado de minério de ferro.	60
Figura 3.20: Resultados do teste da bentonita.	61
Figura 3.21: Parâmetros reológicos de diferentes bentonitas.	62
Figura 3.22: Representação de uma rede de argila em expansão de três camadas.	65
Figura 3.23: Diagrama esquemático do modelo de coluna reta (a) e modelo de coluna zig-zag (b), para o arranjo de camadas em suspensões aquosas de montmorilonita.	66
Figura 3.24: Diagrama esquemático da curva reológica da bentonita.	68
Figura 3.25: (a) verde, (b) seca, (c) pelotas queimadas.	69
Figura 3.26: Resistências à compressão de pelotas secas com diferentes tipos de bentonitas.	73
Figura 3.27: Resistências à compressão de pelotas queimadas com diferentes tipos de bentonitas.	73
Figura 3.28: Porosidade de pelotas queimadas com diferentes tipos de bentonitas.	74
Figura 3.29: Número de queda de pelotas verdes com diferentes tipos de bentonita.	75

Figura 3.30: Exigência de bentonita em relação ao índice de dilatação e conclusões CEC.....	76
Figura 3.31: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência de queda da pelota.	77
Figura 3.32: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência à compressão da pelota.	77
Figura 3.33: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na temperatura de choque da pelota.	78
Figura 3.34: Relações entre a viscosidade plástica e a resistência da pelota verde.....	80
Figura 3.35: A relação entre limite de escoamento e a resistência da pelota verde.	81
Figura 3.36: relação entre a viscosidade aparente e a resistência da pelota verde.	82
Figura 3.37: O efeito das espécies de cátions nas propriedades reológicas da bentonita.....	82
Figura 3.38: Parâmetros reológicos de bentonita com diferentes cátions.	83
Figura 3.39: O efeito das espécies de ânions nas propriedades reológicas da bentonita.....	85
Figura 3.40: Parâmetros reológicos de bentonita com diferentes ânions.	85
Figura 3.41: Efeito do teor de MgO no FSI de pelotas queimadas.	86
Figura 3.42: Efeitos da basicidade e teor de MgO no FSI de pelotas especularíticas.	87
Figura 3.43: Conceito de força (F) compressiva uniaxial para esferas.	88
Figura 3.44: Máquina utilizada para determinação da resistência a compressão.....	88
Figura 3.45: Diagrama esquemático da aparelhagem utilizada no teste de RI.....	90
Figura 3.46: Diagrama esquemático da aparelhagem utilizada no teste de RDI.....	92
Figura 3.47: Tambor acoplado ao equipamento de rotação utilizado para o teste de RDI.....	93
Figura 3.48: Peneira com abertura de 2,8mm utilizada no teste de RDI.....	93
Figura 3.49: Forno utilizado nos testes de RI, RDI e FSI.	94
Figura 3.50: Suporte para pelotas usado no ensaio de FSI.....	94
Figura 3.51: Balança hidrostática.	95
Figura 3.52: Pelotas antes do ensaio de FSI.	96
Figura 3.53: Pelotas após o ensaio de FSI.	96
Figura 3.54: Picnômetro a hélio.	97
Figura 3.55: Fluxograma do minério de ferro na indústria siderúrgica.	99
Figura 3.56: Zonas do AF onde as propriedades das pelotas são colocadas a prova.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Minérios de Ferro - Situação do Quadrilátero Ferrífero.....	16
Tabela 3.2: Produção Mundial de Minério de ferro.	17
Tabela 3.3: Principais Estatísticas do Minério de Ferro - Brasil.....	19
Tabela 3.4: Capacidade Mundial de Pelotização e futura expansão.....	21
Tabela 3.5: Produção/Venda de Minérios de Ferro e Pelotas - VALE – 2018.....	22
Tabela 3.6: Características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.	26
Tabela 3.7: Influência das principais variáveis de processo nas características das pelotas cruas.	30
Tabela 3.8: Características das pelotas cruas e sua influência no processo de queima e na qualidade das pelotas queimadas.....	33
Tabela 3.9: Reserva e produção mundial de Bentonita.	50
Tabela 3.10: Número de usos industriais da bentonita.....	53
Tabela 3.11: Análise química da amostra de magnetita.	56
Tabela 3.12: Análises químicas de amostras de bentonita.	56
Tabela 3.13: CEC e índices de inchamento de amostras de bentonita.	58
Tabela 3.14: Análise física e química do concentrado de minério de ferro (%).	58
Tabela 3.15: Análise química das bentonitas (%).	59
Tabela 3.16: Efeito da bentonita sódica na resistência a compressão e queda de pelotas.....	70
Tabela 3.17: Efeito da Ca-Bentonita ativada e da bentonita mista na resistência à compressão, porosidade e resistência à queda de pelotas	74
Tabela 3.18: Efeito do tipo de bentonita nas características das pelotas cruas.	76
Tabela 3.19: Principais propriedades das pelotas queimadas para alto forno.	101

LISTA DE SIGLAS

RI - Índice de Redutibilidade;

RDI - Índice de Degradação sob Redução;

FSI – Índice de Inchamento Livre;

AF – Alto-forno;

LTD – Degradação em baixas temperaturas;

ROM – *Run of mine*;

TG - *Traveling Grate*;

RK - *Rotary-Kiln*;

SF - *Shaft Furnace*;

CMC – carboximetilcelulose;

CQI - Composite Quality Index;

ZRT – Zona de reserva térmica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	Cenário nacional atual do minério de ferro.	15
3.2	Cenário nacional da fabricação de pelotas.....	19
3.3	Processo de Pelotização e sua importância.....	23
3.3.1	O que é pelotização?.....	23
3.3.2	Preparação da matéria-prima	25
3.3.3	Mecanismo de formação e crescimento de pelotas cruas	27
3.3.3.1	Etapas de pré-queima das pelotas.	31
3.3.4	Tratamento térmico das pelotas (queima).....	32
3.3.5	Qualidade de Pelotas.....	34
3.3.5.1	Resfriamento das pelotas	37
3.3.6	Propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da pelota	38
3.3.6.1	Resistência à compressão	39
3.3.6.2	Porosidade	40
3.3.6.3	Microestrutura	40
3.3.6.4	Susceptibilidade ao inchamento	41
3.3.6.5	Redutibilidade.....	41
3.3.6.6	Susceptibilidade à desintegração.....	43
3.3.6.7	Índice de Tamboramento e Resistência a abrasão das pelotas queimadas ..	43
3.4	Aglomerantes usados na pelotização de minério de ferro	44
3.5	Bentonita.....	46
3.6	Diferentes tipos de bentonita e suas aplicações como aglomerante no processo de pelotização de minério de ferro	55
3.7	As principais características da bentonita.....	63
3.8	A influência da bentonita em diversas proporções e qualidade nas características da pelota crua	68
3.9	A influência da bentonita em diversas proporções e qualidade nas características da pelota queimada	86
3.10	A influência dos testes que representam o comportamento da pelota obtida no alto forno.....	99
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

O principal e mais utilizado aglomerante para o processo de pelotização mundial é a Bentonita. A oferta deste aglomerante no mundo é bastante considerável, porém a disponibilidade e as reservas brasileiras são relativamente limitadas. Embora a Bentonita seja um excelente aglomerante, tem o impertinente fato de adição às pelotas de uma significativa quantidade de óxidos ácidos (sílica e alumina) e, em menor dosagem, alguns compostos deletérios como K_2O e Na_2O . Sendo assim, existe um limite de adição deste aglomerante na produção de pelotas para o processo de redução, devido a exigência de altos teores de Ferro e baixos teores de $SiO_2 + Al_2O_3$ (MURILO MOURÃO, 2017).

A alta demanda por minério de ferro, impulsionada pelo crescimento mundial e busca por baixos teores de sílica, por parte dos produtores de ferro esponja (redução direta), nos últimos 10 anos, potencializaram a oportunidade de avanço em pesquisas sobre os aglomerantes para a pelotização. Por isso a necessidade de estudos mais aprofundados para a bentonita, que colabora com a elevação do teor de sílica (FONSECA, 2003 *apud* LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

Nesse contexto, como o estudo da qualidade e proporção de diferentes tipos de bentonita como aglomerante na produção de pelotas de minério de ferro podem contribuir para o desenvolvimento e/ou melhoria de processos dos laboratórios de pesquisa de instituições de ensino superior e na cadeia de produção do aço na Siderurgia nacional?

Buscando uma alternativa para solucionar o problema acima, o presente trabalho busca realizar um estudo de revisão bibliográfica a respeito da bentonita e a influência do controle sobre sua qualidade e proporção no processo de pelotização de minério de ferro e o que justifica essa investigação é a necessidade de ampliar o conhecimento sobre a bentonita, enquanto aglomerante para o processo, e analisar a influência das proporções e qualidades de diferentes tipos deste aglomerante para um processo “ideal”. Ainda que, nos dias atuais, existe uma extrema necessidade de bibliografias atualizadas referindo-se sobre a qualidade da bentonita como aglomerante e a influência que o controle de suas principais propriedades (índices coloides, absorção de água e tamanho acima de $200mesh$) tem para o processo de pelotização de minério de ferro, causando impacto direto nas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da pelota, contribuindo assim para o desenvolvimento do processo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é fazer uma investigação bibliográfica da influência da qualidade e o uso em proporções variadas de diferentes tipos de bentonita como aglomerante na produção de pelotas cruas e queimadas de minério de ferro, analisando o impacto nas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, assim como a influência destas propriedades na marcha do alto-forno.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um estudo de revisão bibliográfica sobre diferentes tipos de bentonita e suas aplicações como aglomerante no processo de pelletização de minério de ferro.
- Descrever as principais características da bentonita.
- Descrever a sua influência em diversas proporções e qualidade nas características da pelota crua.
- Descrever a sua influência em diversas proporções e qualidade nas características da pelota queimada.
- Descrever a influência dos testes que representam seu comportamento no alto-forno.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Cenário nacional atual do minério de ferro.

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, onde entra na proporção de 4,2%. Entre todos os metais o ferro é o mais produzido e o que está mais presente em nossa vida. Inúmeros minerais têm ferro como componente essencial, mas somente os óxidos apresentam grandes concentrações. Os principais minerais que contêm ferro são: hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeO/OH) e siderita (FeCO_3). As formações ferríferas compostas de hematita e sílica, denominadas itabiritos, se constituem nos maiores depósitos de ferro (JESUS, 2009; CARVALHO et al., 2014).

Cerca de 99,0% do minério de ferro produzido são utilizados na fabricação de aço e ferro fundido. Outras aplicações são as indústrias de ferro-ligas e cimento. A produção de minério de ferro no Brasil se desenvolve em minas a céu aberto. A lavra é em bancadas com desmonte por explosivos, escavadeiras, carregamento em pás carregadeiras, transporte em caminhões fora-de-estrada. O beneficiamento consiste de britagem, peneiramento, lavagem, classificação, concentração e pelletização (JESUS, 2009)

O minério bruto (ROM) após o beneficiamento gera produtos classificados como granulados (acima de 6,3mm) e finos (*sinter feed* – entre 0,15mm e 6,3mm e *pellet feed* – abaixo de 0,15mm). Os granulados são utilizados diretamente nos altos fornos. Os finos passam por processos de aglomeração (sinterização e pelletização), para posteriormente serem adicionados nos fornos de redução (TAKEHARA, 2004 *apud* JESUS, 2009)

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

Analisando na Tabela 3.1, o perfil do *Run of Mine* (ROM) do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero e seus principais produtos da sua lavra desde a década de 40 até projeções futuras para o ano de 2025. Nota-se claramente que nos anos de 1940, as jazidas eram compostas por minérios ricos “hematitas grosseiras”, cujo produto principal era o granulado

(com tamanho até 200mm). Com o passar dos anos, levando em consideração a evolução da lavra e o aumento da demanda mundial por minério de ferro, nota-se que houve uma perda na qualidade de tal, passando agora, as reservas a serem compostas por minérios mais pobres “itabiritos”, cujos principais produtos de sua lavra passam a ter além de granulados, concentrados finos, os *sínter feeds e pellet feeds*.

Tabela 3.1: Minérios de Ferro - Situação do Quadrilátero Ferrífero.

Década	Tipo de Run of Mine	Principais Produtos	ROM	
			Hematita	Itabirito
40's	Minérios ricos ("hematitas grosseiras")	Granulados (até 200mm)	100%	0%
50 / 60's	Minérios ricos ("hematitas grosseiras a maior profundidade")	Granulados (12,7 - 75mm) SF natural (<12mm) "Blue dust"		
70's	Minérios ricos ("hematitas grosseira e fina") Itabiritos ricos	Granulados (12,7 - 75mm) SF natural (<12,7mm) SF concentrado (<6,35mm) Concentrados He - Pelotas		
80 / 90's	Minérios ricos ("hematitas finas") Itabiritos ricos e Itabiritos pobres	Granulados (10 - 75mm) SF natural (<12,7mm) SF concentrado (<6,35mm) Concentrados He e It - Pelotas		
+2000	Itabiritos pobres Empobrecimento dos Itabiritos Diminuição drástica dos minérios ricos	Granulados (10 - 75mm) SF natural (<12,7mm) SF concentrado (<6,35mm) Concentrados He e It - Pelotas		
+2025	Itabiritos + pobres Itabiritos compactos!	Concentrados: pellet feed	0%	100%

Fonte: MOURÃO, (2008).

Austrália, Brasil e China, juntos produziram 70% de todo o minério de ferro produzido no mundo em 2018 como é possível observar na Tabela 3.2, sendo estes países, os 3 maiores produtores mundiais de minério de ferro. Também é possível observar que Austrália, Brasil e Rússia possuem as maiores reservas com relativo alto teor de ferro contido em 2018. A China possui uma reserva expressiva, entretanto, com um baixo teor de ferro contido (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 2020).

Tabela 3.2: Produção Mundial de Minério de ferro.

Países	ROM		Teor de Ferro		Reservas	
	2018	2019	2018	2019	Minério Bruto	Teor de Ferro
Estados Unidos	49500	48000	31300	31000	3000	1000
Austrália	900000	930000	557000	580000	48000	23000
Brasil	460000	480000	250000	260000	29000	15000
Canadá	52400	54000	31500	33000	6000	2300
Chile	14000	14000	8940	9000	0	0
China	335000	350000	209000	220000	20000	6900
Índia	205000	210000	126000	130000	5500	3400
Iran	36400	38000	23900	25000	2700	1500
Cazaquistão	41900	43000	11700	12000	2500	900
México	22300	23000	14000	14000	0	0
Peru	14200	15000	9530	10000	0	0
Rússia	96100	99000	56700	59000	25000	14000
África do Sul	74300	77000	47200	49000	1100	690
Suécia	35800	37000	22200	23000	1300	600
Ucrânia	60300	62000	37700	39000	6500	2300
Outros Países	62500	62000	35800	35000	18000	9500
Total Mundo	2459700	2542000	1472470	1529000	168600	81090

Fonte: UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2020).

A produção brasileira de minério de ferro no ano de 2017 atingiu 453,7Mt (milhões de toneladas), com um teor médio de 63,7% de ferro. Em relação a 2016 houve um aumento de 7,7%. O valor da produção, R\$ 63,1 bilhões, aumentou 36,9% em comparação com o ano anterior, refletindo o aumento dos preços no mercado internacional. Os principais estados produtores foram: Minas Gerais (62,0%), Pará (37,3%) e Mato Grosso do Sul (0,6%). VALE S/A (MG, MS e PA), CSN-MINERAÇÃO (MG), Anglo American Minério de Ferro Brasil S/A (MG), Gerdau Açominas S/A (MG) e Itaminas Comércio de Minérios S/A (MG) foram as principais empresas produtoras e, juntas, respondem por 93,2% da produção. Por tipo de produto a produção se dividiu em: granulados (6,9%) e finos (93,1%), estes distribuídos em *sinter feed* (75,1%), *pellet feed* (24,8%) e *pellet screening* (0,1%) (JESUS e JOAQUIM, 2018).

Em 2017 a quantidade exportada de minério de ferro e pelotas atingiu um novo recorde. Foram exportadas 383,5Mt, com um valor de US\$-FOB 19,2 bilhões. Em comparação com o ano anterior houve um aumento de 2,6% na quantidade e 44,5% no valor. Foram exportadas 353,3Mt de minério (+2,5%), com um valor de US\$-FOB 16,7 bilhões (+44,4%) e 30,3Mt de pelotas (+2,9%), com um valor de US\$-FOB 2,5 bilhões (+45,1%). O preço médio de exportação de minério (47,3 US\$-FOB/t) foi 40,9% maior que o registrado em 2016. O preço médio das pelotas (82,1 US\$-FOB/t) foi 41,0% maior do que no ano anterior. Os principais

países de destino foram: China (54%), Japão (7%), Malásia (6%), Países Baixos - Holanda (5%) e Omã (3%) (JESUS e JOAQUIM, 2018).

O aumento nos preços médios de exportação é decorrente da elevação dos preços do minério de ferro de alto teor (65%). Em 2017 foram observadas maiores diferenças de preços entre minério de ferro de alta e baixa qualidade e a expectativa é que esse diferencial de preços continue impactando o mercado nos próximos anos. O movimento em direção a uma indústria siderúrgica mais eficiente, associado à implementação de políticas ambientais mais estritas na China, deverá manter a demanda por produtos de alta qualidade, como pelotas e os minérios da VALE (minas de Carajás), que proporcionam maior produtividade e menores níveis de emissão de carbono. Em relação aos minérios de baixo teor e alto nível de contaminantes, a oferta relativamente alta deve manter a pressão sobre os descontos nos preços destes produtos (JESUS e JOAQUIM, 2018).

O consumo interno de minério de ferro está concentrado na produção de ferro gusa e pelotas. Em 2017 o consumo aparente (produção + importação - exportação) foi de 100,4Mt, representando um aumento de 30,8% em relação a 2016. O consumo efetivo (consumo na indústria siderúrgica e nas usinas de pelotização) está estimado em 94,7Mt, ficando 9,0% acima do registrado em 2016, reflexo do aumento na produção brasileira de ferro gusa (+9,0%) e pelotas (+9,1%). O consumo efetivo foi estimado com base nos dados de produção de ferro gusa e pelotas (32,2Mt e 41,1Mt, respectivamente) e nos índices médios de consumo informados pelas empresas produtoras (1,56t de minério/t de gusa e 1,08t de minério/t de pelotas) (JESUS e JOAQUIM, 2018).

Observa-se na Tabela 3.3 as principais estatísticas do minério de ferro no Brasil.

Tabela 3.3: Principais Estatísticas do Minério de Ferro - Brasil

Discriminação	Unidade	2015 (r)	2016 (r)	2017 (p)
Produção	Minério (t)	430.838.137	421.358.009	453.703.886
	Pelotas (t)	62.659.000	37.667.000	41.098.000
Importação	Minério (t)	-	-	-
	(10 ³ US\$-FOB)	-	-	-
	Pelotas (t)	-	-	-
	(10 ³ US\$-FOB)	-	-	-
Exportação	Minério (t)	315.020.627,00	344.548.050,00	353.261.492,00
	(10 ³ US\$-FOB)	10.378.928,00	11.575.970,00	16.712.952,00
	Pelotas (t)	51.173.822,00	29.414.918,00	30.275.680,00
	(10 ³ US\$-FOB)	3.697.172,00	1.713.371,00	2.486.202,00
Consumo aparente (1)	Minério (t)	115.817.510	76.809.959	100.442.394
Consumo efetivo (2)	Minério (t)	117.763.320	86.836.080	94.691.160
Preços	Minérios (3) (R\$/t)	105,6	113,6	148,4
	Minérios (4) (US\$-FOB/t)	33	33,6	47,31
	Pelotas (4) (US\$-FOB/t)	72,3	58,3	82,12
	Lump (5) (US\$-FOB/t)	32,3	33,1	82,12
	Sinter-Feed (5) (US\$-FOB/t)	32,2	32,8	47,42
	Pellet-Feed (5) (US\$-FOB/t)	31,7	36,3	47,81

(1) Produção + importação – exportação; (2) consumo na indústria siderúrgica somado ao consumo nas usinas de pelotização (1,56 t minério/t de gusa; 1,08 t de minério/t de pelotas); (3) preço médio FOB-mina, minério beneficiado; (4) preço médio FOB = exportação; (5) preço médio FOB – RAL (Mercado consumidor – principais compradores); (p) preliminar; (r) revisado; (-) nulo.

Fonte: (JESUS e JOAQUIM, 2018).

3.2 Cenário nacional da fabricação de pelotas.

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

Com esse novo processo a empresa passou a reaproveitar o minério ultrafino (*pellet feed*), considerado rejeito nas minas e transformá-lo em pelotas feitas sob medida para a indústria siderúrgica, gerando ganhos ambientais e econômicos. Baseada em pesquisas que apontavam para o crescimento da demanda mundial por este produto, a Vale deu início a

construção de sua segunda usina de pelletização no Complexo, dimensionada para produzir 3 milhões de toneladas anuais e inaugurada em 1973 (VALE, 2016).

Após inaugurar duas usinas de pelletização próprias, com capacidade anual de produção de 5 milhões de toneladas, os resultados vieram tanto para a Vale quanto para o Espírito Santo, que registrou um aumento em exportações e maior investimento no estado. O desafio passou a ser identificar parceiros interessados em investir neste empreendimento no Brasil. Assim, surgiram as parcerias com grandes grupos siderúrgicos, como na década de 70 com a Itabasco (Itália – Usina 3), Hispanobrás (Espanha – Usina 4) e Nibrasco (Japão – Usinas 5 e 6) e, já no final dos anos 90, com a Kobrasco (Coreia do Sul – Usina 7), todas em Tubarão. Estas sociedades foram constituídas sob a forma de *joint ventures*, ou seja, pela associação do capital nacional com capital estrangeiro. Hoje a Vale conta com 13 usinas sendo 8 em Tubarão, 2 em Minas Gerais, 1 em São Luís e 2 em Omã (VALE, 2016).

No Espírito Santo, onde estão instaladas as usinas de 1 a 8, a Vale mantém o maior polo de pelletização do mundo, cuja produção contribui de forma significativa para os recordes alcançados pela empresa nos últimos anos (VALE, 2016).

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

Além das usinas instaladas aqui, com capacidade de 36,2 milhões de toneladas de pelotas por ano, a Vale também possui duas usinas em Minas Gerais, que pode produzir até 11 milhões de toneladas, e mais duas em Omã, com capacidade de 4,5 milhões de toneladas cada uma. Em 2002 foi inaugurada em São Luís no Maranhão uma usina de Pelotização com capacidade de produção de 7 milhões de toneladas de pelotas por ano. Em 2012 por motivos de demanda do mercado, as operações desta unidade foram paralisadas (VALE, 2016).

No processo de consolidação da área de mineração, a partir de 2000, a Vale fez aquisições da Ferteco (100% / 1 planta) e parte da Samarco (50% / 2 plantas). A capacidade total brasileira é de cerca de 55 milhões de toneladas, o que representa 15% da produção mundial (377 milhões de toneladas). Nessa configuração, a Vale tem participação em todos os

ativos brasileiros de pelletização. No momento atual, 2008, a empresa investe em 3 outras grandes unidades brasileiras: Vale 3, Samarco 3 e Vargem Grande, o que possibilitará a oferta ao mercado de mais 22,5 milhões de toneladas de pelotas por ano, até 2010. Nesse ano, a MMX entrará com sua primeira unidade fabril no Brasil, com capacidade de 7 milhões de toneladas de pelotas por ano, de acordo com a concepção do seu projeto Minas-Rio (MOURÃO, 2008).

Observa-se na Tabela 3.4 a Capacidade Mundial de Pelotização e uma perspectiva de sua futura expansão.

Tabela 3.4: Capacidade Mundial de Pelotização e futura expansão.

Capacidade Mundial t x 10 ⁶	Plantas no Brasil	Capacidade t x 10 ⁶			
	Vale 1 - Vitória ES - 100% Vale	2,60			
América do Norte	Vale 2 - Vitória ES - 100% Vale	3,60			
Canadá	Itabasco - Vitória ES - 51% Vale / 49% ILVA	4,50			
México	Hispanobrás - Vitória ES - 51% Vale / 49% ArcelorMittal	4,80			
Estados Unidos	Nibrasco - Vitória ES - 51% Vale / 49% JSM*	10,50			
	Kobrasco - Vitória ES - 50% Vale / 50% Posco	4,70			
América do Sul	Fábrica - Congonhas MG - 100% Vale	4,50			
BRASIL	São Luís - São Luís MA - 100% Vale	7,20			
Chile					
Peru	Samarco 1 - Anchieta ES - 50% Vale / 50% BHPB	6,50			
Venezuela	Samarco 2 - Anchieta ES - 50% Vale / 50% BHPB	6,50			
Europa	Total Brasil 2007	55,40			
Holanda	Total Brasil 2010	84,90			
Rússia (*)					
Eslováquia	(*) JSM - Japanese Stell Mills em consórcio				
Suécia					
Turquia	Projetos de Expansão - MUNDO				
		Capacidade t x 10 ⁶	Start up	Acréscimo Capacidade **	t x 10 ⁶
Ásia	Samarco 3 - Brasil	7,50	2008	2008	35,20
Bahrain	Vargem Grande - Brasil	7,50	2008	2010	44,50
CHINA	Vale 3 - Brasil	7,50	2010	2011	22,00
Índia	MMX Minas Rio - Brasil	7,00	2010	2014	29,00
Irã	Kiruna 3 - Suécia	5,00	2008	2015	7,00
Japão	Zuhai - China	1,20	2008		
	Ying Kou - China	4,00	2008	Acréscimo até 2015	137,70
Oceania	New Millenium - Canadá	15,00	2011		
Austrália	Gol-e-Gohar Mining - Irã	10,00	2008	(**) China/outros: distribuído 2009/15	
	Sohar Industrial - Omã	9,00	2010		
Total Geral	Grande Resources - Malásia	7,00	2010		
(*) Inclui CIS	Ferrexpo - Ucrânia	8,00	2014		
	China / outros projetos	49,00	até 2015		

Fonte: (MOURÃO, 2008).

A produção brasileira de pelotas em 2017 totalizou 41,1Mt. Em comparação com 2016 houve um aumento de 9,1%. A VALE S/A foi a única empresa produtora e operou seis usinas no Porto de Tubarão/ES, além das usinas de Fábrica (Ouro Preto-MG) e Vargem Grande (Nova Lima - MG). O crescimento da produção se deveu ao aumento da produtividade e ao menor número de paradas programadas para manutenção das usinas (JESUS e JOAQUIM, 2018).

A Vale S/A pretende aumentar a sua produção de pelotas para atender ao forte crescimento da demanda. Foi retomada, no primeiro semestre de 2018, a produção nas usinas de São Luís, no Maranhão, e Tubarão I/II, instaladas no Porto de Tubarão, no Espírito Santo. A capacidade de produção de pelotas da usina de São Luís é de 7,5Mt por ano e a capacidade de produção das usinas Tubarão I e II é de 6,2Mt por ano. O investimento total será de US\$ 150 milhões (JESUS e JOAQUIM, 2018).

Na Tabela 3.5 temos os dados de produção/vendas de minério de ferro e pelotas da Companhia Vale S/A no ano de 2018.

Tabela 3.5: Produção/Venda de Minérios de Ferro e Pelotas - VALE – 2018.

Minérios de Ferro (Mt)			Pelotas (Mt)		
Sistema	Mina	Produção	Sistema	Usina	Produção
Norte	Total	193,6	Norte	Total	0,95
	Serra Norte e Leste	135,64		São Luiz	0,95
	S11D	58			
Sudeste	Total	104,39	Sudeste	Total	33,57
	Itabira	41,72		Tub 1 e 2	3,75
	Minas Centrais	36,01		Itabrasco	4,34
	Mariana	26,66		Hispanobrás	4,1
				Nibrasco	9,27
		Kobrasco	4,77		
Sul	Total	84,14	Sul	Tub 8	7,34
	Paraopeba	27,3		Total	10,62
	Vargem Grande	21,37		Fábrica	4,06
	Minas Itabirito	34,47		Vargem Grande	6,56
Centro	Total	2,47	Omã	9,54	
Oeste	Corumbá	2,47	Outras	0,63	
Total de Produção		384,64	Total de Produção		55,3
Total de Venda		308,98	Total de Venda		56,59

Fonte: (VALE, 2018).

3.3 Processo de Pelotização e sua importância.

3.3.1 O que é pelotização?

Basicamente é um processo de aglomeração de particulados pequenos, objetivando seu aproveitamento econômico. Geralmente as pelotas, assumem formas esféricas, cilíndricas ou arredondadas (VALE, 2020; VIEIRA, 2014).

Processo de aglomeração de finos de minério de ferro via processamento térmico a elevadas temperaturas (1300°C-1350°C), possibilitando:

- Aproveitamento econômico da fração de partículas ultrafinas (< 0,150mm) gerada nas minas;
- Ajuste da qualidade química e física e agregação de valor às cargas metálicas de altos fornos e reatores de redução direta (VIEIRA, 2014).

Atualmente, duas tecnologias dominam o mercado produtor de pelotas, respondendo por mais de 95% da produção mundial: *Traveling Grate* (TG) e *Rotary-Kiln* (RK). O antigo e obsoleto processo, denominado *Shaft Furnace* (SF), de baixa capacidade, possui ainda alguns fornos em operação, principalmente na China. No entanto, paulatinamente, tendem a desaparecer, tendo-se em vista os custos operacionais mais elevados. Os fornos TG caminham para a capacidade de 10Mt/a, enquanto os do tipo RK avançam para atingir 6Mt/a. A capacidade limite do SF é de apenas 0,5Mt/a (MURILO MOURÃO, 2017; ZHU et al., 2015).

O processo TG é indicado para processar qualquer tipo de minério de ferro. O RK é mais apropriado para minérios magnetíticos ou misturas destes com os hematíticos, embora haja plantas desse processo operando com 100% de hematita. Independentemente da tecnologia de pelotização considerada, três são os estágios de tratamento do minério de ferro, visando à produção de pelotas como podemos observar na Figura 3.1 (MURILO MOURÃO, 2017).



Figura 3.1: Estágios de tratamento do minério de ferro, visando à produção de pellets.

Fonte: (MURILO MOURÃO, 2017).

Os minérios têm de ser moídos e concentrados, gerando quantidades expressivas de finos abaixo de 0,15mm, próprios para a pelletização. No Brasil, essa atividade é bem desenvolvida, prevalecendo o uso da tecnologia *Traveling Grate*. O processo de pelletização foi desenvolvido para o aproveitamento desses minérios concentrados, ultrafinos, impróprios para o uso direto nos fornos siderúrgicos de produção de ferro primário, tais como: alto-forno, reator de redução direta, Corex, etc. A pelletização consiste na aglomeração desses finos, transformando-os em esferas de diâmetro médio da ordem de 12mm, com propriedades químicas, físicas e metalúrgicas adequadas para uso na Siderurgia (MURILO MOURÃO, 2017; ZHU et al., 2015).

Segundo Meyer (1980, p.6) a primeira planta piloto de pelletização, com capacidade de produção de 120 toneladas por dia, só foi construída após a primeira guerra mundial na Alemanha, em 1926, e reconstruída em 1935, ainda na Alemanha. A partir da década de 1940, à medida que ocorria o desenvolvimento tecnológico da mineração de minério de ferro, o processo de pelletização passou a ter um papel mais importante na rota de produção do aço, pelo descobrimento de seu potencial para agregação de valor na cadeia de produção, pela viabilização da lavra e beneficiamento de minérios menos compactos, friáveis e de menor teor de ferro. É neste contexto que o conceito de pelletização se consolida e se mantém viável e em desenvolvimento até os dias de hoje (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018; MEYER, 1980).

Observa-se na Figura 3.2 o fluxograma típico do processo de Pelotização.

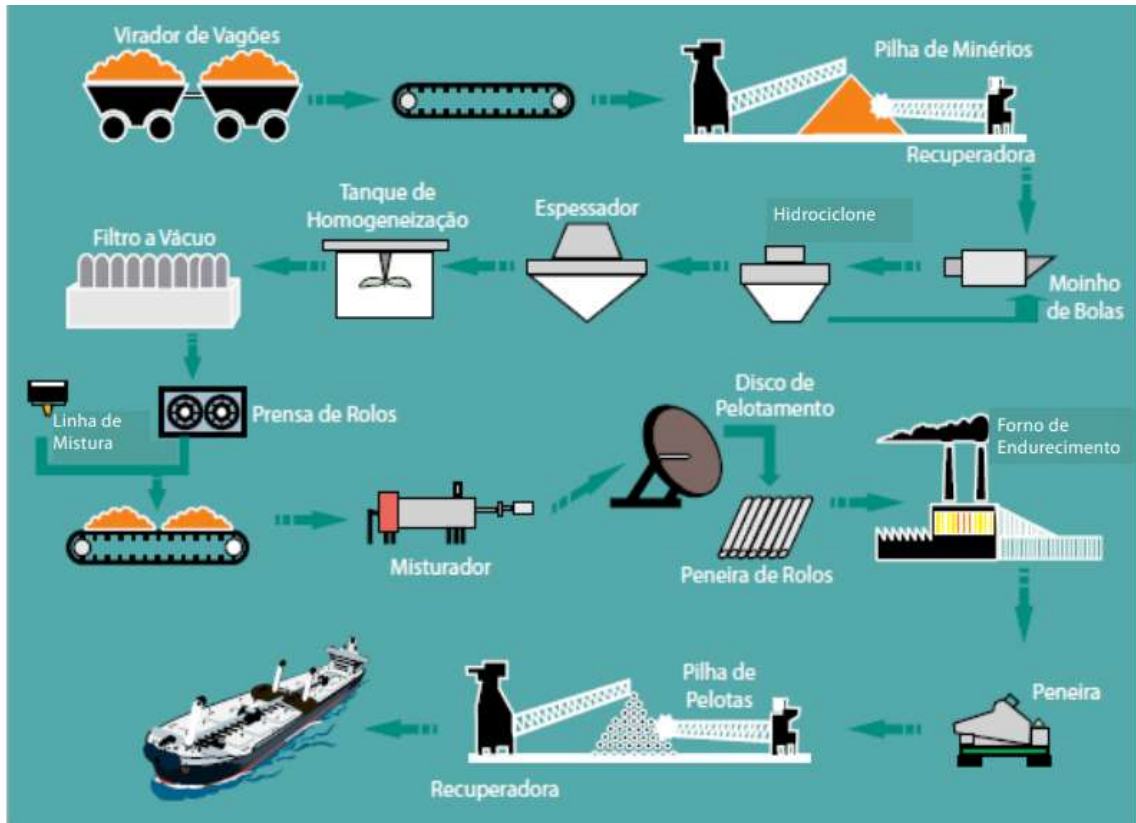


Figura 3.2: Fluxograma típico do processo de Pelotização.

Fonte: (SAAB et al., 2012).

O processo de pelotização pode ser classificado em três fases denominadas de preparação das matérias primas, pelotamento ou formação das pelotas cruas e seu processamento térmico para produção das pelotas queimadas (MEYER, 1980).

3.3.2 Preparação da matéria-prima

No universo da pelotização, a matéria prima é conhecida como *pellet feed*, que é o minério de ferro com teor de umidade entre 8% e 10%, previamente moído até adquiriras características requeridas de granulometria na fração menor do que $44\mu\text{m}$ (88% mínimo) e superfície específica ($1650\text{cm}^2/\text{g}$ mínimo). Este minério de ferro moído, recebe a adição de insumos essenciais, para garantir a qualidade das pelotas produzidas, em termos das suas características físicas, químicas e metalúrgicas, necessárias à sua utilização nos processos subsequentes (pelotamento e queima)(LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018; ZHU et al., 2015).

Os principais insumos utilizados no processo de pelotização são: carvão mineral(antracito), calcário, magnesita, olivina, bentonita, aglomerantes orgânicos e, em alguns casos, cal hidratada. Após a adição dos insumos ao *pellet feed* em proporções adequadas, é feita uma mistura dos mesmos para que se obtenha uma perfeita homogeneização do material a ser alimentado nos discos ou tambores de pelotização (VIEIRA, 2014; ZHU et al., 2015).

Observa-se na Tabela 3.6 dados típicos de análise química dos principais insumos utilizado no processo de pelotização:

Tabela 3.6: Características químicas típicas dos insumos empregados em pelotização.

Composição (%)	Calcário Calcítico	Calcário Dolomítico	Magnesita	Olivina	Carvão	Bentonita
Fe total	-	-	-	5,1	-	5,4
SiO ₂	4,0	3,4	6,1	41,8	-	54,0
Al ₂ O ₃	-	-	-	0,4	-	15,5
CaO	49,5	37,4	0,7	0,1	-	1,0
MgO	3,4	17,7	43,5	45,5	-	2,3
PPC	40,8	42,9	45,9	0,5	-	8,7
Carbono Fixo	-	-	-	-	72,5	-
Matérias voláteis	-	-	-	-	11,1	-
Cinzas	-	-	-	-	16,5	-
Poder Calorífico (cal/g)	-	-	-	-	63,1	-

Fonte:(FONSECA, 2003; LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

No que diz a respeito dos demais materiais para a pelotização de minério de ferro, poderiam ser classificados quanto à função como (MURILO MOURÃO, 2017):

- Dosadores de CaO: Calcário Calcítico e Cal Hidratada,
- Dosadores de MgO: Calcário Dolomítico (dolomita), Dunito e Magnesita,
- Aglomerantes: Bentonita, Cal Hidratada (dupla função), Carboxi ou HidroxiMetil-Celulose, etc.,
- Combustíveis sólidos: Antracito, Coke Breeze e coque de petróleo.

As principais finalidades da utilização desses insumos ao *pellet feed*, são descritos a seguir (FONSECA, 2004):

Carvão mineral: 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 (FONSECA, 2004).

Calcário: fornece o óxido de cálcio (CaO) e de magnésio (MgO) necessários ao processo de endurecimento da pelota. O CaO é fundamental no processo físico-químico de formação dos compostos que irão favorecer a geração de uma ganga ácida a temperaturas mais baixas, fortalecendo a ligação entre os grãos de minério. O MgO atuará melhorando as propriedades das pelotas durante o processo de redução, pela formação de gangas com ponto de fusão mais elevados. Sua utilização é fundamental para que a pelota queimada adquira resistência mecânica e características metalúrgicas adequadas aos processos posteriores (FONSECA, 2004).

Aglomerantes/ligantes: No processo de pelotização, o aglomerante mais utilizado é a bentonita, de origem inorgânica. Este insumo, devido principalmente aos elevados teores de sílica, favorece a redução do teor de ferro das pelotas para redução direta. Diante deste cenário, um desenvolvimento conjunto entre a Samarco Mineração S/A e fornecedores, possibilitou a substituição da bentonita por uma aglomerante orgânico, que é utilizado como ligante no processo de aglomeração a frio das partículas de minério de ferro. O aglomerante orgânico utilizado atualmente é uma mistura cuja base é a celulose, conhecido comercialmente como CMC (carboximetilcelulose). A formulação básica deste consiste de dois componentes básicos, um polímero que é um eficiente imobilizador de água, o qual fornece o mecanismo necessário para o controle da taxa de crescimento das pelotas e que trabalha sinergicamente com o ativador, que promove o uso eficiente do ligante e melhora as propriedades físicas das pelotas cruas e queimadas. Em solução aquosa, o CMC forma uma solução altamente viscosa com o comportamento de filme líquido diluído. Este fator é importante para a formação de uma boa estrutura na pelota crua, para o controle da formação dos capilares e do tamanho das pelotas cruas (FONSECA, 2004).

3.3.3 Mecanismo de formação e crescimento de pelotas cruas

Na etapa de aglomeração do minério de ferro denominada de pelotamento, o minério de ferro devidamente preparado, com os aditivos necessários, é 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*. As pelotas são produzidas com granulometria apropriada e resistência mecânica suficiente para suportar as

etapas de transporte da área de pelotamento até o forno de endurecimento das pelotas (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004).

Observa-se na Figura 3.3 um típico Disco de Pelotamento utilizado no processo de Pelotização.

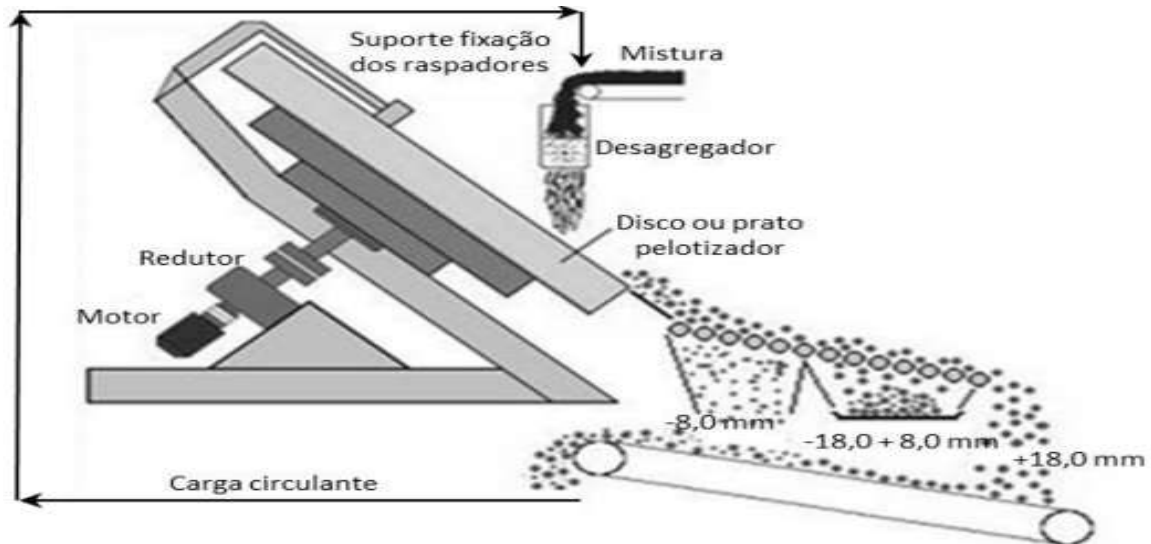


Figura 3.3: Disco de Pelotamento.

Fonte: (FONSECA, 2003).

Entre os 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. (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004).

A produção das pelotas cruas é realizada em discos de pelotamento. Estes equipamentos possuem um dispositivo para controle da rotação (5rpm a 7,6rpm), inclinação (45° a 48°) e alimentação (140t/h a 200t/h). O diâmetro dos discos é de 7,5m. 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. A capacidade de produção dos discos é de aproximadamente 150t/h. O ponto de alimentação no disco também exerce grande influência na formação das pelotas e pode ser modificado (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004).

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 (Figura 3.4). 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 a classificação das pelotas, retirando a fração abaixo de 8,0mm e acima de 18,0mm. O material rejeitado retorna ao silo de pelotamento (FONSECA, 2004).

Para a formação das pelotas homogêneas, é necessário que o material a ser alimentado no disco apresente as características físicas, químicas e mineralógicas necessárias ao processo, e que o equipamento pelotizador trabalhe em perfeitas condições operacionais, permitindo desta forma a estabilidade requerida ao processo (FONSECA, 2004; VIEIRA, 2014).

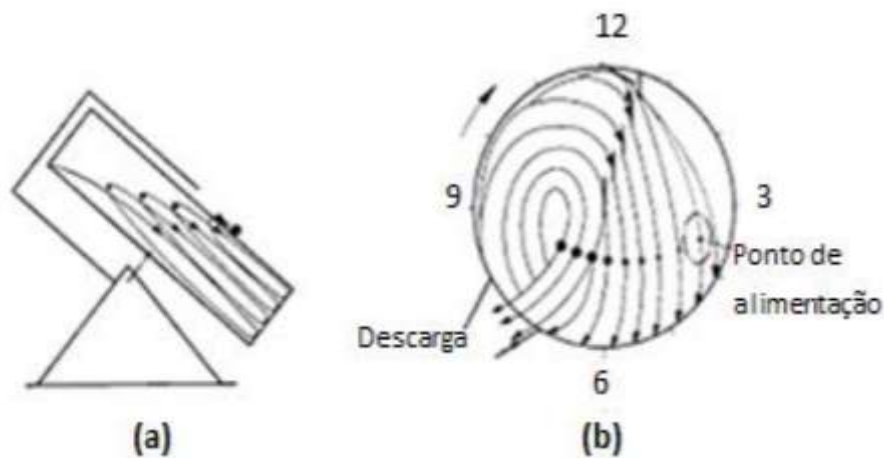


Figura 3.4: Formação das Pelotas Cruas em um Disco Pelotizador.

Fonte: (FONSECA, 2004).

A granulometria desejada das pelotas na descarga do disco é de no mínimo 88% entre 8mm e 18mm para pelotas destinadas ao processo de redução direta. 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 (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004):

- - 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.).

As principais variáveis de processo e suas influências nas características das pelotas cruas são mostradas na Tabela 3.7 (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

Tabela 3.7: Influência das principais variáveis de processo nas características das pelotas cruas.

			Tempo de residência do material	Acabamento superficial	Tamanho de pelotas	Homogeneidade do material na descarga do disco
Pellet Feed	S. Específica	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MENOR	MAIOR
	Umidade	MAIOR	MENOR	PIOR	MAIOR	MENOR
	% < 325#	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MENOR	MAIOR
Discos	Rotação	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MAIOR	MENOR
	Profundidade útil	MAIOR	MAIOR	MELHOR	MAIOR	MAIOR
	Tonelagem de alimentação	MAIOR	MENOR	PIOR	MENOR	MENOR
	Inclinação	MAIOR	MENOR	PIOR	MENOR	MENOR
	Granulometria dos insumos	MAIOR	MAIOR	MELHOR	-	MAIOR

Fonte: (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018)

Para que as pelotas formadas nos discos de pelotização possam resistir às operações de manuseio e transporte até o cliente, ou seja, estocagem no pátio, carregamento, transporte e descarga do navio, e para que suportem as pressões e os choques térmicos dentro dos reatores de redução para os quais se destinam as pelotas de minério de ferro, durante sua transformação em ferro-gusa (alto-forno) ou ferro-esponja (redução direta), torna-se necessário submetê-las a um tratamento térmico cuidadoso e bem balanceado, proporcionando às mesmas, a resistência física e mecânica apropriada. A este tratamento dá-se o nome de processo de endurecimento ou processo de queima das pelotas, o qual é realizado no forno de queima, também chamado forno de endurecimento. A Figura 3.5 apresenta o desenho esquemático típico de um forno de endurecimento do tipo grelha móvel (*traveling grate*) (FONSECA, 2004; LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018)

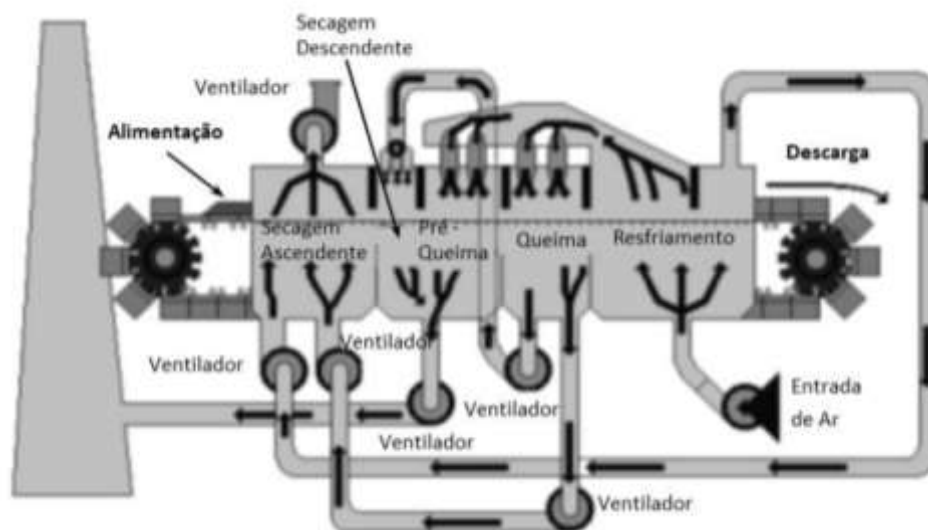


Figura 3.5: Forno de queima ou endurecimento da pelota.

Fonte: (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

A Figura 3.6 mostra a relação entre Causa x Efeito de algumas variáveis do pelotamento.

RELAÇÃO CAUSA X EFEITO DE ALGUMAS VARIÁVEIS

Variáveis de processo e operação do pelotamento	AÇÃO	EFEITO								
		Tamanho pelotas	Elevação carga	Tempo residência	Finos descarga	Compactação pelotas	Resistência mecânica	Porosidade	Umidade necessária	Distrib. Granul.
Ângulo de inclinação do disco	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	Maior	Larga
Velocidade de rotação do disco	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	Menor	Estreita
Altura útil do disco	↑	↑	↔	↑	↓	↑	↑	↓	Menor	Estreita
Taxa de alimentação do disco	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↑	Maior	Larga
Superfície específica do pellet feed	↑	↓	↔	↔	↑	↑	↑	↓	Maior	Larga
Umidade do pellet feed	↑	↑	↔	↔	↓	↑	↑	↓	Menor	Estreita

Figura 3.6: Relação causa x efeito de algumas variáveis.

Fonte: (SOLÉ e WENDLING, 2020).

3.3.3.1 Etapa de pré-queima das pelotas.

Pré-queima é a etapa intermediária às fases de secagem e queima, onde as pelotas são expostas a um fluxo descendente de gases a temperaturas da ordem de 500°C a 900°C. Nestas

condições as pelotas sofrem um aquecimento adequado antes de serem submetidas às rigorosas temperaturas de endurecimento na zona de queima. As pelotas, principalmente da camada superior do leito, devem entrar nesta zona completamente secas, evitando degradações pelos mecanismos explicados no item anterior (FONSECA, 2004).

O ideal é que a transformação da goethita contida nas pelotas cruas em hematita se complete nesta etapa, pois a diferença de temperatura entre a pré-queima e a queima pode levar a uma elevada pressão de vapor no interior das partículas de goethita, o que leva à degradação das pelotas com geração de trincas, e conseqüentemente geração de finos e perturbação da operação, com perda de rendimento devido à baixa permeabilidade (FONSECA, 2004).

3.3.4 Tratamento térmico das pelotas (queima)

A matéria-prima principal para o processo de queima no forno de endurecimento é a pelota crua, produzida pelos discos na etapa anterior de pelotização. Estas pelotas devem possuir características físicas e químicas adequadas ao bom desempenho do processo de endurecimento. Dentre estas características, procurou-se na Tabela 3.8 ilustrar sua influência no processo de queima (BOWLING e CARTER, 1980 *apud* FONSECA, 2003).

Queima é a fase em que as pelotas passam por um fluxo gasoso também descendente, com os mais elevados níveis de temperatura (da ordem de 1300°C a 1350°C). O calor produzido pela combustão de óleo, juntamente com o calor contido no ar proveniente da zona de resfriamento, é transferido às pelotas via fluxo gasoso, até o ponto em que se inicia a combustão do carvão finamente contido nas mesmas gerando-se mais calor, agora do interior para fora das pelotas (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004).

Parte do calor envolvido no processo de queima é utilizado nas reações químicas entre os constituintes contidos no minério, no calcário e na bentonita. Estas reações propiciam o endurecimento das pelotas através de reações de sinterização entre as partículas de minério de ferro e das reações de escorificação envolvendo componentes de ganga ácida e básica, as quais conferem às pelotas alta resistência mecânica e características metalúrgicas apropriadas utilizadas no reator de redução do cliente. As ligações que se estabelecem entre as partículas são diretamente influenciadas pela temperatura, permanência da carga na temperatura máxima e natureza da atmosfera do forno (MEYER, 1980 *apud* FONSECA, 2004).

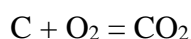
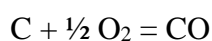
Tabela 3.8: Características das pelotas cruas e sua influência no processo de queima e na qualidade das pelotas queimadas.

Nas pelotas cruas, quando	No processo de queima
Melhora o acabamento superficial,	Aumenta a permeabilidade do leito de pelotas; Melhora a qualidade física das pelotas queimadas.
Aumenta a homogeneidade granulométrica (%Pelotas abaixo de 18 e acima de 8mm),	Aumenta a taxa de alimentação do forno; Diminui o retorno das mesas de rolos; Aumenta a permeabilidade do leito de pelotas.
Aumenta a umidade da pelota crua,	Aumenta a energia térmica requerida para secagem; Piora a qualidade física das pelotas queimadas.
A dosagem de carvão aumenta (dentro de certos limites),	Melhora a qualidade física das pelotas queimadas; Reduz-se o consumo de óleo combustível.
A dosagem de carvão diminui abaixo de um limite aceitável,	Piora a qualidade física das pelotas queimadas
A dosagem de carvão aumenta acima de um limite aceitável,	Piora a qualidade física das pelotas queimadas; Aumenta a formação de cachos.
A basicidade binária (%CaO/%SiO ₂) aumenta acima de um limite aceitável,	Aumenta a formação de cachos.
A basicidade binária (%CaO/%SiO ₂) diminui,	Aumenta o inchamento sob redução; Diminui a degradação a baixa temperatura (LTD - 0,5mm).
Diminui a resiliência (resistência a queda),	Aumenta a alimentação do forno com pelotas “fracas” e/ou com trincas.
Aumenta a resiliência (resistência à queda), acima de um limite aceitável, em função da umidade elevada,	Aumenta a alimentação do forno com pelotas “plásticas”; Diminui a permeabilidade do forno.
Aumenta resistência à compressão da pelota crua e úmida ou seca,	Aumenta a estabilidade (permeabilidade) do leito de pelotas.
Aumenta a dosagem de bentonita,	Aumenta o teor de sílica na pelota.

Fonte: (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

Nesta zona algumas reações se iniciam desencadeando outras que se desenvolvem simultaneamente sob grandes gradientes de temperatura e segundo condições estritamente locais, ou mesmo pontuais. As principais reações estão descritas a seguir(FONSECA, 2004):

- Combustão do Carvão (500°C – 800°C):



- Decomposição de Carbonatos (550°C – 800°C):

$$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$$

$$\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2$$
- Reações de Escorificação (900°C – 1400°C), com formação de Ferritos, Silicatos e Fayalitas:

$$\text{CaO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$2\text{MgO} + \text{SiO}_2 = 2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$$

$$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$$

$$3\text{SiO}_2 + 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{CO} = 3(2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2) + \text{CO}_2$$

Recristalização e Crescimento dos Grãos de Hematita: inicia-se por volta de 1100 °C e o vigor desta união depende fundamentalmente da temperatura alcançada, do tempo de permanência nela e da área superficial do minério. A Figura 3.7 mostra a micrografia de uma pelota crua, antes do processo de queima e uma pelota queimada (FONSECA, 2004).

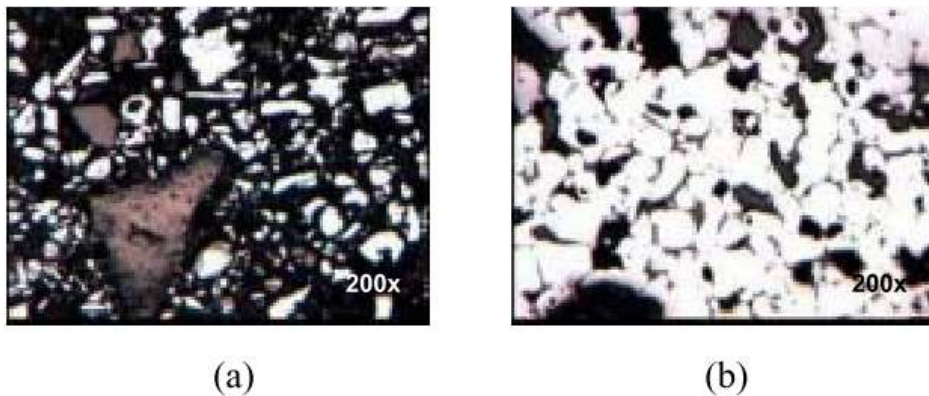


Figura 3.7: (a) Micrografia de uma pelota crua e seca para alto-forno. (b) Micrografia de uma pelota para alto-forno sinterizada a 1360°C.

Fonte: (FONSECA, 2004).

3.3.5 Qualidade de Pelotas

Para que as pelotas de minério de ferro atendam às necessidades das indústrias siderúrgicas, em que todas são relacionadas à alta eficiência, as mineradoras devem seguir uma série de especificações de qualidade das matérias primas utilizadas. Para isso, as mineradoras devem considerar a natureza do minério, a sua interação com os aditivos, tipo e qualidade dos

fundentes, teor de carbono e metodologia do processo de pelotização. Todos esses parâmetros resultam na formação das várias fases mineralógicas presentes na microestrutura das pelotas formadas. A Figura 3.8 apresenta os mecanismos de formação dessas fases que ocorrem durante a fabricação das pelotas.

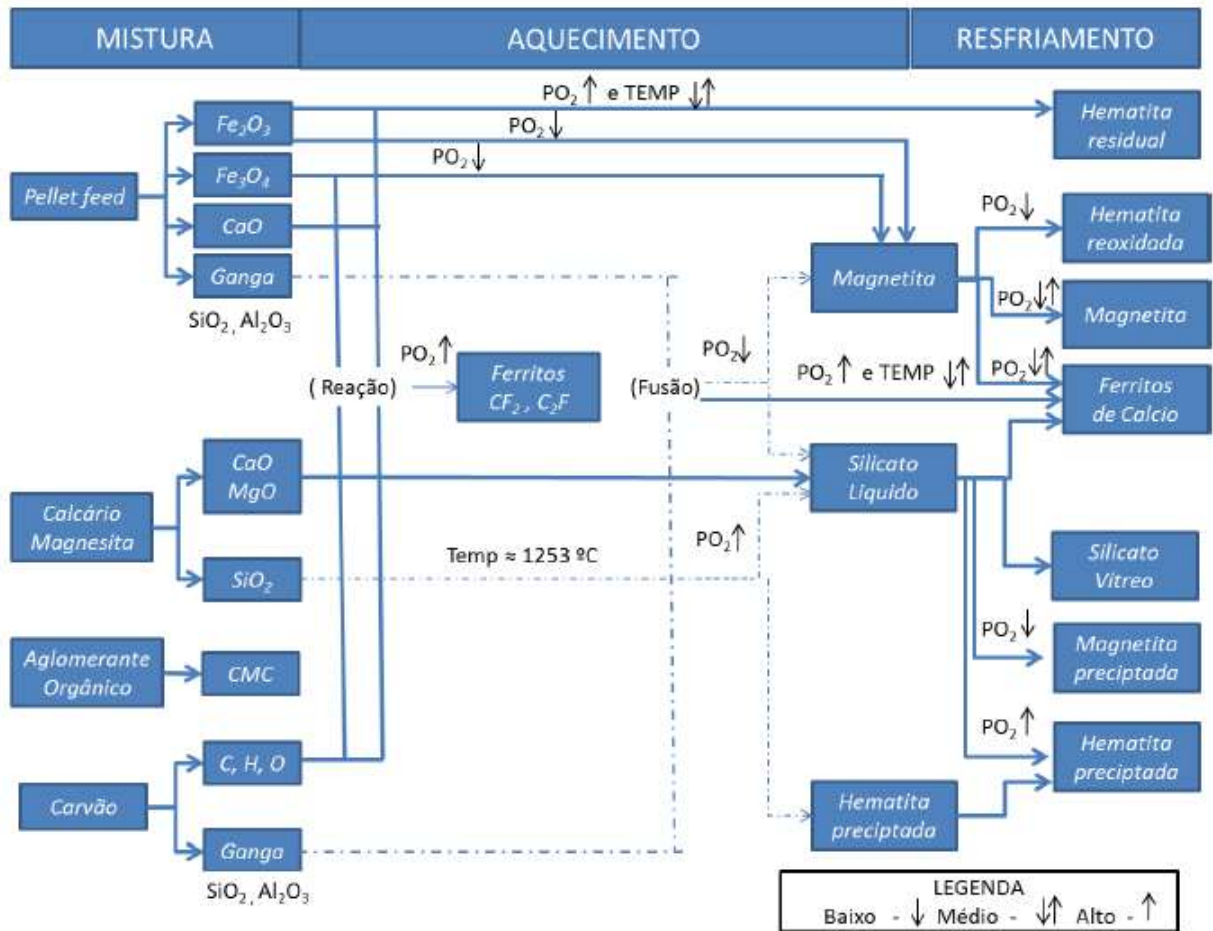


Figura 3.8: Mecanismos de formação das fases presentes na microestrutura da pelota de minério de ferro.

Fonte: (HSIEH e WHITEMAN, 1989).

De acordo com a Figura 3.8, as fases formadas na estrutura das pelotas queimadas dependem de parâmetros como as condições da mistura, temperatura, potencial de oxigênio, aquecimento e resfriamento durante o tratamento térmico. Todos esses parâmetros exercem grande influência na qualidade final das pelotas e por isso devem ser controlados de acordo com especificações necessárias para utilização das pelotas na siderurgia (HSIEH e WHITEMAN, 1989).

O PO_2 = Par a 1350°C (temperatura aproximada da queima da pelota) = 7,4kcal/mol de O_2 , mostrando o caráter oxidante da atmosfera envolvida na pelotização (HSIEH e WHITEMAN, 1989).

Como já descrito, as pelotas são avaliadas de acordo com seus padrões de qualidade química, física e metalúrgica que são investigados e estudados a partir de testes de composição química, resistência à compressão, granulometria, resistência ao impacto e à abrasão, susceptibilidade à desintegração, redutibilidade, inchamento, entre outros. Para quantificar todos esses padrões de qualidade de forma mais prática, um índice adimensional com base nesses parâmetros vitais para a qualidade das pelotas de minério de ferro foi formulado, o qual é denominado de Índice de Qualidade Múltipla (*Composite Quality Index* - CQI) e obtido por meio da Equação 3.1 a seguir (DWARAPUDI et al., 2011):

$$CQI = \frac{RI + \text{Grau de redução}}{RDI + FSI + \text{Variação do Amolecimento e Fusão}} \quad (3.1)$$

Onde, RI, RDI e FSI são, respectivamente os índices de redutibilidade, de desintegração sob redução e de inchamento livre. De acordo com essa equação, o índice CQI será maior quando os parâmetros (propriedades benéficas) presentes no numerador forem altos e os parâmetros (propriedades malélicas) presentes no denominador forem baixos. Quanto maior o CQI, maior a qualidade das pelotas produzidas. O cálculo do CQI é importante para a ponderação dos parâmetros vitais de qualidade das pelotas, o que é melhor do que analisar apenas um ou dois parâmetros (DWARAPUDI et al., 2011).

Os tipos de ligações térmicas são decisivos para as propriedades das pelotas hematíticas, como mudança de estrutura cristalina durante a queima e reação dos constituintes da escoria. Como os minérios ou concentrados sempre têm certa quantidade de ganga e também aditivos são, usualmente, utilizados na produção de pelotas, ambos os mecanismos de ligação ocorrem, simultaneamente, sobre condições normais de operação. O processo de sinterização das pelotas via suprimento de calor pelos gases de combustão, ocorre em dois estágios: pré-queima e queima (MEYER, 1980).

Na pré-queima, de acordo com o tipo de mineiro envolvido, a temperatura é elevada de 300°C-350°C para 1250°C -1320°C/1350°C, através de um contínuo e controlado suprimento de calor. No estágio seguinte, de queima, a carga de pelotas é mantida em uma temperatura

ideal para cada tipo de minério, por um período determinado, este tempo influi também na qualidade da pelota. É importante destacar que a velocidade de pré-queima depende, sobretudo, dos componentes contidos na pelota, sendo que os tipos de ligações decisivas para a obtenção das propriedades finais das pelotas surgem na zona de queima. O efeito do gradiente térmico pode causar heterogeneidade nas características das pelotas (DWARAPUDI et al., 2011).

Em pelotas com adição de fundentes, a fase líquida aparece durante o aquecimento e o aumento da densidade pode ocorrer mais rapidamente. O reagrupamento das partículas pode levar a uma grande redução da área superficial e retração. A fase líquida pode também auxiliar o desenvolvimento de reações químicas e precipitação de soluções, as quais, posteriormente aumentam as resistências. Devido à difusão atômica que ocorrem em alta temperatura, próximo ao ponto de fusão os átomos difundem de uma partícula para outra formando pontes entre elas, cuja energia da superfície é maior que a da partícula, o que induz a difusão preferencial da superfície da partícula para a ponte, cujo tamanho aumenta. A presença de uma fase líquida entre as partículas permite aumentar a difusão e acelerar a sinterização (ZIMMERMANN, 2007).

A Figura 3.9 apresenta o desenho esquemático do fenômeno de sinterização. Além da ligação dos grãos, por meio de pontes, ocorre agregação das partículas (crescimento de algumas e consumo de outras), recristalização e crescimento de grãos (ZIMMERMANN, 2007).



Figura 3.9: Desenho esquemático do fenômeno de sinterização.

Fonte: (ZIMMERMANN, 2007)

3.3.5.1 Resfriamento das pelotas

O resfriamento se dá através de um fluxo ascendente intenso de ar atmosférico à temperatura ambiente que passa através do leito de pelotas já queimadas, ainda incandescentes devido às elevadas temperaturas resultantes da etapa anterior, deixando as pelotas a uma

temperatura adequada para o transporte via correias transportadoras e empilhamento no pátio de estocagem(FONSECA, 2004; LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

Naturalmente, a maior eficiência de resfriamento é obtida nas pelotas localizadas na camada inferior, já que o fluxo é ascendente. O ar, ao passar através do leito de pelotas, retira o calor contido nas pelotas e por isso adquire temperaturas que permitem o seu reaproveitamento da seguinte forma (FONSECA, 2004):

- ar resultante do resfriamento primário: é direcionado para a zona de queima através do duto de recuperação. Atinge temperaturas superiores a 900°C.
- ar resultante do resfriamento secundário: é direcionado para a zona de secagem ascendente I. Atinge temperaturas superiores a 300°C.

Toda a produção é empilhada no pátio de estocagem e, depois, recuperada para o carregamento dos navios ou encaminha para trens ferroviários (FONSECA, 2004).

A Figura 3.10 mostra o passo a passo do processo de queima das pelotas cruas dentro do forno.

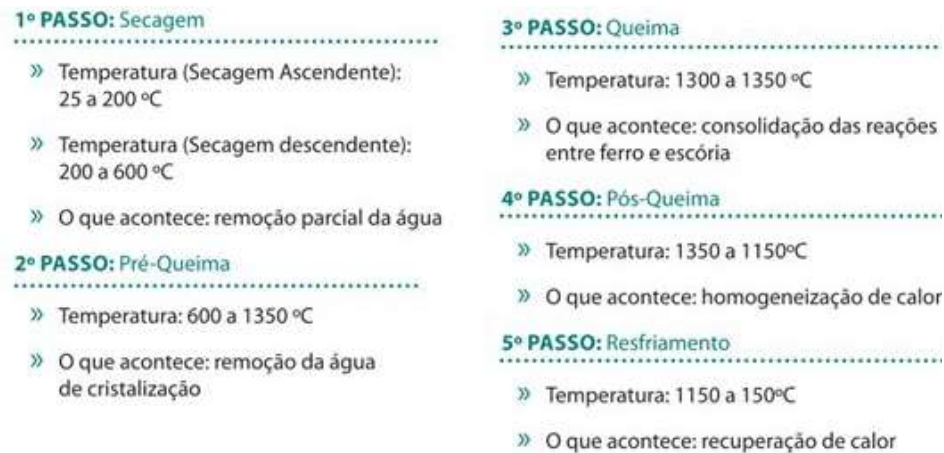


Figura 3.10: Passo a passo do processo de queima das pelotas cruas dentro do forno.

Fonte: (SAAB et al., 2012).

3.3.6 Propriedades físicas, químicas e metalúrgicas da pelota

Várias propriedades são necessárias para a pelota possuir um bom comportamento durante o transporte (propriedades físicas) e principalmente durante o processo de redução no alto forno ou nos reatores de redução direta (propriedades metalúrgicas). A qualidade da pelota

é avaliada por métodos de ensaio adequados, que foram desenvolvidos a partir da experiência adquirida principalmente nas plantas industriais. Várias tentativas estão sucessivamente sendo feitas afim de se estabelecer normas internacionais, chamadas de normas ISO, que são elaboradas e propostas pela organização internacional de padronização (MEYER, 1980).

Estes métodos de ensaio eram usados em outros produtos, como por exemplo em concreto para testar a sua resistência. Marshal (1961, p. 308-313 *apud* MEYER, 1980, p. 89) foi o pioneiro a descrever a importância das propriedades físicas das pelotas em alto-forno quando observou correlações evidentes entre a geração de finos e o comportamento do tamboramento das pelotas carregadas.

A basicidade das pelotas num certo intervalo (0,33 a 0,78) conferiu boas propriedades físicas e metalúrgicas das pelotas, devido as fases de ligação presentes. Os resultados mostraram que as pelotas com basicidade 0,33 possuíam propriedades superiores comparada com as pelotas de basicidade 0,78 (UMADEVI et al., 2011).

Foi comprovado que em teores de 1.0% a 1.5% de MgO, as pelotas queimadas exibiram ótimas propriedades metalúrgicas (UMADEVI et al., 2011).

3.3.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é definida como "a capacidade de um material ou estrutura para suportar forças compressivas axialmente dirigidas". Quando o limite de resistência à compressão é atingindo, os materiais são quebrados. A resistência à compressão é considerada como um dos principais critérios de adequação de pelotas de minério de ferro queimadas para processamento metalúrgico. A força das pelotas depende da dimensão de sua oxidação. Um alto grau de oxidação dá as pelotas homogeneidade estrutural, previne a formação de faixas concêntricas e trincas radiais e promove a mais extensa e completa sinterização de partículas de minério, que é uma das condições mais importantes de aumento de força.

A avaliação da resistência à compressão antecede a entrada do minério no forno, pois o minério granulado, pelota e sínter têm que possuírem resistência suficiente para resistir aos esforços de transporte e manuseio até o forno, bem como dentro do forno resistindo todo o peso da coluna de carga. A resistência à compressão de pelotas, sínter e granulado é avaliada pelo ensaio de compressão ISO 4700 que é uma norma internacional (CEFETES, 2011).

3.3.6.2 Porosidade

A porosidade é um fator que pode exercer grande influência na qualidade física e metalúrgica das pelotas. A existência de poros na estrutura de pelotas de minério de ferro é uma característica intrínseca deste tipo de material. É muito difícil de se controlar a porosidade das pelotas na aglomeração do minério de ferro pois o processo de pelletização é dinâmico e complexo e envolve grandes quantidades de materiais (FONSECA, 2004)

Tal propriedade é de suma importância na redução da pelota dentro do AF, em função da interação gás-redutor e os poros da pelota.

3.3.6.3 Microestrutura

A morfologia da superfície das pelotas queimadas possui mais poros e trincas quanto maior for a proporção de enxofre adicionado a matéria prima da produção da pelota, isso ocorre devido a remoção de enxofre na forma de SO_2 do interior das pelotas, Figura 3.11 (CHUN; ZHU; PAN, 2011).

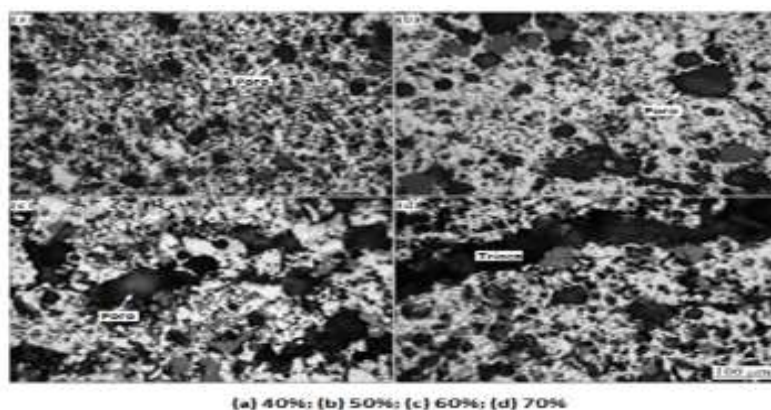


Figura 3.11: Microestruturas do interior das pelotas queimadas com diferentes razões de cinza de pirita no MO.

Fonte: (CHUN; ZHU; PAN, 2011).

Estudaram-se a influência da basicidade da pelota nas propriedades e microestruturas das pelotas de minério de ferro e observaram que a com a adição de calcário, a fase predominante foi a hematita com outras fases tais como silicato, magnetita e ferrita de cálcio variando dependendo da basicidade da pelota de acordo com a Figura 3.12 (UMADEVI et al., 2011).

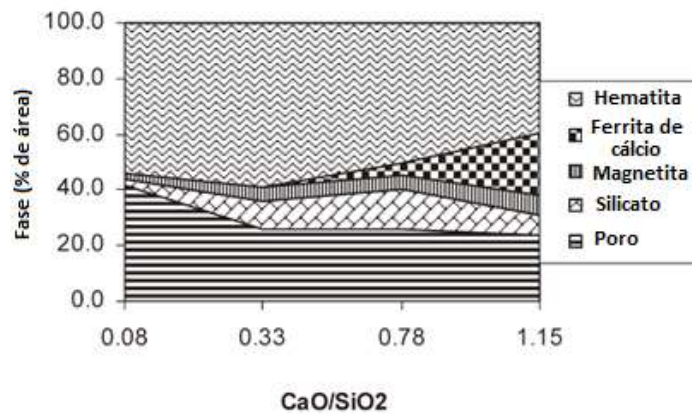


Figura 3.12: Análise microestrutural de fases.

Fonte: (UMADEVI et al., 2011).

3.3.6.4 Susceptibilidade ao inchamento

As pelotas possuem uma propriedade importante ao ser avaliada durante sua redução, que é a sua susceptibilidade ao inchamento. As pelotas aumentam de volume (ou seja, incham) durante o processo de redução, há alguns tipos que incham catastróficamente. São usados dois tipos de ensaios para avaliar a susceptibilidade da pelota ao inchamento: um reduzindo a amostra sem aplicação de carga sobre ela; e outro submetendo a amostra a pressão mecânica enquanto é reduzida. Os ensaios de inchamento livre são mais usados na siderurgia asiática, podendo ser realizados segundo as normas ISO 4698 ou JIS M8715. Mede-se o volume das pelotas antes e depois da redução e calcula-se sua variação percentual. Pelotas devem apresentar inchamento menor que 16%. O ensaio de inchamento sob carga mecânica é mais usado na Europa, mas particularmente na Alemanha, segundo a norma ISO 7992. Determina-se a perda de carga máxima ocorrida no ensaio (ou seja, inchamento medido por meio de seu efeito na permeabilidade do leito). (CEFETES, 2011)

3.3.6.5 Redutibilidade

A carga metálica sofre reações de redução que vão se acelerando a medida que o minério desce no forno e aumenta sua temperatura. Idealmente o minério deve atingir a chamada “zona de reserva térmica” (ZRT) já totalmente reduzido a FeO (*wustita*), que é o limite termodinâmico nas condições reinantes na região, e isto depende da redutibilidade do minério. A ZRT é a região isotérmica do alto-forno em que a temperatura da carga é igual à do gás, e depende da reatividade do combustível: se for alto-forno a coque a ZRT se situa com temperaturas entre

900°C a 1000°C; se for alto-forno a carvão vegetal se situa por volta de 800 °C. As reações de redução que o minério sofre até chegar na ZRT são conhecidas como reações indiretas pois elas ocorrem sem o consumo de coque, isto acontece por causa do CO oriundo das reações que ocorrem na parte mais baixa do alto-forno onde as temperaturas são mais elevadas. As reações ditas reações indiretas, ou seja, as reações de redução de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ são termodinamicamente bem mais favoráveis do que a última etapa de redução de $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$. Isto ocorre porque a quantidade de oxigênio a ser removido por átomo de ferro na reação de $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ é muito maior do que nas reações de $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ e de $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ (Figura 3.13) e também porque as ligações de Fe-O são mais fortes e difíceis de serem quebradas. Tem que se dar bastante atenção nesta última etapa de redução, pois o tempo disponível para essa reação de $\text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, antes de começar o amolecimento do minério, é relativamente pequeno. Por causa desses problemas, surge a necessidade de controlar mais uma importante qualidade do minério, a sua redutibilidade, que é a facilidade que possui o minério de perder seu oxigênio para os gases redutores. Se o minério possui alta redutibilidade, significa que ele possui a capacidade de ser reduzido a ferro mais rapidamente que o de baixa redutibilidade. Isto quer dizer que, quanto mais redutível o minério, maior a probabilidade de chegar a ZRT como FeO e ao início do amolecimento com o máximo possível de Fe (ou o mínimo de oxigênio). A avaliação do índice de redutibilidade dos minérios tem sido feita utilizando-se dois tipos de ensaios que são eles: o ISO 7215, mais utilizado pela siderurgia brasileira e asiática, e o ISO 4695, mais empregado na Europa (CEFETES, 2011).

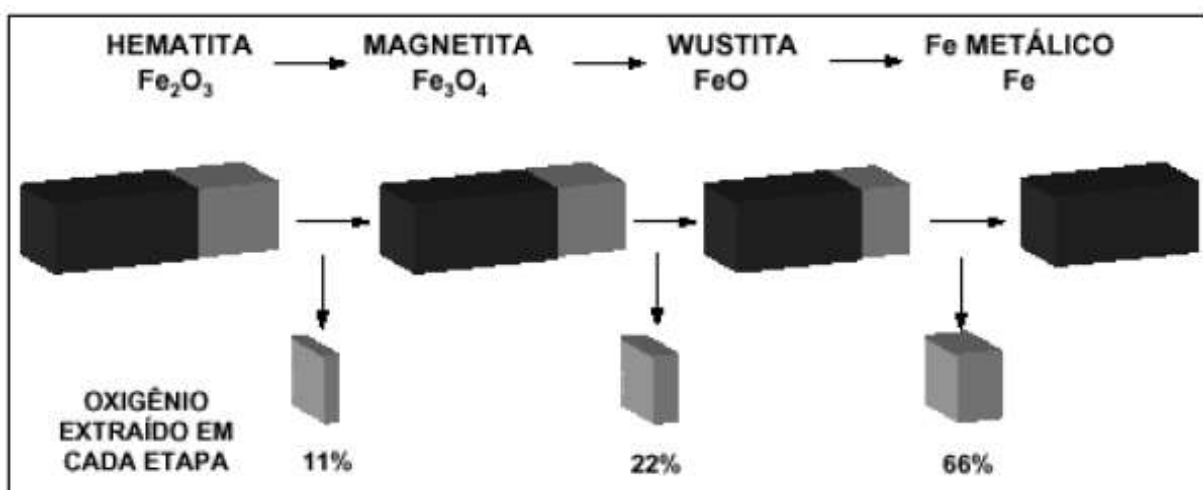


Figura 3.13: Quantidade de oxigênio removido nas diversas etapas de redução do óxido de ferro.

Fonte: (CEFETES, 2011).

3.3.6.6 Suceptibilidade à desintegração

Como o AF funciona em regime de contra-corrente, a carga metálica vai descendo do topo (onde foi alimentado) em direção ao cadinho e no percurso vai sendo aquecida pelos gases redutores, que são produzidos na parte inferior do forno e sobem em direção ao topo, com esse aquecimento a carga vai elevando sua temperatura até que começam as reações de redução do minério (Fe_2O_3 (hematita) \rightarrow Fe_3O_4 (magnetita) \rightarrow FeO (wustita) \rightarrow Fe (ferro metálico)). A primeira reação de redução (Fe_2O_3 (hematita) \rightarrow Fe_3O_4 (magnetita)) começa em torno de 400°C. A hematita possui estrutura cristalina diferente da magnetita, por isso durante a transformação ocorre um aumento de volume do minério e um enfraquecimento de sua estrutura que pode se desintegrar em maior ou menor grau gerando uma alta quantidade de finos que prejudica na permeabilidade da carga do AF. Esse fenômeno é conhecido como desintegração sob redução. Para diminuir o grau de susceptibilidade a essa desintegração do sínter e da pelota têm-se que atuar na matéria prima e também nos parâmetros do processo. Como o granulado é natural, isto é, não passa por processo de aglomeração, o que pode ser feito é carregar o AF com granulados de menor susceptibilidade a desintegração gerando assim menos finos e não prejudicando a permeabilidade do forno. Devido a esses problemas surge a exigência de mais uma especificação de qualidade a que os minérios devem atender, usualmente conhecida como especificação de RDI (*Reduction Disintegration Index*) ou LTD (*Low-Temperature Disintegration*) do minério. A avaliação do RDI tem sido feita principalmente utilizando-se dois tipos de ensaios, ambos estáticos, as normas ISO 4696-1 e ISO 4696-2 que são normas internacionais. O ensaio da norma ISO 4696-2 é o mais utilizado pelas usinas siderúrgicas do Brasil e Ásia (CEFETES, 2011).

3.3.6.7 Índice de Tamboramento e Resistência a abrasão das pelotas queimadas

Segundo Meyer, os ensaios de abrasão e tamboramento foram padronizados internacionalmente pela norma ISO 3271, e de acordo com a norma, o ensaio consiste em alimentar uma amostra de 15kg de pelotas queimadas de minério de ferro em um tambor, de dimensões iguais a 1m de diâmetro por 0,5m de profundidade. Um total de 200 revoluções, onde o tambor é girado a uma velocidade de 25 rpm por oito minutos.

Após passar pelo tambor, as pelotas são peneiradas e as frações (+6,3mm) e (-0,5mm) vão para análise. A porcentagem de cada fração em relação ao total de pelotas alimentadas no

tambor são respectivamente os resultados do tamboramento (+6,3mm) e abrasão (-0,5mm) sendo que, todos os valores devem ser checados por repetição do teste. O objetivo de tal teste é simular a degradação da pelota queimada causada pelo seu transporte e manuseio até o cliente final (MEYER, 1980).

3.4 Aglomerantes usados na pelotização de minério de ferro

O papel do aglomerante é primordialmente melhorar a plasticidade da pelota crua, facilitando o seu manuseio e transporte até a etapa de queima, assim como proporcionar uma resistência mecânica mais elevada que permita as pelotas serem acomodadas em camada na esteira do fomo (MARTINS, 2007).

Os principais tipos de aglomerantes utilizados neste processo são (LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018; VIEIRA, 2014):

- Inorgânicos: Bentonita e Cal Hidratada;
- Orgânicos: carboximetilcelulose (CMC), HEC e Poliacrilamida.

O aglomerante é usado na pelotização com a finalidade de proporcionar um bom processo de pelotização ("*balling*"), uma pelota crua com qualidade e uma boa pelota seca (antes de passar pelo processo de aquecimento e queima). 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).

De um modo simplificado, os aglomerantes são geralmente classificados nos seguintes tipos (MARTINS, 2007):

- Matriz;
- Filme;
- Químico.

Observa-se na Figura 3.14 o processo de adição do aglomerante à mistura homogeneizada.

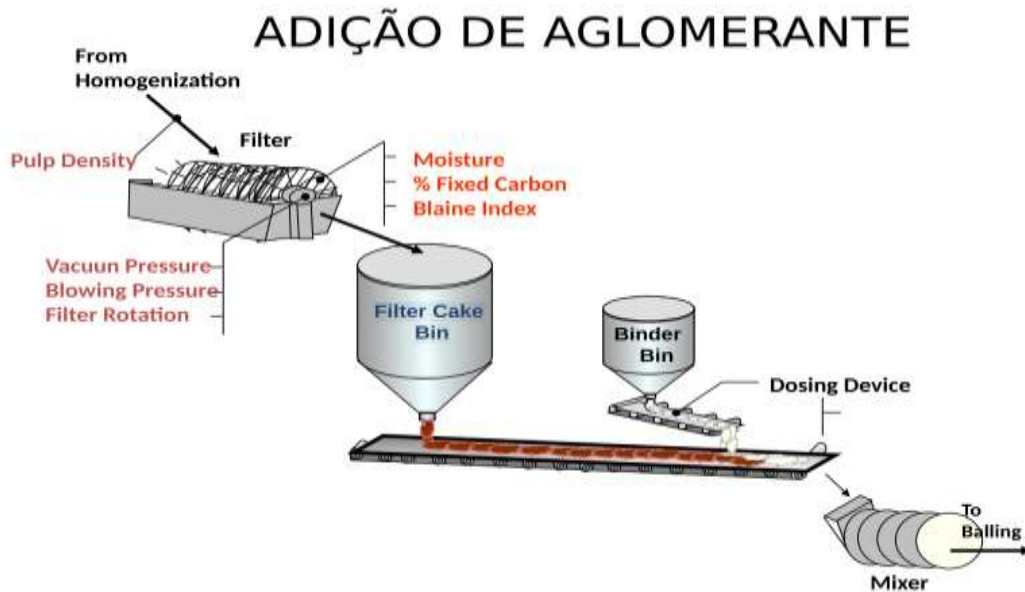


Figura 3.14: Processo de adição do aglomerante à mistura homogeneizada.

Fonte: (MARTINS, 2007; VIEIRA, 2014).

O processo de pelotização é o principal consumidor de aglomerantes na indústria de minério de ferro. A seleção de um aglomerante adequado e sua dosagem na mistura são de importância crítica na produção de pelotas de boa qualidade a um preço razoável. Estes desempenham duas funções muito importantes na pelotização de minério de ferro (ZHU et al., 2015):

- O aglomerante torna o minério úmido plástico, de modo a nuclear as sementes que crescem a uma taxa controlada em pellets bem formados;
- Durante a secagem, o aglomerante mantém os grãos juntos enquanto a água é removida, e continua a uni-los até que a pelota seja aquecida o suficiente para sinterizar os grãos.

A adequação de um aglomerante é determinada por quão bem ele pode executar cada uma dessas funções e, ao mesmo tempo, não causar problemas de contaminação ou sinterização (ZHU et al., 2015).

Bem como a bentonita, os aglomerantes orgânicos, quanto a cal hidratada, hoje menos utilizada devido aos riscos inerentes da hidratação, são empregados como aglomerantes durante

a etapa de formação das pelotas cruas nos tambores ou discos de pelletização. Assim, pretende-se promover a aglomeração a frio das partículas de minério de ferro, favorecendo o pelletamento, como também a otimização da resistência a seco e a úmido das pelotas cruas. Tal resistência é de suma importância, uma vez que, garantem que as pelotas ainda cruas resistam ao transporte e manuseio nas correias transportadoras até o forno e durante a etapa de secagem que ocorre durante sua queima. É aconselhável uma resistência superior à 1,5kg/pelota para as pelotas cruas e úmidas, e superior a 5kg/pelota para a pelota seca crua e seca (FONSECA, 2003; LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

A proporção de cal hidratada, bentonita ou aglomerante orgânico está necessariamente associada ao tipo de minério que está sendo utilizado no processo (magnetítico, hematítico, hidratado ou suas misturas) e sua umidade. Uma vez que, afetada a composição química das pelotas produzidas no processo, é de suma importância que se leve em consideração a composição química do aglomerante usado, no balanço químico global da mistura a pelletizar (FONSECA, 2003; LUZ; FRANÇA; BRAGA, 2018).

3.5 Bentonita

A Bentonita é o principal aglomerante utilizado, em todo o mundo. Visto que podem ser encontrados diferentes tipos e qualidades deste aglomerante, nos capítulos adiante iremos realizar um estudo com maior aprofundamento sobre o tema “Influência da qualidade e proporção de diferentes tipos de bentonita como aglomerante na produção de pelotas de minério de ferro”.

O termo bentonita, segundo a literatura, foi pela primeira vez aplicado a um tipo de argila plástica e coloidal de uma rocha descoberta em Fort Benton, Wyoming-EUA. Embora, originalmente, o termo bentonita se referisse à rocha argilosa descoberta, atualmente designada argila, constituída, principalmente, do argilomineral montmorillonita. Este argilomineral faz parte do grupo esmectita, uma família de argilas com propriedades semelhantes. O termo bentonita também é usado para designar um produto com alto teor de esmectita. A bentonita pode ser cálcica ou sódica, e possui uma característica física muito particular: expande várias vezes o seu volume, quando em contato com a água, formando géis tixotrópicos. Alguns cátions provocam uma expansão tão intensa que as camadas dos cristais podem se separar até a sua célula unitária. O sódio provoca a expansão mais notável (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

Montmorilonita (também anteriormente denominada de esmectita) é o argilomineral mais abundante do grupo das esmectitas, cuja fórmula química geral é dada pela $M_x(\text{Al}_{4-x}\text{Mg}_x)\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$. Possui partículas de tamanhos que podem variar de 2 μm a tamanhos bastante pequenos como 0,1 μm em diâmetro, com tamanho médio de 0,5 μm e formato de placas ou lâminas. Pertence ao grupo dos filossilicatos, cujas placas são caracterizadas por estruturas constituídas por duas folhas tetraédricas de sílica com uma folha central octaédrica de alumina, que são unidas entre si por átomos de oxigênio que são comuns a ambas as folhas. As folhas apresentam continuidade nas direções dos eixos a e b e geralmente possuem orientação aproximadamente paralela nos planos (001) dos cristais, o que confere a estrutura laminada (SILVA; FERREIRA, 2008).

As placas da montmorilonita apresentam perfil irregular, são muito finas, tem tendência a se agregarem no processo de secagem, e apresentam boa capacidade de delaminação quando colocada em contato com a água. O diâmetro é de aproximadamente 100 nm, a espessura pode chegar até 1 nm e as dimensões laterais podem variar de 30 nm a vários microns, o que resulta em uma elevada razão de aspecto, podendo chegar a aproximadamente 1000. O empilhamento dessas placas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de Van der Waals, e entre essas placas existem lacunas denominadas de galerias ou camadas intermediárias ou interlamelares nas quais residem cátions trocáveis como Na^+ , Ca^{2+} , Li^+ , fixos eletrostaticamente e com a função de compensar cargas negativas geradas por substituições isomórficas que ocorrem no reticulado, como por exemplo, Al^{3+} por Mg^{2+} ou Fe^{2+} , ou Mg^{2+} por Li^+ . Cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita estão presentes nas galerias e 20% se encontram nas superfícies laterais (SILVA; FERREIRA, 2008).

A Figura 3.15 apresenta a estrutura da montmorilonita.

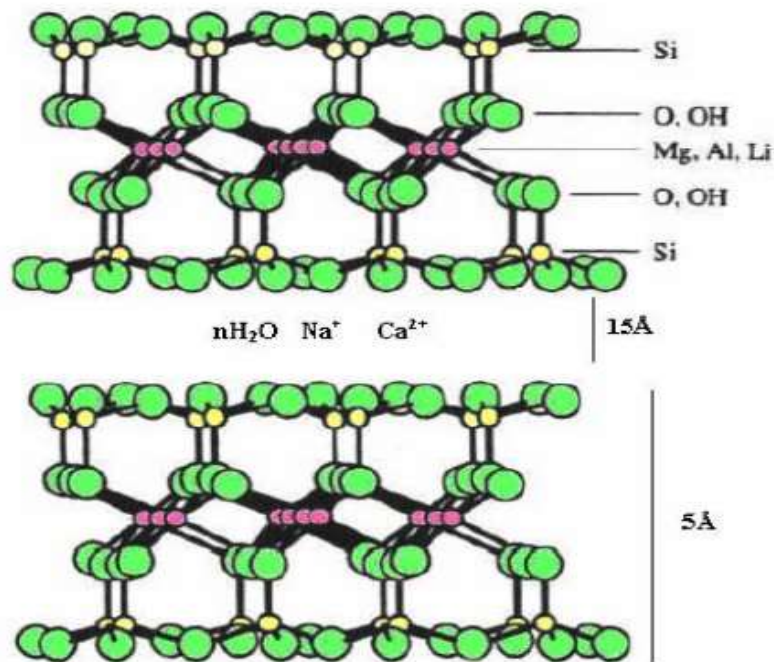


Figura 3.15: Estrutura montmorilonita.

Fonte: (SILVA; FERREIRA, 2008).

Quando as lamelas individuais de montmorilonita são expostas à água, as moléculas de água são adsorvidas na superfície das folhas de sílica, que são então separadas umas das outras. Este comportamento é chamado de inchamento interlamelar e é controlado pelo cátion associado à estrutura da argila. A espessura da camada de água interlamelar, varia com a natureza do cátion adsorvido e da quantidade de água disponível. Se o cátion é o sódio, o inchamento pode progredir desde 9,8 Å, quando a argila é exposta ao ar, a um máximo de 40,0 Å, quando a argila é totalmente dispersa em meio líquido (SILVA; FERREIRA, 2008).

No caso das argilas cálcicas ou policatiônicas, a quantidade de água adsorvida é limitada e as partículas continuam unidas umas às outras por interações elétricas e de massa. A diferença no inchamento das montmorilonitas sódicas e cálcicas deve-se a força de atração entre as camadas, que é acrescida pela presença do cálcio, reduzindo a quantidade de água que poderá ser adsorvida, enquanto que o cátion sódio provoca uma menor força atrativa, permitindo que uma maior quantidade de água penetre entre as camadas, e seja então adsorvida. Esta diferença está representada na Figura 3.16 (SILVA; FERREIRA, 2008).

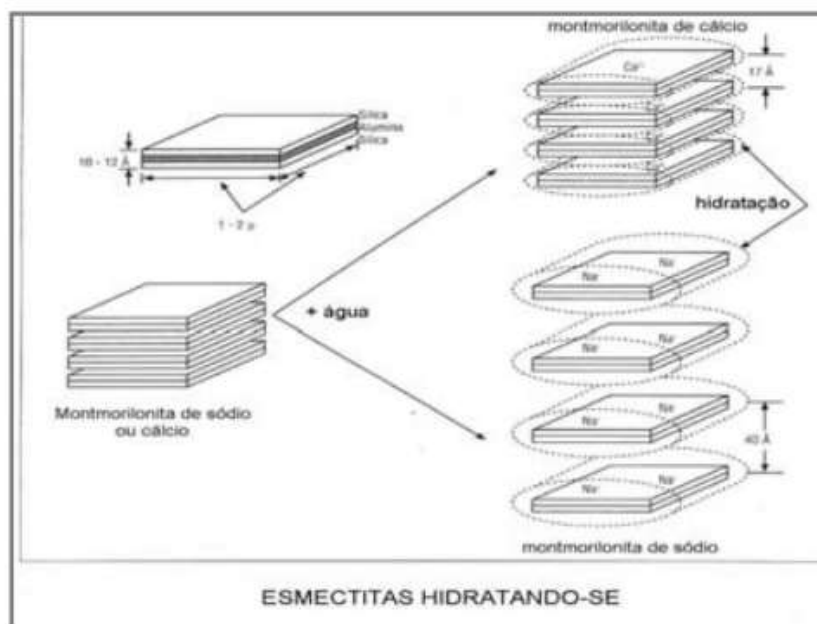


Figura 3.16: Representação da hidratação da montmorilonita cálcica e da montmorilonita sódica.

Fonte: (SILVA; FERREIRA, 2008).

As principais jazidas de bentonita em operação no Brasil estão localizadas no município de Boa Vista, Estado da Paraíba. Existem outros depósitos de bentonita, no município de Vitória da Conquista-BA, com possibilidade de aproveitamento econômico. Com efeito, foi inaugurado neste município, no distrito de Padroso, em 2007, o empreendimento mineral da Companhia Brasileira de Bentonita-CBB, de propriedade da Geosol, empresa especializada em sondagens e perfuração de poços artesianos. A jazida foi arrendada da CBPM. A CBB apresenta capacidade de produção de pelo menos 60 mil t/ano de bentonita ativada (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

As bentonitas de Boa Vista são cálcicas e o seu uso industrial exige que sejam ativadas com carbonato de sódio (barrilha), para serem transformadas em sódicas. Esse processo foi desenvolvido e patenteado na Alemanha, no ano de 1933, pela empresa Erbsloh & Co e é atualmente utilizado pelos países que não dispõem de bentonita sódica natural (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

De 2005 para 2006, a produção brasileira de bentonita beneficiada aumentou 6,4%, ou seja de 221 mil t para 236 mil t. O consumo aparente de bentonita beneficiada, em 2006, foi de 222 mil t. As importações resultaram em déficit comercial de US\$ 13,5 milhões. O Estado da Paraíba mantém-se como o principal produtor, contribuindo em 2006, com 86,5% de toda a

bentonita produzida no País (Resende et al., DNPM/2007). Segundo este, 13 empresas atuam nesse segmento, sendo a Bentonit União do Nordeste a maior delas (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

Os EUA lideram a produção mundial. Em 2006 produziram 4,62 Mt. O consumo aparente no mesmo ano foi de 3,39 Mt (LUZ; OLIVEIRA, 2008; USGS, 2007).

As reservas mundiais de bentonita são abundantes e por isso sua estimativa não vem sendo publicada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). As reservas lavráveis nacionais são de 31.388 x 10³ toneladas (t). Em termos de participação nas reservas, o estado do Paraná concentra 48,2% do total, o estado da Paraíba 24,5%, São Paulo 17,9% e a Bahia 9,4% (CARDOSO, 2011).

Tabela 3.9: Reserva e produção mundial de Bentonita.

Discriminação	Reservas (10 ³ t)		Produção (t)		
	2010	2009	2010	%	
Brasil	31.388	217.926	326.428	3,17%	
Estados Unidos		3.650.000	4.000.000	38,87%	
Grécia		845.000	860.000	8,36%	
Turquia		1.000.000	1.050.000	10,20%	
Itália	As reservas mundiais de Bentonita são abundantes	146.000	150.000	1,46%	
Alemanha		350.000	380.000	3,69%	
Outros Países		3.432.000	3.525.000	34,25%	
TOTAL		(nd)	9.640,926	10.291.428	100,00%

Fonte: (CARDOSO, 2011).

A produção de bentonita bruta no Brasil em 2010 aumentou sensivelmente, alcançando um patamar de 531.696t. Isso representa um aumento de produção de 101,2% em comparação com o ano anterior. Logo, percebe-se claramente a recuperação dos produtores de bentonita, além de indicativo do aumento de dinamismo dos compradores, que são essencialmente nacionais. Do total produzido, a Paraíba produziu 79,34%, a Bahia produziu 15,12%, São Paulo 4,69% (CARDOSO, 2011).

Na produção beneficiada, a bentonita moída seca correspondeu a 34.804t, o que representou um aumento de 20,76% em relação a 2009 e a bentonita ativada a 291.623t,

54,21%, no mesmo período. A distribuição geográfica da produção de bentonita moída seca deu-se da seguinte forma: São Paulo com 87,% do total e Paraná com 13,0%. Quanto à bentonita ativada, a Paraíba produziu 78% de toda a produção nacional e a Bahia, 22% (CARDOSO, 2011).

As importações de bentonita foram de US\$-FOB 32.562.000 e 208.127t em 2010. Isso representa um aumento de 75% no valor das importações e de 65% na quantidade exportada em relação a 2009. Este aumento nas importações evidencia o aumento no consumo aparente de bentonita e o crescimento das atividades nos setores consumidores. Os principais produtos importados derivados da bentonita são bens primários (205.333t e US\$-FOB 27.713.000), compondo 85,1% do valor importado e os bens manufaturados (matéria mineral natural ativada; 2.794 t US\$-FOB 4.849.000), representando 14,9% do valor. Os principais países de origem das importações de bens primários foram: Argentina (54%), Índia (27%), Grécia (14%); EUA (4%); para bens manufaturados: EUA (57%), Argentina (19%), China (14%), Indonésia (9%) (CARDOSO, 2011).

As exportações acompanharam a tendência de aumento das importações e da produção interna. As exportações de bentonita foram de 16.568 t e valor de US\$-FOB 9.363.000, o que representou uma variação de 18,37% na quantidade e 31,65% no valor exportado no ano base (CARDOSO, 2011).

A bentonita, por ser utilizada como um mineral industrial, tem sua dinâmica de demanda e oferta profundamente afetada pelo desempenho econômico dos setores produtivos que a utilizam como insumo e, conseqüentemente, depende do desempenho econômico dos países consumidores. A produção mundial de bentonita em 2010 aumentou em 8,87%. Esse aumento revela uma recuperação dos setores consumidores dessa substância em relação à crise iniciada em 2008, que causou diminuição no consumo e na produção no ano de 2009 (CARDOSO, 2011).

Em função de suas propriedades tais como elevada capacidade de troca de cátions resultantes de substituições isomórficas aliadas as suas características estruturais de facilidade de intercalação de um sem número de compostos orgânicos e inorgânicos possibilitando a obtenção de produtos sob medida (*taylor made*) para um elevado número de usos industriais, desta forma as argilas esmectíticas, bentoníticas ou montmoriloníticas possuem mais usos industriais que todos os outros tipos de argilas industriais reunidas, sendo um material

extremamente versátil e de perfil adequado para obtenção de produtos ou insumos de elevado valor agregado (SILVA; FERREIRA, 2008).

Na Tabela 3.10 segue a relação de 138 aplicações das argilas bentonitas. Deve-se observar que alguns usos poderiam ser reunidos e outros são sinônimos, mesmo assim resolvemos manter a relação como apresentada com todas as indicações encontradas na literatura (SILVA; FERREIRA, 2008).

Os principais usos da bentonita são: agente tixotrópico de fluidos de perfuração de poços de petróleo e de água; **pelotização de minérios de ferro**; aglomerante de areias de moldagem usadas em fundição; descoramento de óleos vegetais, minerais e animais; impermeabilização de bacias; *pet litter* etc. A distribuição do consumo de bentonita varia significativamente de acordo com o país (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

Bentonita é um aglutinante metalúrgico tradicional, o que garante que os *pellets* secos e torrados tenham certas propriedades de resistência que atendem aos requisitos de transporte. A mormonita também contém pequenas quantidades de ilita, caulinita, *hallo-site*, clorita, zeólita, quartzo, feldspato e calcita. A bentonita é de cor branca ou amarelada e possui um brilho semelhante a cera, solo ou graxa, que depende do teor de ferro. A bentonita pode ser classificada como Na-bentonita, cor terra de branqueamento natural e Ca-bentonita na base da troca de troca tipo e conteúdo, bem como o tamanho da carga da camada de montmorilonita (LIU; XIE; QIN, 2017).

Tabela 3.10: Número de usos industriais da bentonita.

1 Absorvente higiênico para animais domésticos	70 Extração de minerais
2 Ação anti-rmatosa na indústria cosmética	71 Fabricação de azulejos
3 Aditivo anti-sedimentante para tintas	72 Fabricação de filtros
4 Aditivo para concreto	73 Fertilizantes de solos
5 Aglomerante na preparação da areia de moldagem	74 Filtrante de óleos
6 Aditivos funcionais (tixotrópicos) para tintas	75 Filtrante de sucos
7 Adsorvente de água	76 Filtrante de vinhos
8 Adsorvente de óleo	77 Fluidos de perfuração de poços de petróleo base água
9 Agente catalítico de craqueamento	78 Fluidos de perfuração de poços de petróleo base óleo
10 Agente ligante	79 Formador de escória na indústria de abrasivos
11 Agente plastificante em cerâmica branca	80 Fundição
12 Agente desidratante	81 Gelificação em cosméticos
13 Agente plastificante em cerâmica elétrica	82 Geocompostos
14 Agente plastificante em cerâmica técnica	83 Geossintéticos
15 Agente suspensor de fertilizantes	84 Graxas
16 Agente suspensor de inseticidas	85 Impermeabilizante de aterros sanitários
17 Agente tixotrópico nas perfurações dos poços de petróleo	86 Impermeabilizante de bacias
18 Agentes descorantes	87 Impermeabilizante de barragens
19 Agentes estabilizantes de suspensões	88 Impermeabilizante de canais
20 Aglomerante em sistemas de areia verde	89 Impermeabilizante de metrô
21 Aglomerante na preparação de machos de areia a óleo	90 Impermeabilizante de solos
22 Aglomerantes	91 Indústria alimentícia animal (componente inerte para rações)
23 Amaciantes em sabão	92 Indústria de cosméticos
24 Anticépticos	93 Indústria de materiais refratários
25 Argamassas	94 Indústria farmacêutica
26 Argilas pilarizadas para utilização em catalizadores	95 Indústrias de inseticidas
27 Auxiliar de extrusão	96 Liners de impermeabilizações com geomembranas
28 Auxiliar no plantio de pequenas sementes	97 Liners em camadas superficiais de proteção
29 Bactericida	98 Liners para proteções de geo-membranas
30 Barro industrial (ex. curtumes)	99 Liners para proteções superficiais em canais e talvegues
31 Beneficiamento de minerais	100 Liners secundários para tanques de armazenamentos
32 Bentonita para investigações geotécnicas e ambientais	101 Lixo orgânico
33 Bentonita para material de selamento	102 Louças sanitárias
34 Bentonita para uso enológico barreal	103 Lubrificantes
35 Cargas inorgânicas para borrachas	104 Mascaras de beleza
36 Cerâmica branca	105 Massas cerâmicas
37 Ceras industriais	106 Massas para eletrodos de eletroencefalograma
38 Clarificação de águas	107 Moldes para fundição
39 Clarificação de cervejas	108 Obtenção de argilas organofílicas
40 Clarificação de cidras	109 Obtenção de nanocompósitos polímero/argila
41 Clarificação de vinagre	110 Óleos comestíveis
42 Clarificante de caldo de cana de açúcar	111 Papéis
43 Clarificante de sucos	112 Papel de cópia sem carbono
44 Clarificante proteico do vinho	113 Pasta para restaurar dentes
45 Cobertura de papel	114 Pelotização de finos de minérios de ferro
46 Componentes orgânicos de tintas	115 Pelotização de minérios de ferro
47 Componentes orgânicos de vernizes	116 Peneiras moleculares
48 Confeção de materiais de alto valor agregado	117 Perfuração de poços artesanais (estabilizador de solos)
49 Construção civil	118 Pet litter (absorvente de dejetos de animais domésticos)
50 Construção de landfarming	119 Pigmentos inertes para borracha
51 Controle de potch	120 Pisos
52 Cremes de beleza	121 Porcelana elétrica
53 Descoloração de papel reciclado	122 Porcelanas
54 Descoramento de gorduras comestíveis	123 Produtos cerâmicos
55 Descoramento de óleos animais	124 Produtos de ação secativa na indústria cosmética
56 Descoramento de óleos minerais	125 Produtos de toalete
57 Descoramento de óleos vegetais	126 Produtos para limpeza doméstica
58 Desproteinizante	127 Purificação de óleos isolantes para transformadores
59 Detergentes	128 Purificação de óleos isolantes para turbinas elétricas
60 Diluentes para inseticidas	129 Reciclagem de óleos lubrificantes usados em motores à explosão
61 Elemento filtrante para indústria vinícola	130 Refratários plásticos
62 Elemento ligante	131 Resíduos alimentícios
63 Elementos filtrantes	132 Sabões
64 Eliminação de resíduos radioativos	133 Sabonetes
65 Engobes e fritas	134 Suportes catalíticos
66 Esmaltes	135 Tintas
67 Estabilizador de arco em abrasivos	136 Tixotrópico de fluidos de perfuração de poços de d'água
68 Estabilizantes	137 Tratamento de detritos
69 Estaqueamento de solo	138 Unguentos

Fonte: (SILVA; FERREIRA, 2008).

Mineralogia e Geologia

Esmectita é o termo dado a um grupo de minerais constituído por: montmorillonita, beidelita, nontronita, hectorita e saponita. Cada mineral forma uma estrutura similar, entretanto quimicamente diferente. A nontronita, por exemplo, é uma esmectita rica em ferro e a hectorita é rica em lítio. O mineral mais comum nos depósitos econômicos do grupo da esmectita é a montmorillonita. As variedades cálcicas e sódicas, baseadas no cátion trocável, são as mais abundantes (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

Do ponto de vista estrutural, os argilominerais da bentonita são constituídos de unidades empilhadas que compreendem camadas de sanduíches de íons coordenados octaedralmente entre duas camadas de íons coordenados tetraedralmente (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

No município de Greybull, ao norte do estado de Wyoming - EUA, quase na fronteira com o estado de Montana, encontra-se em lavra uma mina de bentonita pertencente à empresa Wyoming Bentonite (WYO-BEN, INC). As bentonitas de Wyoming são sódicas, de alta capacidade de inchamento e, portanto, os tipos mais eficientes para lama de perfuração. As propriedades de alta viscosidade da hectorita fazem desta, uma argila bastante adequada para lama de perfuração (LUZ; MACHADO; A.O.D., 2001).

A bentonita, na região de Wyoming, ocorre em rochas do cretáceo e terciário. A bentonita é uma rocha composta essencialmente de uma argila cristalina, tendo as características de um mineral formado pela desvitrificação de um material ígneo e vítreo, normalmente um tufo ou cinza vulcânica. Esse material normalmente contém proporções variadas de grãos de cristais acessórios que foram originalmente fenocristais num vidro vulcânico. Esses minerais geralmente são feldspatos (ortoclásio e oligoclásio), biotita, quartzo, piroxênio, zircônio e vários outros tipos de minerais, característicos de rochas vulcânicas (ELZEA; MURRAY, 1995; LUZ; MACHADO; A.O.D., 2001).

Uma das formas de caracterizar a bentonita (esmectita sódica) é baseada na sua capacidade de inchamento, quando se adiciona água. A bentonita, tendo o sódio como elemento dominante ou como um íon tipicamente trocável, possui elevada capacidade de inchamento e tem as características de uma massa, quando se adiciona água. Esse é o caso das bentonitas sódicas do estado de Wyoming-EUA. Quando a bentonita tem o cálcio como íon predominante, possui menor capacidade de inchamento. As bentonitas sódicas/cálcicas, denominadas mistas, incham de forma moderada e formam géis de menor volume do que as bentonitas sódicas. Dessa

forma, as bentonitas são classificadas como de alto inchamento ou sódica, baixo inchamento ou cálcica e de moderado inchamento ou tipo mista (LUZ; OLIVEIRA, 2008).

As bentonitas das minas de Boa Vista-PB ocorrem cobertas por uma camada de solo argiloso, variando de 1 a 10 m. Nos níveis onde é feita a lavra, as argilas ocorrem em camadas de cores variadas, por vezes formando estratificações ou zonas uniformes. Localmente, essas argilas recebem as seguintes denominações: de: chocolate; verde lodo, vermelha; sortida ou mista e bofe ou leve (LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. E NETO, 2001).

3.6 Diferentes tipos de bentonita e suas aplicações como aglomerante no processo de pelotização de minério de ferro

Diferentes tipos de bentonita influenciam diretamente no processo de pelotização, bem como a interação entre bentonita heterogênea ou homogênea e o concentrado de minério de ferro.

Exemplo disso é, no processo de pelotização, a bentonita sódica é geralmente usada como um material aglomerante que é mais caro do que as cálcicas e as bentonitas de tipos mistos. A bentonita de cálcio e a bentonita do tipo misto são mais baratas, porém devem ser ativadas com bicarbonato de sódio ou Na-CMC (carboximetilcelulose de sódio) antes de serem utilizadas como ligantes. É bem conhecido que o bicarbonato de sódio melhora a capacidade da bentonita de ligar o minério de ferro em pelotas e reduz a quantidade total de bentonita necessária para uma determinada quantidade de finos de minério de ferro. O sódio em carbonato de sódio substitui parte do cálcio e magnésio na estrutura da bentonita e, portanto, melhora a eficiência de ligação da Ca-bentonita. No entanto, acreditava-se que a bentonita não se combinaria com o carbonato de sódio, exceto quando uma solução de carbonato de sódio é empregada para fazer a substituição do íon (GUL et al., 2015).

Gul *et al.* (2015) fizeram um estudo para investigar a utilização de amostras de bentonitas de sódio, cálcio do tipo misto como ligante na pelotização de concentrado de minério de ferro fino. Usando concentrado de magnetita (Fe_3O_4) que foi obtido na Unidade de Concentração e Pelotização de Minério de Ferro Divrigi (Turquia). A análise química da amostra de magnetita é apresentada na Tabela 3.11. Três amostras diferentes de bentonita foram usadas para os experimentos. A Na-bentonita foi trazida do distrito de Resadiye. A Ca-bentonita

e a bentonita mista foram obtidas na Somas e Canbensan Company, respectivamente. As análises químicas das amostras de bentonita são apresentadas na Tabela 3.12.

Tabela 3.11: Análise química da amostra de magnetita.

Componentes	Fe	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ni
Teor %	69,00	0,30	1,50	0,78	0,65	0,55	0,04	0,08	0,23

Fonte: (GUL et al., 2015).

Tabela 3.12: Análises químicas de amostras de bentonita.

Composto %	Na-bentonita	Ca-bentonita	Mista
SiO ₂	57,09	51,76	54,74
Al ₂ O ₃	16,73	14,77	15,53
Fe ₂ O ₃	3,24	5,48	5,06
MgO	2,03	3,31	3,11
CaO	3,18	3,56	2,51
Na ₂ O	2,51	0,47	1,7
K ₂ O	0,97	0,94	1,51
TiO ₂	0,3	0,54	0,71
P ₂ O ₅	0,15	0,16	0,09
MnO	0,08	0,11	0,04
LOI	13,4	18,7	14,8

Fonte: (GUL et al., 2015).

Os resultados das distribuições de tamanho de partícula das amostras são mostrados na Figura 3.17 (GUL et al., 2015).

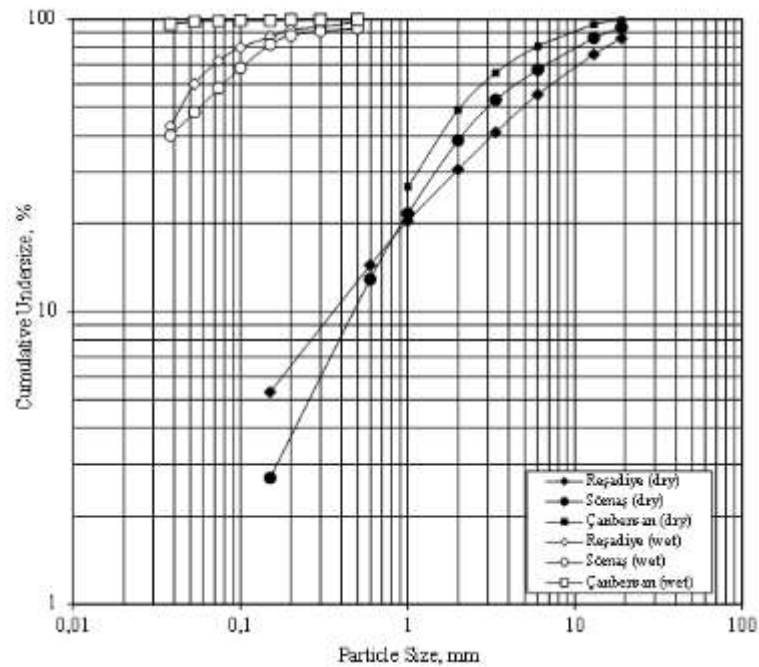


Figura 3.17: Distribuições de tamanho de partícula de amostras de bentonita.

Fonte: (GUL et al., 2015).

As capacidades de troca catiônica (CEC) (com base no padrão de teste de azul de metileno de ASTM 837 C) e os índices de inchamento de amostras de bentonita recebidas ou atualizadas são apresentadas na Tabela 3.13 (GUL et al., 2015).

Tabela 3.13: CEC e índices de inchamento de amostras de bentonita.

Tipo de Bentonita	Ativação	CEC (meq/100g)	Índice de Inchamento (cm ³)
Na-Bentonita (como recebida)	-	78	20,5
Na-Bentonita (upgraded)	-	94	32
Mix de Bentonitas	Ativada com 0.5% soda	64,5	14,0
	Ativada com 1.0% soda		16,0
	Ativada com 2.0% soda		20,0
	Ativada com 3.0% soda		22,0
Ca-Bentonita (como recebida)	Ativada com 0.5% soda	60	8,0
	Ativada com 1.0% soda		14,5
	Ativada com 3.0% soda		20,0
Ca-Bentonita (upgraded)	Ativada com 0.5% soda	78,5	11,0
	Ativada com 1.0% soda		14,0

Fonte: (GUL et al., 2015).

Um estudo feito por Liu; Xie; Qin (2017), foram utilizados três tipos diferentes de bentonitas para um teste de pelotização. Foram investigados os efeitos de diferentes granulometrias, componentes e conteúdo de bentonita na resistência à queda, resistência à compressão e temperatura de choque na pelota verde produzida (LIU; XIE; QIN, 2017).

Os concentrados de ferro e bentonitas usados foram produzidos por uma empresa de ferro e aço no sudoeste da China. Os principais constituintes químicos do concentrado de ferro e das bentonitas foram analisados por Fluorescência de Raios-X (XRF). Os resultados são apresentados nas Tabela 3.14 e Tabela 3.15. A granulometria de três diferentes bentonitas dos tipos A, B e C também foram analisadas. A bentonita foi analisada na forma de pó seco e foi moída, conforme mostrado na Figura 3.18 (LIU; XIE; QIN, 2017).

Tabela 3.14: Análise física e química do concentrado de minério de ferro (%).

Constituintes	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	FeO	S	-0.074mm	Moisture
Teor	57,57	5,93	1,20	1,10	1,80	4,80	19,78	0,41	73,28	4,50

Fonte:(LIU; XIE; QIN, 2017).

Tabela 3.15: Análise química das bentonitas (%).

Constituintes	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂
Bentonita-A	4,10	2,83	13,80	0,034	61,68	2,41	0,830	0,156	0,014
Bentonita-B	3,58	3,34	15,93	0,040	71,12	1,97	0,527	1,070	0,020
Bentonita-C	3,49	1,96	14,66	0,010	63,64	1,38	0,751	0,465	0,050

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

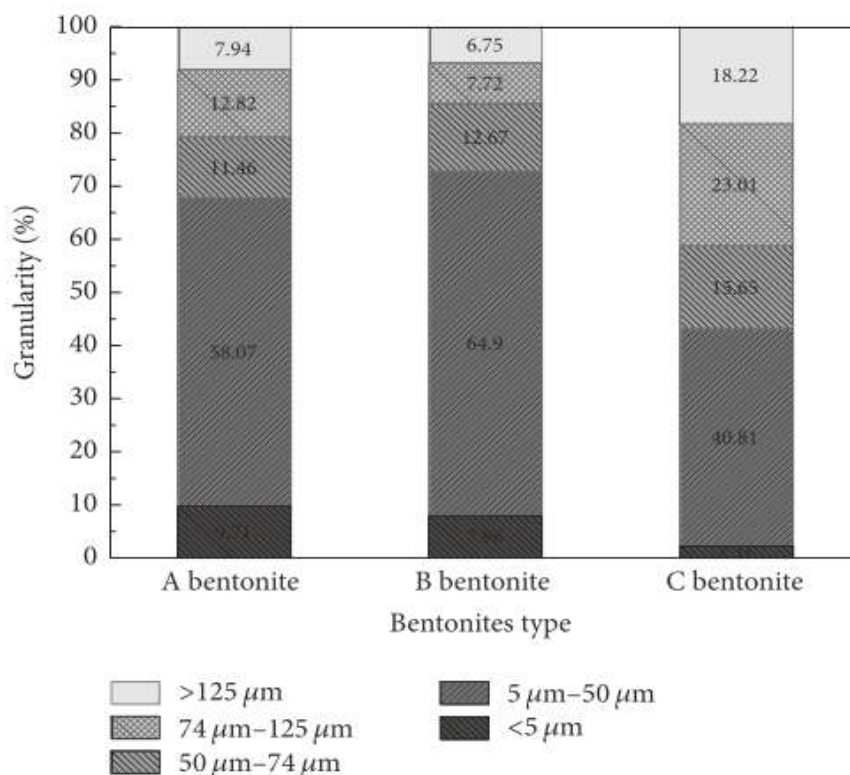


Figura 3.18: Distribuição granulométrica da bentonita.

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

Conforme indicado na Figura 3.18, a distribuição do tamanho de partícula dos tipos de bentonita A, B e C concentrou-se principalmente na faixa de 5–50 μm a 58,07%, 64,90% e 40,81%, respectivamente. A bentonita do tipo B teve o menor tamanho de partícula, seguida pela bentonita do tipo A. O tipo C teve o maior tamanho de partícula e a distribuição de partícula mais uniforme. A Figura 3.19 mostra a distribuição em tamanho real do concentrado de minério de ferro (LIU; XIE; QIN, 2017).

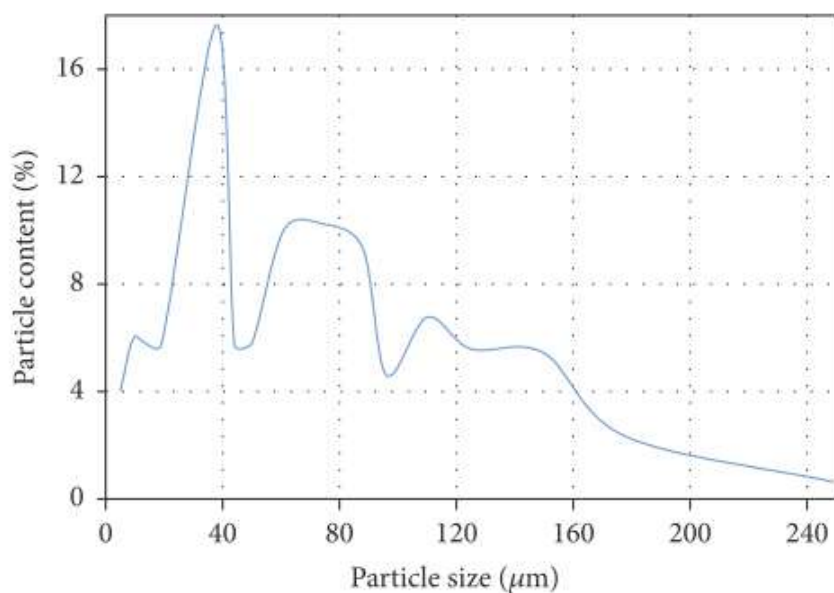


Figura 3.19: A distribuição em tamanho real do concentrado de minério de ferro.

Fonte:(LIU; XIE; QIN, 2017).

As proporções da configuração seca foram 1,5% bentonita-A, 1,5% bentonita-B, 1,3% bentonita-C, 1,0% bentonita-B e 1,0% bentonita-C. A Figura 3.20 ilustra as propriedades dos três tipos de bentonita utilizados por este experimento. O teor de montmorilonita da bentonita do tipo B é de 89,25%, superior ao do tipo A (64,7%) e do tipo C (72,74%). O tipo B tem os valores mais altos de volume de expansão, absorção de água e absorção de azul de metileno, seguido pelo tipo C e tipo A. Um valor de absorção de azul de metileno mais alto indica que a bentonita tem maior absorvidade, capacidade de absorção de água e maior volume de inchamento. Absorção de azul de metileno, volume de inchamento, conteúdo de montmorilonita e absorção de água são índices importantes para avaliar a qualidade da bentonita. Portanto, a bentonita do tipo B tem a qualidade mais alta, seguida do tipo C e finalmente do tipo A (LIU; XIE; QIN, 2017).

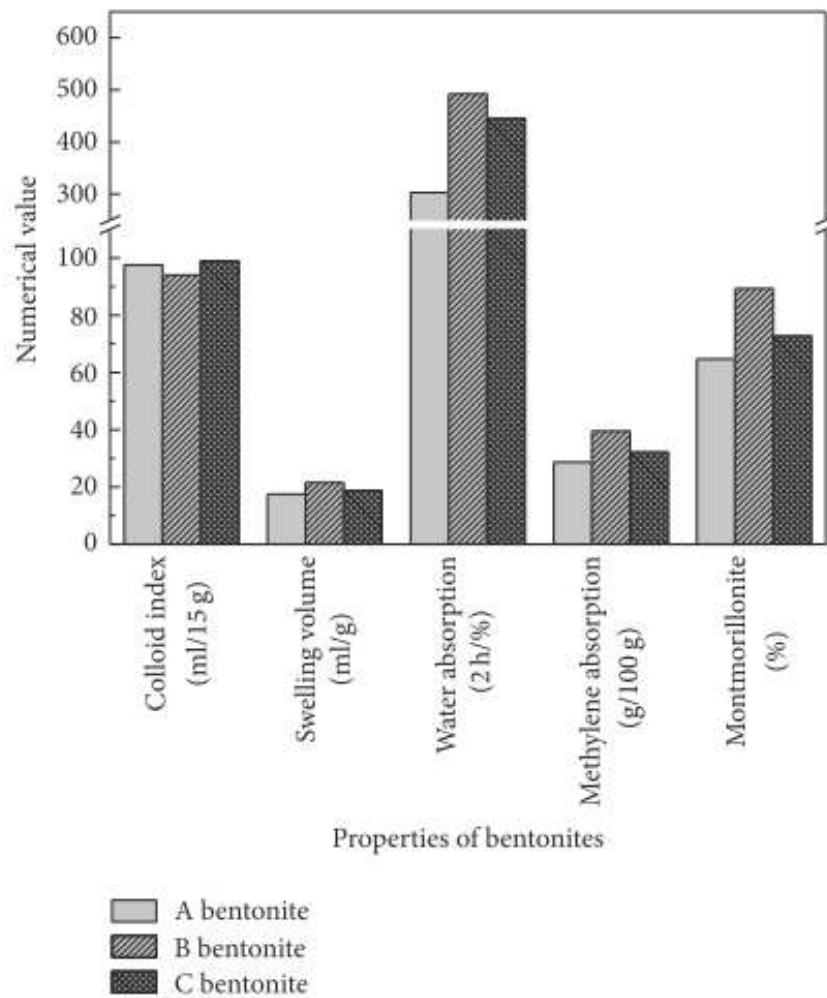


Figura 3.20: Resultados do teste da bentonita.

Fonte:(LIU; XIE; QIN, 2017).

Qiang (2016) formularam respectivamente em um de seus estudos dez tipos de bentonita em uma suspensão com uma fração de massa de bentonita de 15%, e a tensão de cisalhamento da suspensão de bentonita em diferentes taxas de cisalhamento foi medida. A Figura 3.21 mostra os parâmetros reológicos de diferentes bentonitas obtidos por cálculo de ajuste (QIANG et al., 2016).

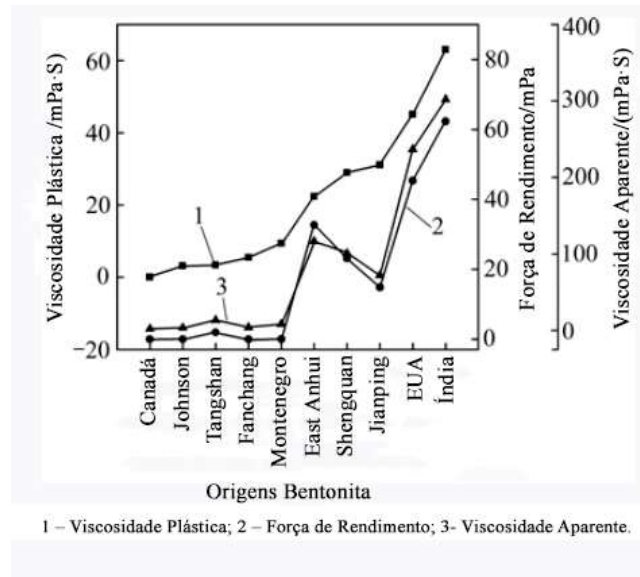


Figura 3.21: Parâmetros reológicos de diferentes bentonitas.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

Pode ser visto na Figura 3.21 que a viscosidade plástica, força de rendimento e viscosidade aparente do solo indiano são as maiores, seguidas pelo solo americano, e a viscosidade plástica, força de rendimento e viscosidade aparente do solo Jiashan, solo Forte, solo Tangshan, solo Fanchang e solo Heishan ambos são pequenos. Além disso, a resistência ao escoamento e a viscosidade aparente têm a mesma tendência de mudança, e a relação correspondente entre as duas e a viscosidade plástica não é óbvia (QIANG et al., 2016).

Qiang et al. (2016) estudaram a influência de diferentes íons nas propriedades reológicas da bentonita. O mesmo tipo de bentonita atua sobre diferentes concentrados de ferro, seu efeito de pelletização é diferente e a qualidade das pelotas obtidas é diferente. Por um lado, diferentes concentrados de ferro têm diferentes composições de tamanho de partícula e suas próprias propriedades de pelletização; por outro lado, como diferentes concentrados de ferro têm diferentes propriedades de mineralização, eles têm diferentes efeitos nas propriedades de pelletização da bentonita, como íons residuais em concentrados de ferro. A qualidade das pelotas tem um impacto maior, e a qualidade das pelotas verdes produzidas com água destilada é significativamente melhor do que as pelotas produzidas com água industrial. Portanto, a bentonita indiana foi usada no estudo, e íons comuns na pelletização de matérias-primas foram adicionados artificialmente para estudar os efeitos de diferentes íons nas propriedades reológicas da bentonita (QIANG et al., 2016).

3.7 As principais características da bentonita

Os parâmetros que representam as propriedades da bentonita, importantes para a pelotização de minério de ferro são: índice colóides, grau de inchamento, absorção de água, tamanho acima de 200 *mesh*. (SOLÉ; WENDLING, 2020)

O índice colóides, ou teor de colóide ou grau de colóide, indica o teor de montmorilonita da bentonita. O valor coloidal é expresso pela porcentagem de volume total da mistura coloidal em uma amostra até uma certa proporção de água após 24 horas em repouso. As bentonitas para aplicação em pelotização precisam ter uma alta porcentagem de colóides. Em geral os colóides se situam entre 60 e 80%. Os colóides são partículas de tamanho entre 1 nano e 1 micron que quando dispersas em um líquido permanecem em suspensão sem decantar. Eles facilitam aglomeração. (SOLÉ; WENDLING, 2020).

Absorção de água: A bentonita deve ter grande capacidade de absorção de água e com isso ela experimenta um inchamento causado pela separação das placas cristalinas da smectita, onde a mesma absorção deve ser de pelo menos acima de 300% da sua capacidade (SOLÉ; WENDLING, 2020).

Granulometria: é uma das características mais importantes dos argilominerais porque ela domina muitas de suas propriedades, pois a argila é finamente dividida e desagrega-se facilmente (SILVA, 2011).

A fração +200# é a medida mais importante da finura de uma bentonita. Ela é feita no material *in natura* conforme recebido do fornecedor. Sabe-se que um fator importante na bentonita é a velocidade de dispersão da argila na água, mas quanto maior a quantidade material grosso acima de 200# presente na bentonita menor vai ser a velocidade de dispersão na água. (SOLÉ; WENDLING, 2020).

O grau de inchamento, está relacionado à capacidade de dispersão da bentonita na água. O Inchamento da bentonita em contato com água faz com que ela precise de mais espaço e então ela se espalha mais facilmente entre as partículas do minério preenchendo os vazios entre os grãos (SOLÉ; WENDLING, 2020).

O teor de montmorilonita é medido com base na absorção do azul de metileno pela montmorilonita. O padrão de qualidade da bentonita metalúrgica da China (GB / T20973-2007)

é adotado no processo de experimento para testar e determinar a propriedade principal da bentonita (LIU; XIE; QIN, 2017).

Quanto maior o teor de montmorilonita da bentonita, maiores são os valores de volume de inchamento, absorção de água e absorção de azul de metileno. A montmorilonita absorve azul de metileno quando a bentonita é dispersa em água. Assim, a bentonita com alto teor de montmorilonita absorve mais azul de metileno. A absorção de azul de metileno também é um indicador de absorvidade e absorção de água (LIU; XIE; QIN, 2017).

Um valor de absorção de azul de metileno mais alto indica que a bentonita tem maior absorvidade, capacidade de absorção de água e maior volume de inchamento. Absorção de azul de metileno, volume de inchamento, teor de montmorilonita e absorção de água são índices importantes para avaliar a qualidade da bentonita (LIU; XIE; QIN, 2017).

A bentonita tem forte higroscopicidade e expansibilidade. Isto pode absorver água em até 8-15 vezes sua massa seca. Quando úmido, pode expandir em até 30 vezes sua massa seca. A bentonita pode ser dispersa em meio aquoso como um material viscoso e em suspensão. Diferentes tipos de bentonitas influenciam as propriedades das pelotas, bem como a interação entre bentonitas heterogêneas ou homogêneas e concentrado de ferro (LIU; XIE; QIN, 2017).

O comportamento de inchamento dos minerais de argila foi tratado em detalhes por vários autores. O inchamento da montmorilonita deve ser focado, uma vez que ela serviu de modelo por muitos anos devido à sua alta capacidade de inchamento e sua capacidade de formar suspensões aquosas estáveis. Na estrutura de montmorilonita mostrada na Figura 3.15, apenas uma proporção relativamente pequena dos cátions inorgânicos balanceando a carga da camada negativa está localizada nas superfícies externas do cristal. A maioria desses cátions está presente no espaço intercamadas entre as plaquetas de argila. As folhas finas com carga negativa são mantidas juntas pelas forças eletrostáticas entre camadas alternadas de cátions de ponte (normalmente Na^+). Quando a montmorilonita seca é colocada em uma atmosfera úmida, é capaz de absorver o vapor de água adsorvendo-o na região intercamada. O inchaço é o afastamento ou desconexão das partículas de argila, especialmente aquelas em um arranjo paralelo até que atinjam seu equilíbrio de separação sob uma determinada pressão. O aumento do espaçamento c , ou do grau de expansão dos planos das camadas (Figura 3.22), depende dos cátions localizados na região intercamada, ou seja, da clivagem basal. Se os cátions das

intercamadas forem monovalentes e fortemente hidratados (Na^+ , Li^+), a repulsão entre as plaquetas é mais forte e o grau de separação das plaquetas é maior (LUCKHAM; ROSSI, 1999).

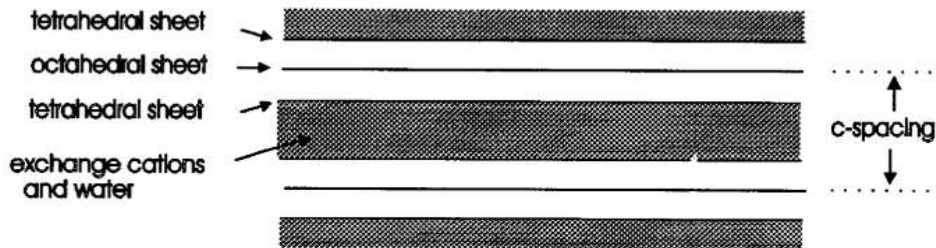


Figura 3.22: Representação de uma rede de argila em expansão de três camadas.

Fonte: (LUCKHAM; ROSSI, 1999).

Dependendo da extensão do aumento no espaçamento basal entre duas folhas de montmorilonita, dois tipos de mecanismos de inchamento podem ser distinguidos: **inchamento cristalino e osmótico**. O inchamento cristalino resulta da adsorção de camadas monomoleculares de água nas superfícies de cristal basal (nas superfícies externas e das intercamadas). A primeira camada de água é mantida na superfície por ligações de hidrogênio à rede hexagonal de átomos de oxigênio. A montmorilonita é capaz de intercalar várias camadas de água e o espaçamento c aumenta de 10 para 20 Å. O inchaço nesta região é principalmente devido à hidratação dos cátions das intercamadas que provavelmente ocupam posições entre duas camadas opostas de silicato. Van Oss e Giese demonstraram recentemente, aplicando uma teoria da termodinâmica de superfície, que a superfície Na^+ -montmorilonita é hidrofílica, o que também explica a grande captação de água entre as plaquetas para este argilomineral (LUCKHAM; ROSSI, 1999).

Luckham e Rossi (1999) também disse que a montmorilonita saturada com cátions policristalinos normalmente não se expande além de uma separação intercamada de 10 Å, porque o efeito repulsivo da hidratação iônica é compensado pela atração eletrostática entre as camadas de cátion e silicato. No entanto, a montmorilonita contendo pequenos cátions monovalentes, como Na^+ ou Li^+ , absorvem mais água. O espaçamento entre camadas pode aumentar abruptamente até 30-40 Å e continuar a aumentar até várias centenas de Angstroms com teor de água. Isso é chamado de inchaço osmótico. Seu nome vem de uma força osmótica repulsiva devido à interação das camadas, limitada apenas até certo ponto pelas forças de Van der Waals. A força repulsiva entre as plaquetas é contida por forças de atrito decorrentes das interações entre as partículas (ligações borda-face). Mais recentemente, estudos de difração de

raios-X em suspensões de Na⁺-montmorilonita foram realizados para determinar o alinhamento das partículas de argila por inchamento. Para altas concentrações de Na⁺-montmorilonita, um modelo de coluna reta foi usado para descrever o comportamento de inchaço observado no trabalho de Norrish, mas não conseguiu descrever o inchaço com maior teor de água (ver Figura 3.23a). Um modelo de coluna em zig-zag foi encontrado para concordar com o inchaço observado tanto no baixo quanto no alto teor de água, onde as camadas incham não apenas longitudinalmente, mas também lateralmente, assumindo que o tamanho da camada é 1 µm (ver Figura 3.23b) (LUCKHAM; ROSSI, 1999).

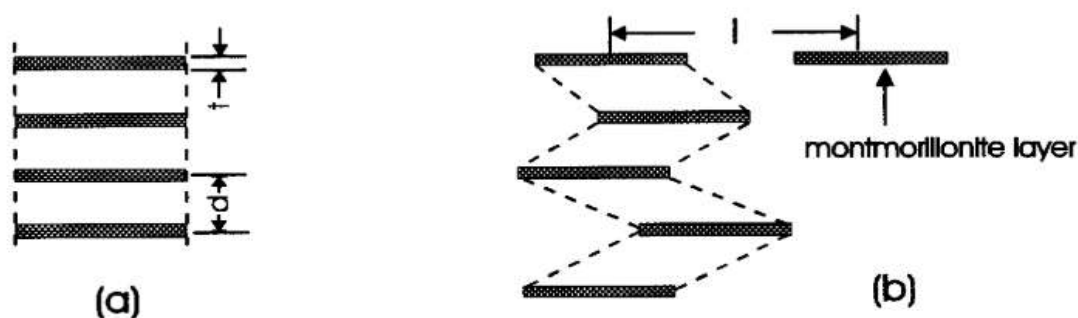


Figura 3.23: Diagrama esquemático do modelo de coluna reta (a) e modelo de coluna zig-zag (b), para o arranjo de camadas em suspensões aquosas de montmorilonita.

Fonte: (LUCKHAM; ROSSI, 1999).

Algumas propriedades das argilas estão diretamente relacionadas com suas aplicações, são elas (SILVA, 2011):

Superfície específica: As argilas possuem elevada superfície específica muito importante em certos usos industriais em que a interação sólido-fluído dependem diretamente da superfície específica do sólido: cerâmica, catálise e branqueamento de óleos. A superfície específica de uma argila é definida como a área da superfície externa mais a área da superfície interna das partículas constituintes, expressa em m²/g. A superfície específica exprime o teor em fração argilosa ou o teor relativo de finos, médios e grossos bem como o grau de dispersão/agregação das partículas constituintes de argila (SILVA, 2011).

Tamanho das partículas: as argilas são constituídas por partículas fracamente agregadas, que se dispersam na água permitindo a separação das partículas maiores (que sedimentam) das menores (que se mantêm em suspensão coloidal) (SILVA, 2011).

Plasticidade: é a propriedade que têm as argilas, quando molhadas, de se deixarem moldar conservando as formas que lhe são dadas. Também pode ser definida como sendo uma

propriedade que se manifesta na mudança de forma sem rotura de uma massa feita com argila e água por aplicação de uma força exterior e pela retenção da forma quando a força é removida ou reduzida abaixo de um certo valor, corresponde à chamada tensão de cedência. O termo trabalhabilidade usa-se também, por vezes, como sinónimo de plasticidade (SILVA, 2011).

Retração: a argila contrai-se pela secagem em função da perda de água e consequentemente aproximação das partículas. O índice de contração varia com a natureza das argilas; as de partículas mais finas sofrem maior contração (SILVA, 2011).

Refratariedade: propriedade na qual a estrutura não é modificada quando submetida a altas temperaturas. O ponto de fusão das argilas depende da sua constituição química. As argilas de alto ponto de fusão são chamadas refratárias e correspondem às de natureza caulínica; as montmorilonitas e as illitas têm menor ponto de fusão (SILVA, 2011).

Viscosidade: A viscosidade de um fluido traduz a resistência que ele oferece à fluência. É a medida de fricção interna de suas moléculas. A viscosidade de qualquer suspensão de argila sofre modificações geralmente aumentando continuamente e irreversivelmente com o tempo (SILVA, 2011).

Tixotropia: as argilas coloidais dispersas na água, numa adequada concentração, adquirem o estado de gel, solidificando-se quando ficam em repouso; se sofrerem uma agitação, passam novamente ao estado de sol. Esse fenómeno está relacionado com as argilas de partículas extremamente finas do grupo das esmectitas e tem grande importância prática no preparo de lamas para uso em perfuração de poços de petróleo, destinadas a prevenir desabamentos das paredes do poço em perfuração e a conduzir os detritos de rochas para fora do poço e, ainda, para mantê-los em suspensão quando ocorrer uma paralisação da sondagem (SILVA, 2011).

As propriedades reológicas da bentonita: A suspensão de bentonita fluirá como um fluido viscoso, e sua tensão de cisalhamento tem uma relação linear com a taxa de cisalhamento após o início do fluxo. Na prática, a relação entre a taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento da suspensão de bentonita é mostrada na Figura 3.24 (QIANG et al., 2016).

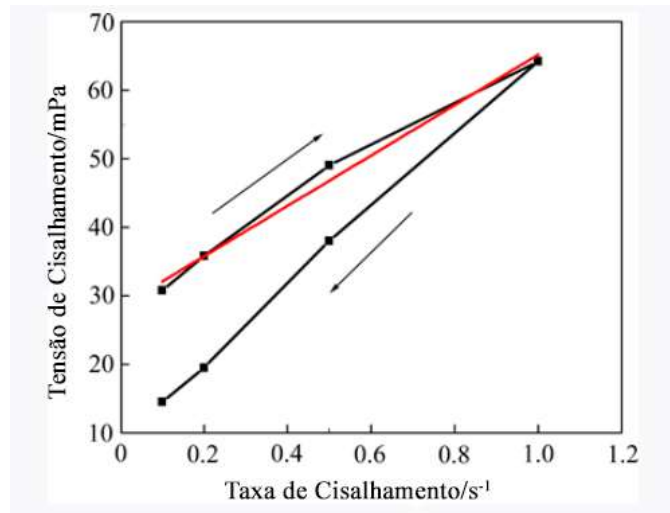


Figura 3.24: Diagrama esquemático da curva reológica da bentonita.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

Pode-se observar na Figura 3.24 que, sob a mesma taxa de cisalhamento, a tensão de cisalhamento da linha descendente na Figura 3.24 não é tão grande quanto a da linha ascendente, pois a suspensão de bentonita é um fluido não newtoniano e tem tixotropia. Sua viscosidade se torna mais fina com a velocidade. Uma vez que a linha ascendente é mais representativa das propriedades reológicas da bentonita, uma análise de ajuste em linha reta é realizada na linha ascendente na Figura 3.24, onde a viscosidade plástica é a inclinação da linha reta de ajuste, a tensão de escoamento é a interceptação da linha reta de ajuste no eixo y e a mesa de bentonita. A viscosidade aparente é o valor médio da viscosidade medida em $0,2s^{-1}$ e $1s^{-1}$ na linha ascendente. As propriedades reológicas da bentonita podem ser caracterizadas quantitativamente pelo cálculo da viscosidade plástica, resistência ao escoamento e viscosidade aparente da suspensão de bentonita (QIANG et al., 2016).

3.8 A influência da bentonita em diversas proporções e qualidade nas características da pelota crua

Nos processos industriais atuais, para a obtenção de uma pelota crua de qualidade a dosagem típica do aglomerante bentonita é de: 0,3% a 0,7% ou 5 -7 kg/t mistura (SOLÉ; WENDLING, 2020).

Gul et al.,(2015) fizeram um estudo onde, diferentes quantidades de bentonita foram adicionadas ao concentrado de magnetita para determinar a proporção ótima de ligante e o teor de umidade e, em seguida, as pelotas foram preparadas enrolando-as cuidadosamente à mão.

Os testes de resistência à compressão e queda foram realizados em pelotas verdes. Após a determinação da taxa de aglomerante e do teor de umidade das amostras, outros experimentos foram realizados em um disco de pelotização em escala de laboratório sob parâmetros de teste ideais e diferentes tipos de pelotas verdes foram produzidas. Os testes de resistência à compressão, número de quedas e porosidade foram aplicados às pelotas onde os seguintes números foram levados em consideração para a avaliação dos resultados (GUL et al., 2015; MEYER, 1980).

- Resistência à compressão: 1 kg / pelota para verde, 1 kg / pelota para pelota seca e 200 kg / pelota para pelotas queimados,
- Número de queda: 4 para pelotas verdes e secas,
- Porosidade: 25-32% para pelotas queimadas.

Os autores utilizaram um disco de pelotização de 60 cm de diâmetro nas experiências. A inclinação e a velocidade de rotação devem ser 45° e 40 rpm, respectivamente. Amostras previamente misturadas de concentrado de magnetita e bentonita (2 kg em base seca) foram alimentadas ao disco. Após a introdução da amostra, foi adicionada uma pequena quantidade de água e iniciada a geração dos núcleos. Os núcleos foram umedecidos com spray de água para reter o teor de umidade e, ao mesmo tempo, foi adicionado material adicional para transformá-los em pelotas. Esses produtos são chamados de pelotas verdes. As pelotas verdes foram imediatamente secas a 105 °C e mantidas nessa temperatura por 20–24 horas para garantir que estivessem completamente secas. As pelotas secas foram queimadas a 1200 °C por 30 min (Figura 3.25). Finalmente, testes de resistência à compressão, queda e porosidade foram aplicados nas respectivas amostras (GUL et al., 2015).



Figura 3.25: (a) verde, (b) seca, (c) pelotas queimadas.

Fonte: (GUL et al., 2015).

Averiguando o efeito da adição de bentonita de sódio na especificação de pelotas, GUL et al. (2015), realizaram uma série de experimentos de pelotização para determinar o efeito da adição de bentonita de sódio na formação de pelotas. Quando comparadas às aplicações industriais, dosagens mais altas de adição de bentonita foram testadas no caso de outras amostras de bentonita que não sejam Na-bentonita enriquecida. É óbvio que as dosagens devem ser mais altas quando os tipos mistos ou de cálcio são usados devido às suas propriedades de ligação baixas. Independentemente da quantidade de bentonita adicionada, o aumento da dosagem de água melhora a resistência das pelotas verdes. Isso pode ser atribuído à natureza coloidal da bentonita com grande área de superfície. Conseqüentemente, a plasticidade das pelotas verdes é aumentada (Dor et al., 1970). Os resultados dos testes de número de quedas mostraram que a proporção ótima de aglomerante foi de 2,5% e o teor de umidade foi de 12% para ambas as pelotas verdes. Os testes de resistência à compressão foram realizados em pelotas secas e queimadas. Além disso, o efeito da bentonita de sódio concentrada também foi investigado. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 3.16 (GUL et al., 2015).

A Tabela 3.16 mostra claramente que a adição de Na-bentonita leva a uma melhoria substancial na resistência do grânulo. Os melhores resultados do teste foram obtidos quando 2,5% de bentonita (conforme recebida) foi adicionada. Um aumento na adição de bentonita causa um aumento no número de quedas, resistência à compressão e porosidade, mas os valores de resistência à compressão tendem a diminuir com a adição posterior da quantidade de bentonita recebida. No caso de adição de bentonita aprimorada, os valores de resistência à compressão aumentaram com o aumento da quantidade de bentonita. No entanto, o número de quedas das pelotas verdes e secas foi considerado baixo (GUL et al., 2015).

Tabela 3.16: Efeito da bentonita sódica na resistência a compressão e queda de pelotas.

Tipo de Bentonita	Na-Bentonita (como recebida)			Na-Bentonita (Upgraded)		
Quantidade de bentonita (%)	2	2,5	3	0,7	1	1,5
Resistência à compressão (kg / pelota seca)	10	7	6	5	6	9
Resistência à compressão (kg / pelota queimada)	510	328	318	250	407	447
Porosidade (%) (pelota queimada)	24	28	30	25	29	32
Número de queda (vezes / pelota verde)	5	7	10	2	2	7

Fonte: (GUL et al., 2015).

Sob efeito de se descobrir também o efeito da adição de bentonita de cálcio na especificação de pelotas, contataram que as bentonitas de sódio são mais absorventes do que as bentonitas de cálcio porque os íons de cálcio bivalentes mantêm as plaquetas de argila mais fortemente unidas do que os íons de sódio monovalentes, deixando menos água entre as plaquetas. É um fato que a Turquia possui mais reservas de bentonita de cálcio do que de bentonita de sódio. Por outro lado, os preços das bentonitas de sódio são mais caros em comparação com as bentonitas de cálcio. Portanto, a bentonita Ca foi usada para os testes (GUL et al., 2015; S.J.; S.K., 2003).

Gul et al. (2015) repetiram procedimento semelhante com bentonita de cálcio. A proporção do ligante foi ajustada entre 1% e 4% em peso de concentrado de magnetita e o teor de umidade foi ajustado como 8, 9, 10 e 12% para todas as dosagens do ligante. Os resultados dos testes preliminares mostraram que o aumento da quantidade de bentonita resulta em um aumento no número médio de quedas de pelotas verdes. No entanto, esses valores ainda estão abaixo do valor padrão, que é 4 (GUL et al., 2015).

Nos testes iniciais do estudo de Gul et al. (2015), os melhores resultados foram obtidos quando a proporção de bicarbonato de sódio foi de 0,5% de sólidos adicionados. Nesta proporção, o número de queda de pelotas verdes e secas tinha o padrão de 4. Testes secundários foram realizados usando disco de pelotização em escala de laboratório com adição de 0,5, 1 e 3% de soda e, em seguida, testes de esmagamento e resistência à queda foram aplicados às pelotas produzidas. Os resultados apresentados na Tabela 3.16 mostram que o aumento da dosagem de bentonita ativada com bicarbonato de sódio proporcionou aumento na resistência à compressão, no número de quedas e na porosidade das pelotas. Os melhores resultados foram obtidos quando a bentonita ativada com bicarbonato de sódio a 3% foi adicionada na quantidade de 4% (GUL et al., 2015).

Os efeitos do bicarbonato de sódio na ativação da bentonita de cálcio aprimorada foram testados individualmente. Nos testes iniciais, a proporção ótima de aglomerante foi encontrada em 4% para pelotas cruas e secas. Outros testes foram realizados com disco de pelotização em proporções de ligante de 3% e 4%. Nos processos de ativação, a proporção de bicarbonato de sódio foi de 0,5% e 1% em peso de sólidos (Tabela 3.17). O número médio de quedas de pelotas aumenta com a adição de 4% de aglomerante de bentonita de cálcio ativado. A mesma tendência é relatada para a resistência à compressão para pelotas cruas e secas. (GUL et al., 2015).

GUL et al. (2015) também estudaram o efeito da adição de bentonita de tipo misto na especificação de pelotas. Nesses testes, bentonita de tipo misto foi adicionada ao concentrado de magnetita em diferentes dosagens (1, 2, 3 e 4%). O teor de umidade foi ajustado para 8, 9, 10 e 12% para todas as adições de ligante. Quanto maior a adição de aglomerante, maior o número médio de quedas para pelotas verdes foi observado. No caso da ativação do bicarbonato de sódio, as proporções foram de 0,5, 1 e 3%. Os melhores resultados com a ativação do bicarbonato de sódio foram obtidos quando a proporção do ligante foi de 3%. Os testes anteriores foram realizados usando um disco de pelotização em escala de laboratório com adição de 0,5, 1, 2 e 3% de bicarbonato de sódio e, em seguida, as pelotas foram testadas quanto à resistência à compressão e à queda. Os resultados são apresentados na Tabela 3.17. Como pode ser visto na Tabela 3.17, a adição de bicarbonato de sódio a 1% é suficiente para atender aos valores padrões. Quando a proporção de bentonita ativada é aumentada, os valores de resistência à compressão, número médio de quedas e porosidade aumentam (GUL et al., 2015).

É bem conhecido que as bentonitas de Na são principalmente preferidas para pelotizar concentrados de minério de ferro devido às suas altas capacidades de ligação. As capacidades de ligação das Na-bentonitas podem estar relacionadas ao índice de dilatação. É óbvio que a possível substituição de misturas alcalinas ativadas ou bentonitas de Ca como agentes ligantes será mais econômica, uma vez que as reservas de bentonita-Na no mundo são limitadas. Os preços das Na-bentonitas no grau de agente pelotizante também são relativamente altos quando comparados a outras bentonitas. Portanto, a maneira de ativar as bentonitas mistas ou de cálcio na forma de sódio pode ser aventureira. As características de pelotização das bentonitas Na, mistas e Ca foram investigadas, e os resultados estão resumidos nas Figura 3.26 Figura 3.30 (GUL et al., 2015).

Como visto na Figura 3.26, o aprimoramento das bentonitas de Na resultou em menor adição de bentonita para pelotas secas padrão. Além disso, a adição de bentonita necessária (mínimo 2%) para bentonitas de Na originais (conforme recebido) foi reduzida para os níveis de 0,7% após o processo de ativação. Comportamento semelhante também foi obtido para as resistências à compressão e porosidade das pelotas queimadas (Figura 3.27 e Figura 3.28). Quanto maior o índice de inchamento ou CEC, melhores são as propriedades da pelota. Quando o número de quedas das pelotas é avaliado, pode-se dizer que a adição de bentonita na mistura aumentou o número de quedas das pelotas verdes e a adição de bentonita pode ser reduzida a níveis mais baixos com a ativação de soda de Ca ou bentonitas mistas e aprimoramento de Na-

bentonitas (Figura 3.29). Isso pode ser atribuído ao aumento das características de ligação da bentonita por meio da ativação ou aprimoramento da soda (GUL et al., 2015).

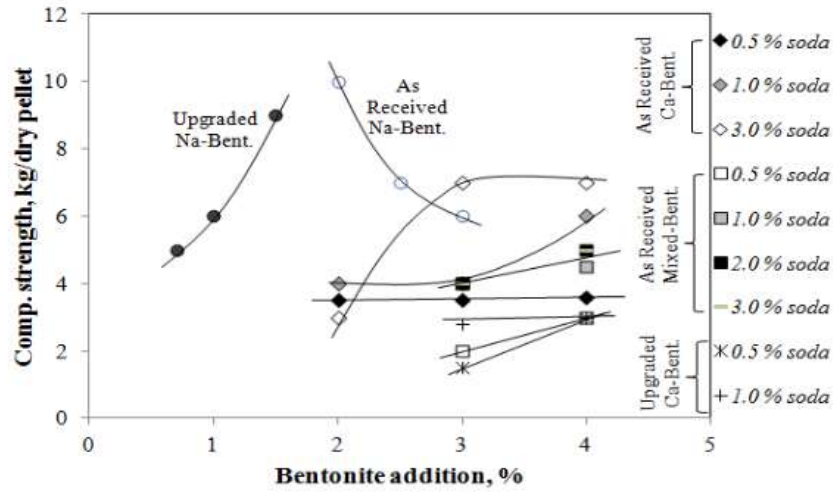


Figura 3.26: Resistências à compressão de pelotas secas com diferentes tipos de bentonitas.

Fonte: (GUL et al., 2015).

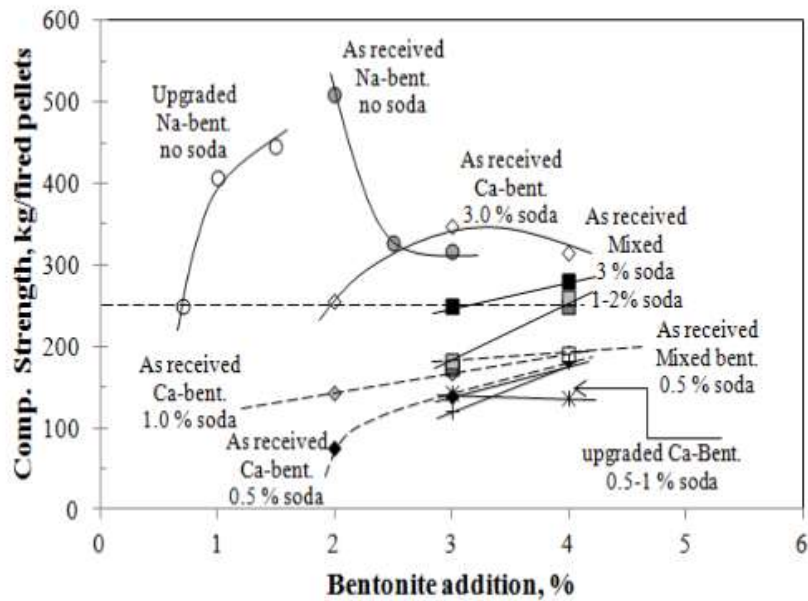


Figura 3.27: Resistências à compressão de pelotas queimadas com diferentes tipos de bentonitas.

Fonte: (GUL et al., 2015).

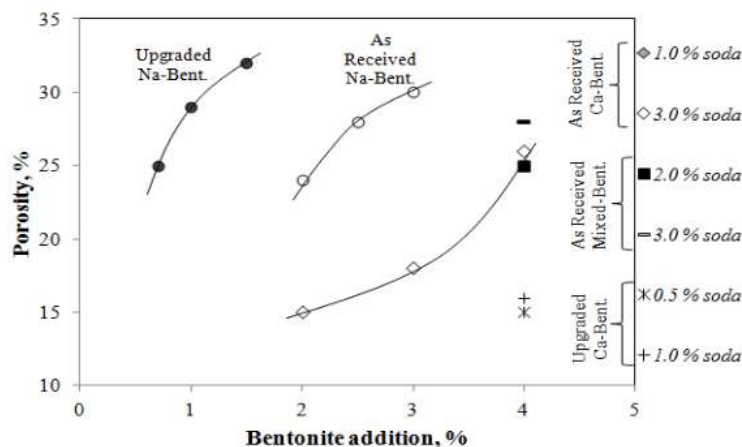


Figura 3.28: Porosidade de pelotas queimadas com diferentes tipos de bentonitas.

Fonte: (GUL et al., 2015).

Tabela 3.17: Efeito da Ca-Bentonita ativada e da bentonita mista na resistência à compressão, porosidade e resistência à queda de pelotas

	Ca-Bentonita (como recebida)									Ca-Bentonita (upgraded)				Bentonita Mista (como recebida)							
	Quantidade Bicabornato de sódio (%)									Quantidade Bicabornato				Quantidade Bicabornato de sódio							
	0,5			1			3			0,5		1		0,5		1		2		3	
Quantidade de Bentonita (%)	2	3	4	2	3	4	2	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3	4
Resistência a Compressão (kg/pelota verde)	1	1,2	1	1,5	1,5	2	1	2	2,2	0,8	1,1	0,9	1	1	1,5	1,3	2	1,5	1,5	1,6	2
Resistência a Compressão (kg/pelota seca)	3,5	3,5	3,6	4	4	6	3	7	7	1,5	3	2,8	3	2	3	4	4,5	4	5	4	5
Resistência a Compressão (kg/pelota queimada)	75	140	184	144	167	192	255	348	314	143	137	120	183	173	190	176	250	182	260	250	280
Porosidade (%) (pelota queimada)	-	-	-	-	-	-	15	18	26	-	15	-	16	-	-	-	25	-	25	-	28
Numero de queda (vezes/pelota verde)	2	4	7	3	5	7	3	5	8	3	7	3	8	4	7	5	8	7	10	8	10

Fonte:(GUL et al., 2015).

A ativação de bentonitas mistas com soda em quantidades superiores a 1% também aumentou as resistências à compressão (pelotas secas e queimadas). Por outro lado, as dosagens de soda inferiores a 1% na ativação produziram bentonita que não atendeu aos padrões de pelotas (Figura 3.26 e Figura 3.27). Comportamento semelhante também foi observado para o número de queda das pelotas verdes (Figura 3.29). Para a porosidade exigida das pelotas de acordo com os padrões de pelotas, a dosagem ótima de bentonitas mistas após a ativação da soda foi encontrada em quantidades superiores a 2% (Figura 3.28) (GUL et al., 2015).

O achado mais interessante nos testes de pelotização foi sobre o uso de Ca-bentonita. Sabe-se que a Ca-bentonita não pode ser usada na prática devido às suas características de baixa

ligação. Os resultados dos testes mostraram que a Ca-bentonita pode ser considerada um aglomerante para a pelletização de concentrados de magnetita fina quando ativada com soda (Figura 3.26 e Figura 3.29). As dosagens de bentonitas que fornecem os requisitos padrões de pelotas com respeito a CEC e características de inchamento das bentonitas estão resumidas na Figura 3.30 onde as regiões confinadas representam pelotas em conformidade com as normas. Como visto na Figura 3.30, as bentonitas de Na conforme recebidas atendem aos padrões para agentes de pelletização e devem ser adicionadas ao concentrado de magnetita em quantidades de > 2%. Na Turquia, a adição de aproximadamente 1% de bentonita de sódio é necessária para a pelletização de concentrados de minério de ferro fino. O uso de dosagens maiores requeridas neste estudo pode ser atribuído à qualidade das amostras de bentonita utilizadas. Portanto, o *upgraded* da bentonita como recebida foi realizada. O *upgraded* das bentonitas de Na resultou em dosagens menores até 0,7% para os padrões exigidos. As bentonitas mistas atendem aos padrões após a ativação. Quando a bentonita é ativada com 2% de soda, a quantidade necessária de bentonita na pelletização deve ser superior a 4%. Por outro lado, no caso de processo de ativação com 3% de soda, a quantidade de adição de bentonita deve ser reduzida para 3%. Da mesma forma, para o preparo das pelotas atendendo ao padrão de Ca-bentonita, a adição deve ser superior a 4%, desde que a ativação seja realizada com adição mínima de 3% de soda. Os resultados também mostraram que a quantidade de bentonita a ser utilizada nas pelotas está relacionada às capacidades de inchamento e CEC da bentonita. Portanto, dosagens mais altas de soda no processo de ativação resultam em menor adição de bentonita para a ligação (GUL et al., 2015).

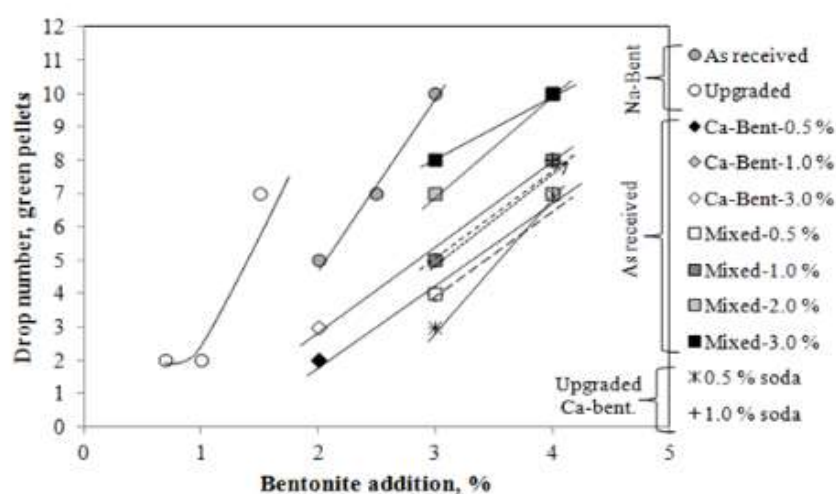


Figura 3.29: Número de queda de pelotas verdes com diferentes tipos de bentonita.

Fonte:(GUL et al., 2015).

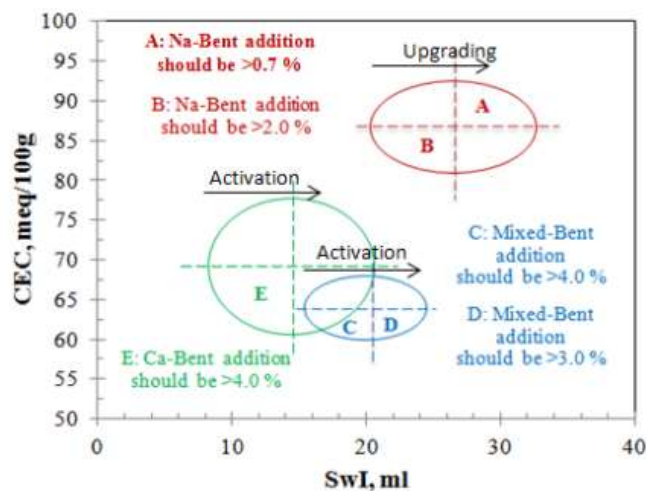


Figura 3.30: Exigência de bentonita em relação ao índice de dilatação e conclusões CEC.

Fonte:(GUL et al., 2015).

Em seu estudo, Liu, Xie e Qin (2017) fixa o teor de bentonita tipo A e tipo B em 1,5% nos experimentos 1 e 2. O teor de bentonita tipo B é fixado em 1,3% no experimento 3 e o teor de bentonita tipo B e bentonita tipo C é estabelecido em 1,0% nos experimentos 4 e 5.

Tabela 3.18: Efeito do tipo de bentonita nas características das pelotas cruas.

Experimento N°	Teor de Umidade%	Resistência à queda / N.pellet -1	Resistência à compressão/ N.pellet-1	Temperatura de choque / °C	Teor de Bentonita %	Peso de pelotas qualificadas (> 10 mm) / kg
1	7,28	2,53 ± 0,01	9,02 ± 0,02	550 ± 3	1,5 (A)	0,94
2	6,79	3,00 ± 0,02	9,76 ± 0,03	550 ± 2	1,5 (B)	1,43
3	6,64	2,60 ± 0,01	9,42 ± 0,02	550 ± 2	1,3 (B)	0,50
4	7,46	2,53 ± 0,02	8,23 ± 0,02	500 ± 3	1,0 (B)	0,67
5	7,13	2,07 ± 0,02	7,97 ± 0,02	500 ± 2	1,0 (C)	1,41

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

A Figura 3.31 mostra o efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência de queda da pelota verde. A resistência à queda dos três diferentes tipos de bentonitas diminui na seguinte ordem: tipo B > tipo C > tipo A (LIU; XIE; QIN, 2017).

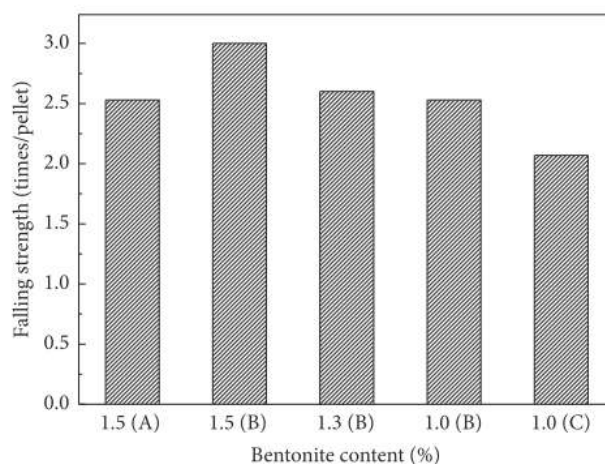


Figura 3.31: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência de queda da pelota.

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

A Figura 3.32 apresenta o efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência à compressão da pelota verde. A resistência à compressão dos três diferentes tipos de bentonitas diminui na seguinte ordem: tipo B > tipo C > tipo A (LIU; XIE; QIN, 2017).

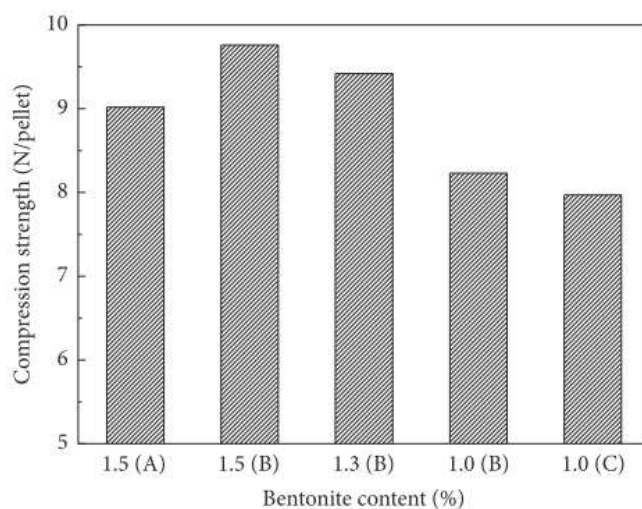


Figura 3.32: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na resistência à compressão da pelota.

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

A Figura 3.33 mostra que quando os conteúdos de bentonita são 1,5% e 1,3%, a temperatura de choque da pelota é 823 K, em comparação com a temperatura de choque de 773 K da pelota com 1,0% de bentonita adicionada. A pelota explode durante o processo de secagem porque a umidade é transferida para áreas mal estruturadas da pelota, o que aumenta a pressão interna. A pelota explode quando a pressão interna excede a resistência à tração da pelota. Dado que a bentonita tem uma maior capacidade de absorção de água, as camadas de cristal da bentonita podem absorver a umidade com firmeza na superfície da montmorilonita devido ao

efeito do campo de força negativo. Portanto, a água livre não evapora e transfere facilmente. Durante o processo de secagem e evaporação, a propriedade de absorção de água da bentonita retarda a evaporação da água da pelota. Assim, a umidade é liberada lentamente da pelota, o que reduz a pressão interna do vapor e aumenta a temperatura de choque. Portanto, o aumento do teor de bentonita aumenta a temperatura de choque da pelota (LIU; XIE; QIN, 2017).

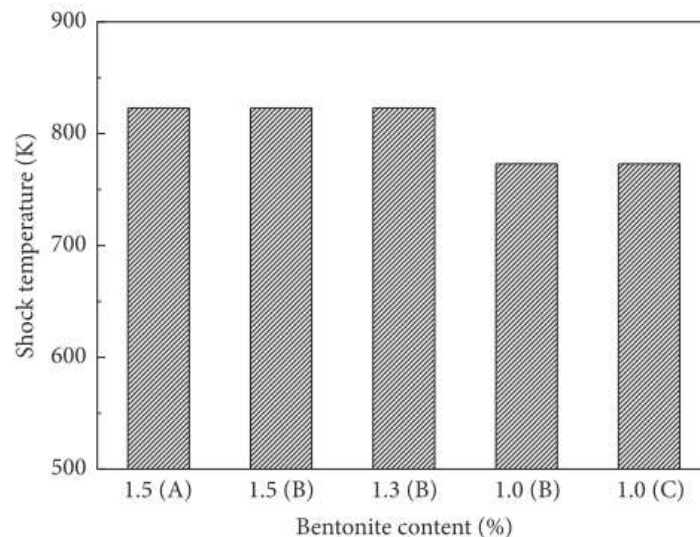


Figura 3.33: Efeito de diferentes tipos e proporções de bentonita na temperatura de choque da pelota.

Fonte: (LIU; XIE; QIN, 2017).

Os resultados indicam que a qualidade dos três diferentes tipos de bentonitas diminuem na seguinte ordem: tipo B > tipo C > tipo A. Portanto, em um conteúdo constante de bentonitas heterogêneas, a resistência à queda e à compressão dependem da qualidade da bentonita porque as partículas de bentonita são finas com uma área superficial específica de $100 \text{ m}^2 / \text{g}$. Portanto, a propriedade de dispersão da bentonita não é apenas aceitável, mas suas propriedades de absorção e expansão de água também permitem que as partículas finas sejam preenchidas e absorvidas entre as partículas de minério. A natureza da superfície do minério muda de acordo para formar micro capilares quando uma ponte sólida e uma ponte líquida são adicionadas. Quando a força capilar aumenta, a resistência à compressão da pelota verde também melhora. O conteúdo de montmorilonita determina as propriedades físico-químicas da bentonita e a montmorilonita se organiza em camadas estruturadas de silicato de alumínio aquoso com propriedade de expansão. A bentonita começa a inchar ao absorver água. Sob tensão de cisalhamento mecânico, a bentonita inchada pode melhorar o deslizamento relativo entre as partículas de minério por meio de deformação plástica. Portanto, a pelota não se quebra facilmente e a resistência à queda da pelota crua é aumentada (LIU; XIE; QIN, 2017).

Foi investigada a influência do tipo e proporção de bentonita na resistência à queda, resistência à compressão e temperatura de choque de pelotas verdes adicionando bentonita de diferentes tipos e proporções aos concentrados de ferro. As seguintes conclusões foram feitas (LIU; XIE; QIN, 2017):

- O teor de montmorilonita está diretamente relacionado com o grau de inchamento, absorção de água e absorção de azul de metileno pela bentonita. O grau de inchamento, absorção de água e absorção de azul de metileno aumentam conforme o teor de montmorilonita aumenta. Essas características indicam a boa qualidade da bentonita.
- A adição de bentonita melhora a resistência da pelota verde. A resistência à queda e à compressão da pelota verde aumenta à medida que o teor de bentonita aumenta. Para bentonitas homogêneas, a resistência da pelota verde aumenta conforme o teor de bentonita aumenta. Para bentonitas heterogêneas, a resistência da pelota verde depende da qualidade da bentonita com um teor de bentonita constante.
- A adição de uma proporção maior de bentonita de alta qualidade aos concentrados de ferro aumenta a resistência à temperatura de ruptura da pelota verde.

QIANG et al. (2016) analisaram a relação entre a viscosidade plástica e resistência da pelota verde. O elo entre a viscosidade plástica da bentonita e a resistência da pelota verde é mostrada na Figura 3.34. Exceto para o solo Shengquan, a viscosidade plástica da bentonita tem a mesma lei de mudança que a resistência à queda da pelota verde; enquanto a viscosidade plástica da bentonita não tem a mesma lei de mudança que a resistência à compressão da pelota verde. Além da argila Shengquan, a viscosidade plástica de nove tipos de bentonita mostra que a viscosidade plástica da bentonita é grande, e a pelota verde obtida com o uso de pelotas de bentonita tem alta resistência à queda; caso contrário, a resistência à queda da pelota verde é baixa. Pode-se ver que quanto maior a viscosidade plástica da bentonita, maior a resistência à queda das pelotas verdes obtidas usando as pelotas de bentonita e as viscosidades plásticas de diferentes bentonitas podem ser medidas para avaliar lateralmente sua capacidade de pelletização para concentrados de ferro (QIANG et al., 2016).

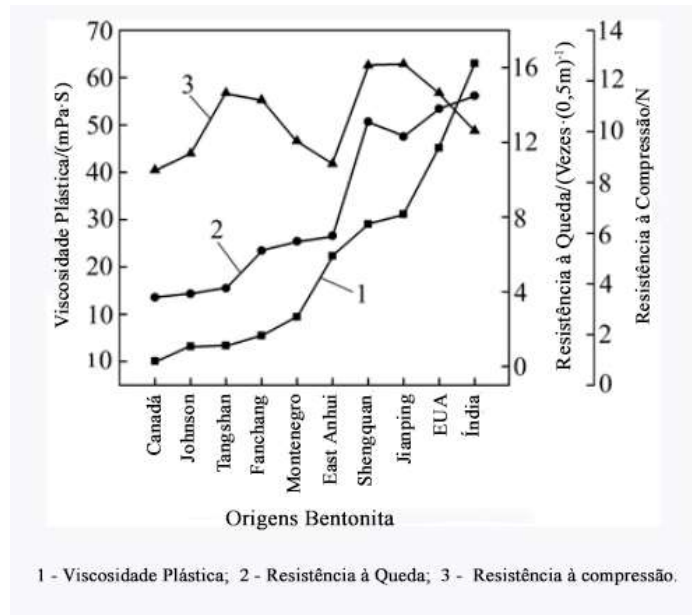
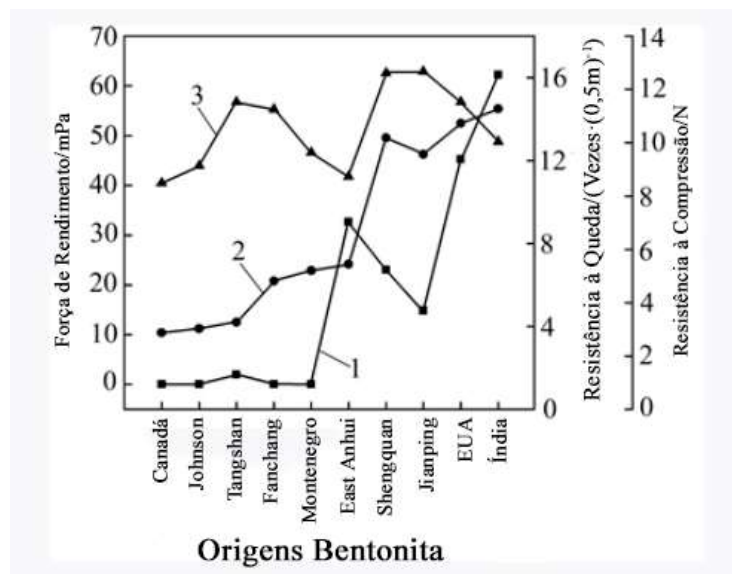


Figura 3.34: Relações entre a viscosidade plástica e a resistência da pelota verde.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

QIANG et al. (2016) também estudaram a relação entre limite de escoamento e resistência da pelota verde. Usaram um concentrado de ferro para garantir que o teor de água da pelota verde seja de cerca de 9,5% e a fração de massa da bentonita seja 2,5%. A relação entre o limite de escoamento da bentonita e a força da pelota verde é mostrada na Figura 3.35. Pode-se ver na Figura 3.35 que a resistência ao escoamento da bentonita e a resistência à compressão das pelotas verdes não têm a mesma lei de mudança. Excluindo solo de Fanchang, solo de Heishan e solo de Wandong, a resistência ao escoamento e a resistência da pelota verde da bentonita têm a lei de que quanto maior a resistência ao escoamento, melhor a resistência à queda da pelota verde; mas em comparação com a viscosidade plástica, a relação correspondente entre a resistência ao escoamento e a resistência à queda da pelota verde não é óbvio (QIANG et al., 2016).

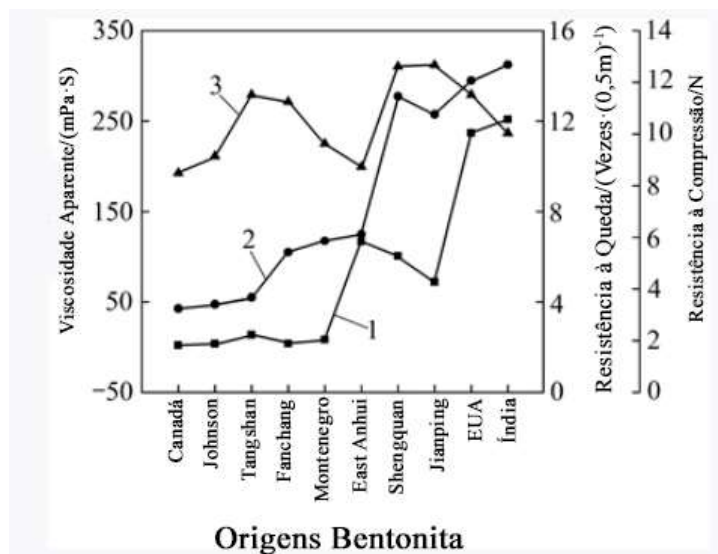


1 - Força de Rendimento; 2 - Resistência à Queda; 3 - Resistência à compressão.

Figura 3.35: A relação entre limite de escoamento e a resistência da pelota verde.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

A relação entre a viscosidade aparente e a resistência da pelota verde, também foi averiguada também por QIANG et al. (2016). Usaram o concentrado de ferro e certificaram-se de que a fração de massa de água da pelota verde é de cerca de 9,5% e a fração de massa de bentonita é de 2,5%. A relação entre a viscosidade aparente da bentonita e a resistência da pelota verde é mostrada na Figura 3.36. Pode-se ver na Figura 3.36 que a viscosidade aparente da bentonita e a resistência à compressão das pelotas verdes não têm a mesma lei de mudança. Independentemente do solo de Fanchang, solo de Heishan e solo de East Anhui, quanto maior a viscosidade aparente da bentonita, maior a resistência à queda da pelota verde, que tem a mesma lei que a resistência ao escoamento; mas em comparação com a viscosidade plástica, a viscosidade aparente está entre a resistência à queda da pelota verde. A relação correspondente não é óbvia. Em suma, as propriedades reológicas da bentonita não têm nenhuma relação óbvia com a resistência à compressão das pelotas verdes, mas há uma certa conexão com a resistência à queda das pelotas verdes. Em particular, a viscosidade plástica da bentonita tem uma relação óbvia de correspondência com a resistência à queda das pelotas verdes. Quanto maior a viscosidade plástica da bentonita, maior a resistência à queda das pelotas verdes feitas do solo (QIANG et al., 2016).



1 - Viscosidade Aparente; 2 - Resistência à Queda; 3 - Resistência à compressão.

Figura 3.36: relação entre a viscosidade aparente e a resistência da pelota verde.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

QIANG et al. (2016) também observaram o efeito das espécies catiônicas nas propriedades reológicas da bentonita. A influência de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ e K^+ nas propriedades reológicas da bentonita é mostrada na Figura 3.37, e as propriedades reológicas da bentonita com diferentes cátions são mostradas na Figura 3.38 (QIANG et al., 2016).

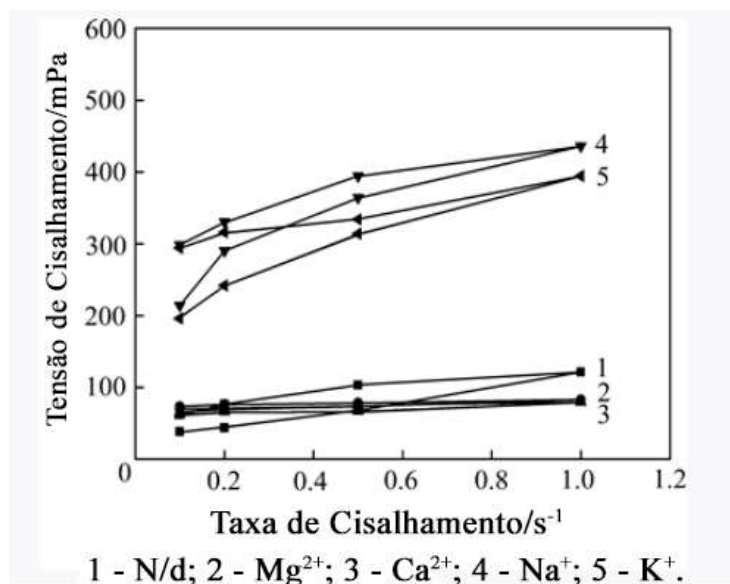


Figura 3.37: O efeito das espécies de cátions nas propriedades reológicas da bentonita.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

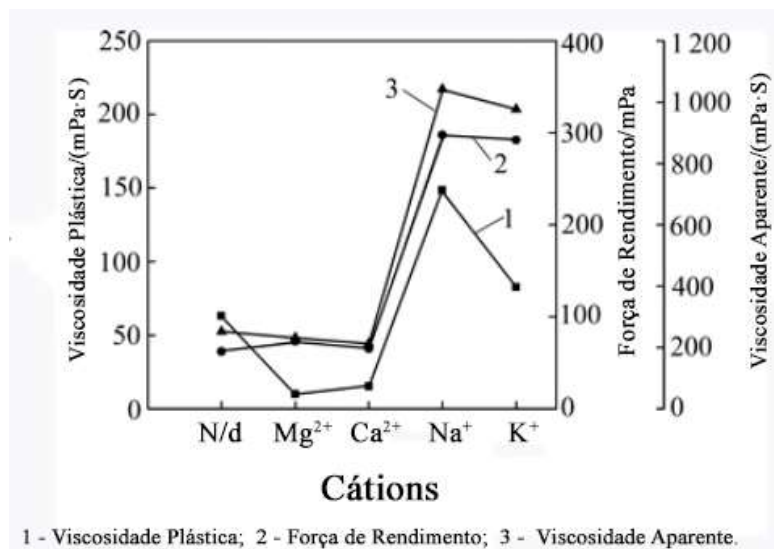


Figura 3.38: Parâmetros reológicos de bentonita com diferentes cátions.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

Pode-se observar na Figura 3.37 que na mesma taxa de cisalhamento, Na⁺ e K⁺ aumentam significativamente a tensão de cisalhamento da bentonita, enquanto Mg²⁺ e Ca²⁺ têm pouco efeito sobre a tensão de cisalhamento da bentonita. Mg²⁺ e Ca²⁺ reduzem significativamente a tixotropia da bentonita, fazendo com que a tensão de cisalhamento da suspensão de bentonita não aumente com o aumento da taxa de cisalhamento (QIANG et al., 2016).

Pode ser visto na Figura 3.38 que Mg²⁺ e Ca²⁺ reduzem a viscosidade plástica da bentonita, e a resistência ao escoamento e a viscosidade aparente da bentonita são ligeiramente reduzidas; enquanto Na⁺ e K⁺ aumentam significativamente a viscosidade plástica, resistência ao escoamento e viscosidade aparente da bentonita. O principal componente da bentonita é a montmorilonita. Como o Si⁴⁺ e o Al³⁺ na rede da montmorilonita são isomorficamente substituídos por cátions de baixa valência, um grande número de cargas negativas residuais aparecem na camada de cristal unitário e Na⁺ e K⁺ de baixo custo pode ser adsorvido por cargas negativas para garantir o equilíbrio de carga da rede de cristal de montmorilonita e estabilizar a estrutura da superfície do cristal de montmorilonita. Os relativamente caros Mg²⁺ e Ca²⁺ não apenas adsorvem as cargas negativas restantes, mas também adsorvem as cargas negativas na estrutura do cristal, destruindo a estrutura do cristal da montmorilonita e tornando a estrutura da superfície do cristal instável (QIANG et al., 2016).

Além disso, em comparação com o K⁺, o Na⁺ aumenta a viscosidade plástica da bentonita de forma mais significativa. De acordo com a relação entre a viscosidade plástica e a

qualidade da pelota verde, pode-se considerar que o Na^+ pode melhorar significativamente as propriedades reológicas da bentonita, melhorar o desempenho de pelotização da bentonita e, então, aumentar a resistência da pelota verde. Isso também explica a razão pela qual a modificação do sódio da bentonita pode melhorar seu desempenho de pelotização do ponto de vista das propriedades reológicas da bentonita (QIANG et al., 2016).

QIANG et al. (2016) também averiguaram A influência dos ânions na reologia da bentonita. Os quatro ânions nas propriedades reológicas da bentonita são mostrados na Figura 3.39, parâmetros reológicos característicos de diferentes ânions bentonita Figura 3.40 (QIANG et al., 2016).

Pode-se ver na Figura 3.39 e na Figura 3.40 que, na mesma taxa de cisalhamento, a tensão de cisalhamento da bentonita com íons é maior do que a da bentonita sem íons; ao mesmo tempo, a viscosidade plástica, a resistência ao escoamento e a viscosidade aparente da bentonita com íons são todas superiores. O íon não adicionado é grande, o que é causado principalmente pelo Na^+ Comparado com Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e HCO_3^- os quatro ânions, Cl^- para garantir que a viscosidade da bentonita tenha uma maior ductilidade, resistência ao escoamento e a viscosidade aparente; CO_3^{2-} viscosidade plástica da bentonita, Tanto o limite de elasticidade quanto a viscosidade aparente são reduzidos; enquanto na presença de Na^+ , a viscosidade plástica, o limite de elasticidade e a viscosidade aparente da bentonita adicionada com SO_4^{2-} ou HCO_3^- tendem a ser quase iguais aos da bentonita pura. Em resumo, a adição de ânions aumentará ainda mais a carga negativa da camada de cristal unitária da montmorilonita, tornando a estrutura da face do cristal mais instável e tornará as propriedades reológicas da bentonita piores (QIANG et al., 2016).

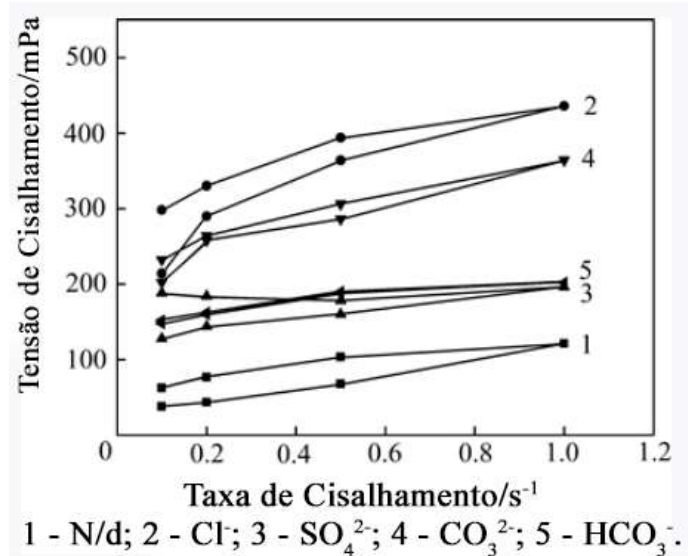


Figura 3.39: O efeito das espécies de ânions nas propriedades reológicas da bentonita.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

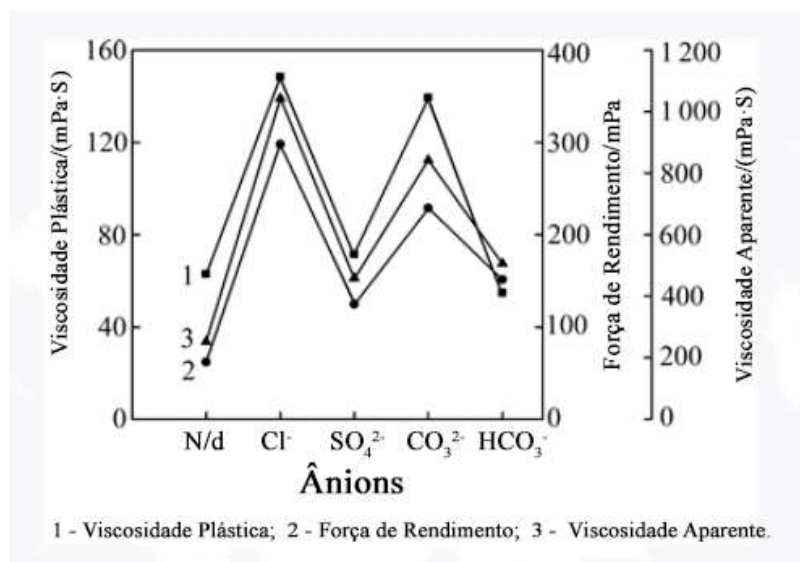


Figura 3.40: Parâmetros reológicos de bentonita com diferentes ânions.

Fonte: (QIANG et al., 2016).

Na produção de pelotas de minério de ferro, a bentonita absorve água para formar uma suspensão de alta concentração, que pertence ao fluido Bingham. De acordo com a fluídica Bingham, medindo a tensão de cisalhamento da suspensão de bentonita em diferentes taxas de cisalhamento, a viscosidade plástica, o limite de elasticidade e a viscosidade aparente da bentonita podem ser calculados para caracterizar as propriedades reológicas da bentonita (QIANG et al., 2016).

As propriedades reológicas da bentonita combinam bem com a resistência verde. Quanto maior a viscosidade plástica da bentonita, maior será a resistência à queda das pelotas

verdes obtidas pela pelotização da bentonita; no entanto, a resistência ao escoamento e a viscosidade aparente da bentonita não têm relação óbvia com a resistência da pelota verde (QIANG et al., 2016).

Os íons têm uma grande influência nas propriedades reológicas da bentonita. O K^+ , especialmente o Na^+ , aumentou significativamente a viscosidade plástica da bentonita e melhorou as propriedades reológicas dela, enquanto o Mg^{2+} e o Ca^{2+} reduziram a viscosidade plástica da bentonita. Cl^- pode garantir que a bentonita tenha boas propriedades reológicas, CO_3^{2-} piora as propriedades reológicas da bentonita e SO_4^{2-} e HCO_3^- reduzem significativamente as propriedades reológicas da bentonita (QIANG et al., 2016).

3.9 A influência da bentonita em diversas proporções e qualidade nas características da pelota queimada

Dwarapudi (2010) investigaram o comportamento de inchamento das pelotas de minério de ferro com piroxênio e demonstraram que o FSI foi alto devido à formação de escória faialítica de baixo ponto de fusão comparado com as pelotas com piroxênio que apresentou menor FSI devido a formação de escória de alto ponto de fusão, que dá força de ligação suficiente para suportar as tensões de redução.

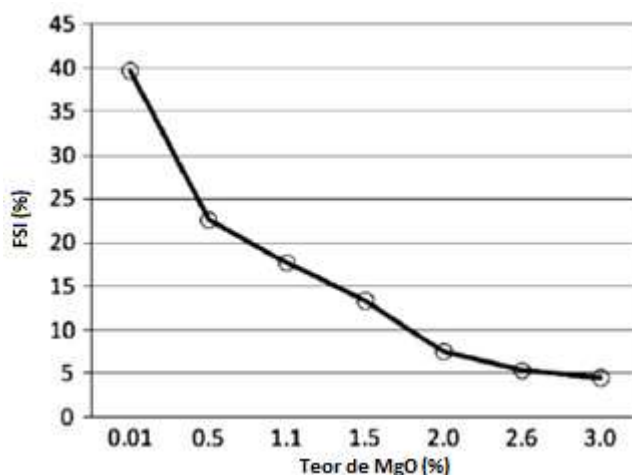


Figura 3.41: Efeito do teor de MgO no FSI de pelotas queimadas.

Fonte: (DWARAPUDI, 2010).

Zhu (2013) analisaram a influência da basicidade e teor de MgO no comportamento de inchamento e comprovaram que durante a faixa de 0,20 a 0,80 de basicidade ocorreu um inchamento anormal das pelotas (superior a 20%), sendo que na faixa de 0,40 a 0,60, formou-se escória de baixo ponto de fusão e por isso o FSI foi mais alto. Segundo os autores adição de

MgO reduziu o FSI devido a formação de escória de alto ponto de fusão que tem resistência suficiente para suportar os esforços durante a redução.

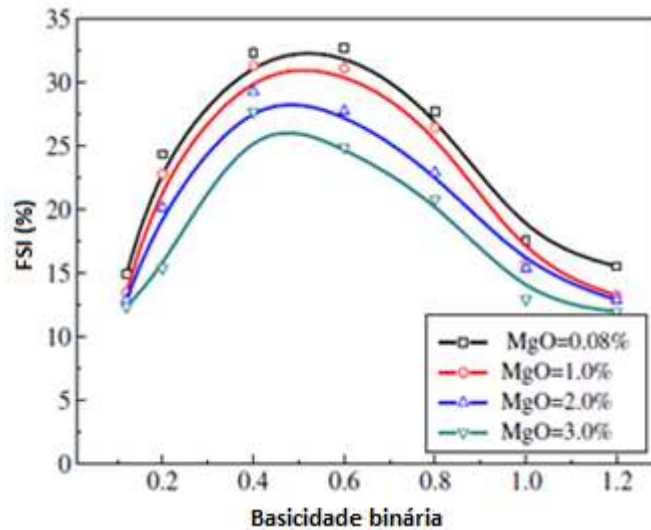


Figura 3.42: Efeitos da basicidade e teor de MgO no FSI de pelotas especularíticas.

Fonte: (ZHU, 2013)

Devemos destacar a importância de se realizar testes de RI, RDI, FSI, picnometria a hélio e resistência a compressão porque são variáveis que tem uma grande influência na produtividade do AF.

Resistência à compressão: “O ensaio de resistência à compressão torna possível a avaliação da integridade física das pelotas nas etapas de manuseio, isto é, estocagem e transporte” (BAYÃO, 2014).

Este ensaio tem como objetivo avaliar a resistência à compressão das pelotas queimadas de minério de ferro. O ensaio é destrutivo e tem seu valor representado pela média aritmética dos valores individuais obtidos de cada pelota em kgf/pelota. Para a determinação da resistência à compressão das pelotas, utiliza-se a norma internacional ISO 4700 (BAYÃO, 2014).

Para realizar o ensaio de resistência a compressão primeiramente deve-se fazer um peneiramento da pelota queimada na faixa granulométrica entre 9,5mm a 12,5mm, e posteriormente se escolhe aleatoriamente 10 pelotas. É comum a utilização da máquina de resistência compressão da marca BREMEN (Figura 3.44), para onde as pelotas devem ser levadas. Elas então, são individualmente colocadas entre duas placas paralelas e submetidas à ação de uma força compressiva uniaxial (Figura 3.43) a uma velocidade específica (10 a 20 mm/min), até a ruptura da mesma (BAYÃO, 2014).

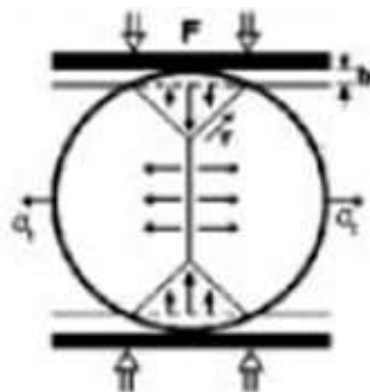


Figura 3.43: Conceito de força (F) compressiva uniaxial para esferas.

Fonte: (BAYÃO, 2014).



Figura 3.44: Máquina utilizada para determinação da resistência a compressão.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

Considera-se uma pelota que tenha uma boa resistência a compressão quando os resultados são maiores ou iguais a 300 kgf/pelota (BAYÃO, 2014).

Índice de Redução – Reduction Index (RI): O ensaio torna possível a avaliação da extensão na qual o oxigênio pode ser removido de minérios de ferro quando reduzidos sob condições semelhantes aquelas que prevalecem na zona de redução de um AF. Este ensaio tem como objetivo a avaliar o índice de redutibilidade das pelotas queimadas de minério de ferro. O ensaio tem seu valor representado como uma porcentagem em massa (BAYÃO, 2014).

Para a determinação do Índice de Redutibilidade (RI) utiliza-se a norma internacional ISO 7215. Para realização dos ensaios é utilizado um forno da marca FORTLAB modelo FTRED-1000/CLP com 9000W, 220V-trifásico e com 3 zonas de aquecimento (Figura 3.45)

equipado com uma balança que permita que a perda em massa da porção de ensaio seja lida a qualquer momento durante o ensaio, uma retorta de redução e um sistema para fornecimento de gases e regulagem das vazões. As pelotas queimadas tem de ser peneiradas na faixa granulométrica de 9,5mm a 12,5mm. Dessa faixa granulométrica é pesado 500g de cada uma das amostras estudadas, onde cada amostra tem de ser colocada dentro da retorta de redução para avaliar a facilidade que a pelota possui de perder seu oxigênio para os gases redutores (BAYÃO, 2014).

A porção de ensaio é reduzida isotermicamente em um leito fixo, a 900°C, utilizando um gás redutor constituído por 30% de CO e 70 % de N₂, por 180 min. O grau de redução final (R₁₈₀) foi calculado a partir da perda em massa de oxigênio após 180min de acordo com a Equação 3.2:

$$R_{180} = \frac{m_1 - m_2}{m_0(0,430w_2 - 0,111w_1)} \times 10^4 \quad (3.2)$$

Onde:

m₀ é a massa da porção de ensaio, em gramas;

m₁ é a massa da porção de ensaio imediatamente antes do início da redução, em gramas;

m₂ é a massa da porção de ensaio após 180 min de redução, em gramas;

w₁ é o teor de óxido de ferro (II), como uma percentagem em massa, da porção de ensaio antes do ensaio, determinado de acordo com a ABNT NBR ISO 9035, calculado a partir do teor de ferro (II) pela sua multiplicando pelo fator de conversão de óxido FeO/Fe(II) = 1,286;

w₂ é o teor de ferro total, como uma percentagem em massa, da porção de ensaio antes do ensaio, determinado de acordo com a ISO 2597-1 ou ABNT NBR ISO 9507.

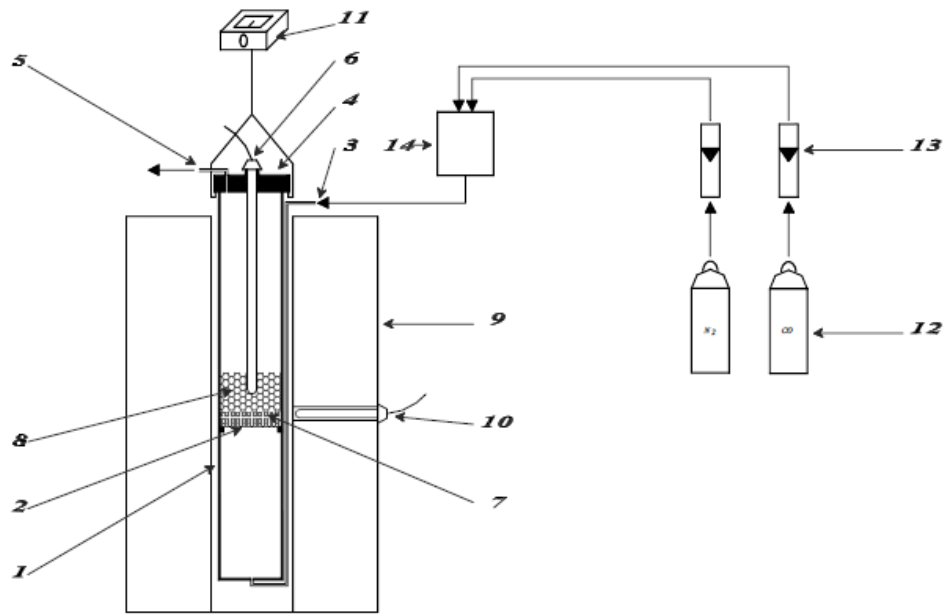


Figura 3.45: Diagrama esquemático da aparelhagem utilizada no teste de RI.

Fonte: (ISO 2597-1).

Retorta de redução

- 1 - Retorta de redução
- 2 - Placa perfurada
- 3 - Entrada de gás
- 4 - Tampa
- 5 - Saída de gás
- 6 - Termopar para medir a temperatura de redução
- 7 - Camada de bola de porcelana
- 8 - Porção teste

Forno

- 9 - Forno com aquecimento elétrico
- 10 - Termopar para a regulação da temperatura do forno

11 - Balança

Sistema de abastecimento de gás

- 12 - Cilindros de gás
- 13 - Medidores de vazão de gás
- 14 - Recipiente de mistura

Pode-se considerar o RI de referência para pelotas de AF maior que 60%.

Índice de Desintegração sob Redução – Reduction Disintegration Index (RDI): O ensaio torna possível a avaliação da quantidade de finos gerados durante a primeira reação de redução (hematita para magnetita) do minério de ferro que acontece por volta de 400°C.

Este ensaio tem como objetivo avaliar o tamanho do grau da degradação da pelota de minério de ferro, quando reduzido em condições semelhantes às existentes na zona de redução a baixa temperatura de um AF (BAYÃO, 2014).

Para a determinação do Índice de Degradação sob Redução (RDI) utiliza-se a norma internacional ISO 4996-2. Os equipamentos que são utilizados para os ensaios são: um forno da marca FORTLAB modelo FTRED-1000/CLP com 9000W, 220V-trifásico e com 3 zonas de aquecimento (Figura 3.46), possuindo uma retorta de redução e um sistema para fornecimento de gases e regulação das vazões, um tambor acoplado num equipamento de rotação (Figura 3.46), uma peneira com abertura de 2,8mm (Figura 3.48) e uma balança de precisão (BAYÃO, 2014).

As pelotas queimadas são peneiradas na faixa granulométrica de 9,5 a 12,5mm. Dessa faixa granulométrica é pesado 500g das amostras obtidas para o ensaio. A porção teste é isotermicamente reduzida em um leito fixo, a 550 ° C, utilizando um gás redutor consistindo de 30% de CO e 70% de N₂, durante 30 min. Em seguida, a amostra é tamborada (900 revoluções) no tambor específico e em seguida peneirada em uma peneira tendo abertura de 2,8mm. O índice de desintegração sob redução (RDI) é então calculado como percentagem em massa de material >2,8mm, utilizando a Equação 3.3 (BAYÃO, 2014):

$$RDI - 2_{-2,8} = 100 - \frac{m_1}{m_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

m₀ é a massa, em gramas, da porção teste após a redução e antes do tamboramento;

m₁ é a massa, em gramas, da fração retida na peneira de 2,8 mm de abertura.

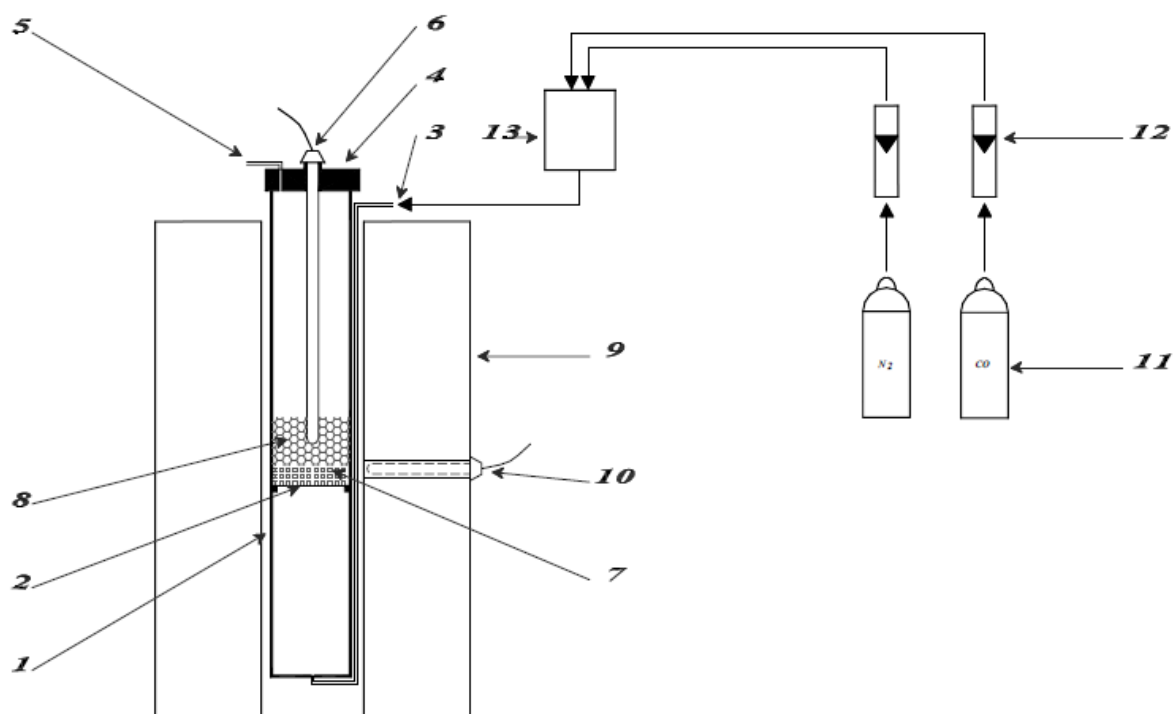


Figura 3.46: Diagrama esquemático da aparelhagem utilizada no teste de RDI.
Fonte: (ISO 4996-2).

Retorta de redução

- 1 - Parede da retorta de redução
- 2 - Placa perfurada
- 3 - Entrada de gás
- 4 - Tampa
- 5 - Saída de gás
- 6 - Termopar para medir a temperatura de redução
- 7 - Camada de bola de porcelana
- 8 - Porção teste

Forno

- 9 - Forno com aquecimento elétrico
- 10 - Termopar para a regulagem da temperatura do forno

Sistema de abastecimento de gás

- 11 - Cilindros de gás
- 12 - Medidores de vazão de gás
- 13 - Recipiente de mistura



Figura 3.47: Tambor acoplado ao equipamento de rotação utilizado para o teste de RDI.

Fonte: (BAYÃO, 2014).



Figura 3.48: Peneira com abertura de 2,8mm utilizada no teste de RDI.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

Pode-se considerar o RDI de referência para pelotas de AF menor que 14%.

Índice de Inchamento Livre – *Free Swelling Index (FSI)*: O ensaio torna possível a avaliação da susceptibilidade ao inchamento das pelotas de minério de ferro durante o processo de redução (BAYÃO, 2014).

Este ensaio tem como objetivo avaliar o aumento do volume de pelotas de minério de ferro quando reduzidas em um leito sem aplicação de pressão mecânica, sob condições semelhantes aquelas que prevalecem na zona de redução do AF (BAYÃO, 2014).

Para a determinação do Índice de Inchamento Livre (FSI) utiliza-se da norma internacional ISO 4698. Os equipamentos utilizados para os ensaios são: um forno da marca FORTLAB modelo FTRED-1000/CLP com 9000W, 220V-trifásico e com 3 zonas de aquecimento (Figura 3.49), possuindo uma retorta de redução e um sistema para fornecimento de gases e regulagem das vazões, um suporte da porção de ensaio (Figura 3.50) e uma balança hidrostática para a medida de volume (Figura 3.51) (BAYÃO, 2014).



Figura 3.49: Forno utilizado nos testes de RI, RDI e FSI.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

Foi separado uma porção composta por 18 pelotas queimadas na faixa granulométrica entre 9,5 a 12,5mm de cada uma das 34 amostras estudadas nesse trabalho e então foram colocadas 6 pelotas de cada uma das 34 amostras em cada um dos três níveis do suporte do ensaio para realização do teste.



Figura 3.50: Suporte para pelotas usado no ensaio de FSI.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

O volume das pelotas da porção do ensaio foi medido à temperatura ambiente utilizando o método de imersão em água, que tem como princípio a determinação do volume aparente antes da redução (V_0) a partir das diferenças de massas obtidas no ar e na água após encharcar com água os poros abertos das pelotas usando uma balança hidrostática para medida de volume.



Figura 3.51: Balança hidrostática.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

A porção de ensaio é então reduzida isotermicamente a 900°C, em leito fixo, usando um gás redutor composto por 30% de CO e 70% de N₂, por 60min. Em seguida tem de ser determinado pelo método de imersão em água o volume aparente depois da redução (V_1). O índice de inchamento livre (V_{FS}) é calculado como a diferença entre o volume das pelotas depois e antes da redução, expresso como uma porcentagem. De acordo com a Equação 3.4:

$$V_{FS} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

V_0 é o volume da porção de ensaio antes da redução, em mililitros;

V_1 é o volume da porção de ensaio após a redução, em mililitros;



Figura 3.52: Pelotas antes do ensaio de FSI.

Fonte: (BAYÃO, 2014).



Figura 3.53: Pelotas após o ensaio de FSI.

Fonte: (BAYÃO, 2014)

Pode-se considerar o FSI de referência para pelotas de AF menor que 16%.

Picnometria a hélio: Este ensaio tem como objetivo avaliar a densidade real das pelotas de minério de ferro. Para a determinação da porosidade das pelotas de minério de ferro é utilizada uma norma interna do Laboratório de aglomeração e redutibilidade do DEPEC. Os equipamentos utilizados para os ensaios são: um picnômetro a hélio (Multipycnometer) da marca QUANTACHROME INSTRUMENTS (Figura 3.54), possuindo três células de diferentes tamanhos, esferas para calibração do aparelho e gás hélio (BAYÃO, 2014).



Figura 3.54: Picnômetro a hélio.

Fonte: (BAYÃO, 2014).

Para a realização do ensaio, separa-se uma certa massa (aproximadamente 4 pelotas) de cada uma das amostras estudadas, compreendendo aproximadamente o volume de $2/3$ da célula *small* do picnômetro a hélio. A densidade real das pelotas é então determinada medindo a diferença de pressão quando uma quantidade conhecida de gás hélio sob pressão é deixada escoar de um volume de referência exatamente conhecido para uma célula que contém o peso conhecido das 4 pelotas.

O volume medido (V_m) é encontrado a partir da Equação 3.5:

$$V_m = V_c - V_r * \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Onde:

V_c é o volume da célula

V_r é o volume de referência

P_1 e P_2 são as pressões medidas pelo picnômetro a hélio.

A densidade real é obtida a partir da Equação 3.6:

$$d_r = \frac{m_r}{Vm} \quad (3.6)$$

d_r é a densidade real

m_r é a massa da amostra

Vm é a volume medido

A densidade aparente é obtida a partir da Equação 3.7:

$$d_{ap} = \frac{m_{ap}}{V_{ap}} \quad (3.7)$$

Onde:

d_{ap} é a densidade aparente

m_{ap} é a massa da porção de ensaio no ensaio de FSI

V_{ap} é o volume aparente da porção de ensaio antes da redução no teste de FSI

A porosidade é obtida através da Equação 3.8:

$$Porosidade = \frac{d_r - d_{ap}}{d_r} \times 100 \quad (3.8)$$

Onde:

d_r é a densidade real obtida da Equação 6.6

d_{ap} é a densidade aparente obtida da Equação 6.7

A porosidade, depende de vários fatores tais como basicidade, porcentagem de antracito, tipo de minério, etc e como valor de referência, pode variar entre 25 a 30%.

3.10 A influência dos testes que representam o comportamento da pelota obtida no alto forno

Para fornecer o minério de ferro para as siderúrgicas as mineradoras têm de atender uma série de especificações de qualidade das matérias primas (qualidades químicas, físicas e metalúrgicas) a serem utilizadas na siderurgia (CEFETES, 2011).

Para pelotas, sínters e granulados as rotas mais utilizadas para a produção de aço são duas, conforme a Figura 3.55:

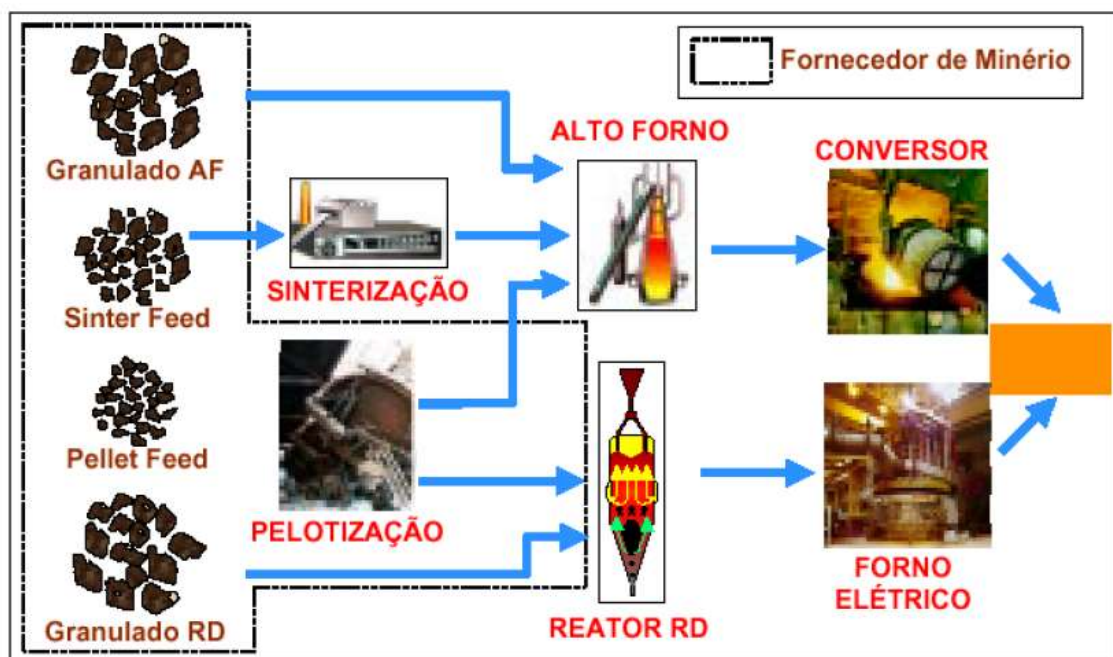


Figura 3.55: Fluxograma do minério de ferro na indústria siderúrgica.

Fonte: (CEFETES, 2011).

O alto forno pode ser carregado com os três tipos de minério de ferro: o minério granulado (natural) e os outros dois (sínter e pelota) produzidos a partir de processos de aglomeração. O minério granulado é natural, proveniente da indústria mineradora e deve possuir uma faixa granulométrica ($> 6\text{mm}$) antes de ir para o reator de redução. A pelota também é proveniente da indústria mineradora e é produzida a partir do *pellet feed* que possui uma faixa granulométrica ($<0,15\text{ mm}$) e passa por um processo de aglomeração chamado pelotização para possuir boas características físicas, químicas, metalúrgicas e granulometria adequada ($> 5\text{mm} < 18\text{mm}$) antes de ir para o reator de redução. O sínter é proveniente da própria siderúrgica e é produzida a partir do *sinter feed* que possui uma faixa granulométrica ($> 0,6\text{ mm} < 0,15\text{ mm}$) e passa por um processo de aglomeração chamado sinterização para possuir

boas características físicas, químicas, metalúrgicas e granulometria adequada ($> 5\text{mm} < 50\text{mm}$) antes de ir para o reator de redução. Sendo assim a qualidade do aglomerado de minério de ferro desempenha um papel vital no consumo do agente redutor e na produtividade do AF e reator de redução direta. Na maior parte das siderúrgicas integradas, a mistura de carga para alto forno é decidida conforme a disponibilidade de minério granulado, sinter e pelotas. Recentemente têm-se dado maior atenção para o uso de pelotas em alto forno, devido a sua boa resistência e redutibilidade, e características de amolecimento e fusão e inchamento (CEFETES, 2011).

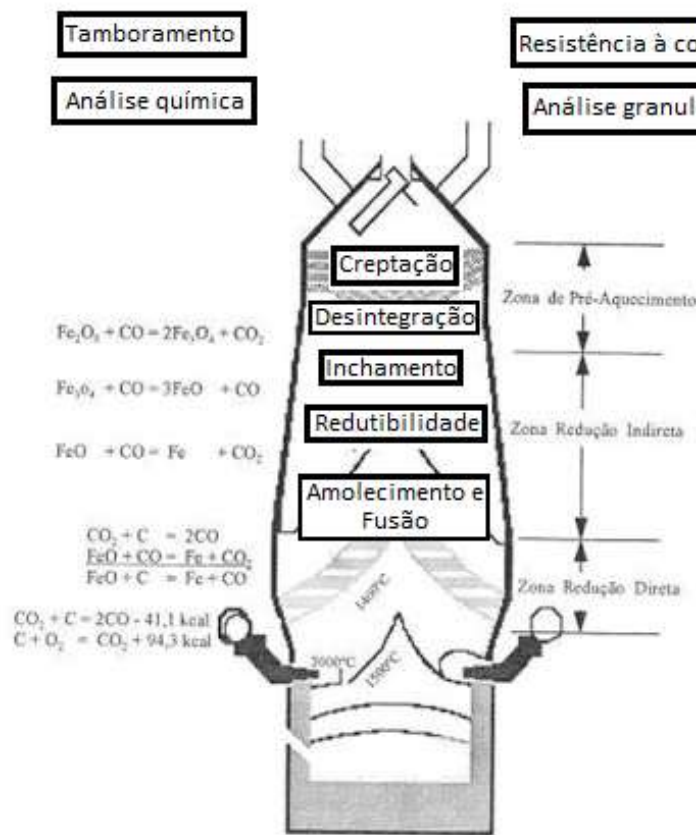


Figura 3.56: Zonas do AF onde as propriedades das pelotas são colocadas a prova.

Fonte: (CEFETES, 2011).

A qualidade das pelotas de minério de ferro é avaliada com base nos seguintes índices: composição química, resistência à compressão, granulometria, resistência ao impacto e à abrasão, susceptibilidade à desintegração (RDI, LTD), redutibilidade (RI), inchamento (FSI), porosidade etc. (CEFETES, 2011).

Na Tabela 3.19 é mostrado as principais propriedades das pelotas queimadas para alto forno.

Tabela 3.19: Principais propriedades das pelotas queimadas para alto forno.

Propriedades	Pelota de Alto Forno
RI Redutibilidade % de redução	..> 60 %
RDI 5 < 2,80 mm	< 14 %
FSI Inchamento T > 6,30mm	< 16 %
Resistencia a compressão	. .> e . igual a 300 Kgf/pelota
Indice de Tamboramneto TI .> que 6,30 mm	.> 95 %
Abrasão AI <0,50 mm	. < 5 %
Porosidade	<32%.

Fonte: (SOLÉ, et. Al, 2014).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de revisão bibliográfica foi de grande importância para a contextualização atual da bentonita no cenário nacional e mundial. Observou-se os avanços científicos dos diversos tipos de bentonitas e suas atuais aplicações, concluindo que:

A bentonita é o principal aglomerante utilizado no processo de pelotização nacional e internacional por ter propriedades exigidas para a obtenção de uma pelota crua de qualidade e por ter um menor custo que outros aglomerantes.

É compreendido também que diferentes bentonitas tem impacto direto no processo de pelotização e na qualidade da pelota obtida, onde existem diferentes qualidades e ofertas deste aglomerante no mundo. Diversos são os parâmetros que devem ser bem estudados para que se possa obter uma boa pelota, sendo assim, o controle da qualidade e proporção da adição do aglomerante é de extrema importância.

O controle das principais características da bentonita, como por exemplo: índice colóides, grau de inchamento, absorção de água, teor de montmorilonita, granulometria e algumas propriedades reológicas como viscosidade plástica, resistência ao escoamento e viscosidade aparente é de suma importância para a melhoria do processo, tendo impacto direto na produção das pelotas cruas e queimadas.

É necessário um controle sobre a adição da bentonita no processo de pelotização, uma vez que baixas ou elevadas quantias deste aglomerante podem ser benéficas ou maléficas para as qualidades das pelotas cruas ou queimadas, o que impacta na qualidade final. Desta forma, é desejada uma proporção ideal de adição do aglomerante e uma boa qualidade, os quais serão escolhidos a depender do tipo de minério de ferro usado no processo. Na escala industrial, geralmente se utiliza uma proporção de bentonita na faixa de 0,4 à 0,7% ; o seja 5 a 7 kg/t de mistura em massa na mistura.

As principais características que uma pelota crua deve conter para seu seguimento no processo são: resistência à compressão a úmido e a seco, umidade variando de 7 a 12% (dependendo das características do minério de ferro), número de queda, porosidade e que o controle da qualidade e proporção de bentonita tem impacto direto nessas características. É importante também destacar que o diâmetro da pelota crua em uma escala industrial varia em uma faixa de 9,5 a 16 mm.

As pelotas queimadas, uma vez que, as principais características de uma boa pelota são influenciadas diretamente pela quantidade e qualidade de bentonita empregada no processo de pelletização e por sua temperatura de queima (1300 a 1350°C) sendo as principais características das pelotas queimadas com seus respectivos valores de referência na indústria: resistência à compressão maior o igual a (300 kg/cm²), índice de redução (RI > 60%), índice de desintegração sob redução (RDI < 14%), índice de inchamento livre (FSI < 16%), índice de tamboramento (> 95 %) e abrasão (<5 %) e porosidade (<32%).

Portanto, uma pelota de qualidade que contém boas propriedades das que foram citadas acima, dentro de um padrão regular de processo, terá um excelente comportamento dentro do alto-forno, concebendo ganho em produtividade do reator. Pelotas com boa resistência a compressão ganham integridade física nas etapas de manuseio, isto é, estocagem e transporte. O RI tem como objetivo a avaliar o índice de redutibilidade das pelotas queimadas de minério de ferro, o RDI vem para avaliar o tamanho do grau da degradação da pelota de minério de ferro, quando reduzido em condições semelhantes às existentes na zona de redução a baixa temperatura de um AF. Já o FSI tem como objetivo avaliar o aumento do volume de pelotas de minério de ferro quando reduzidas em um leito sem aplicação de pressão mecânica, sob condições semelhantes aquelas que prevalecem na zona de redução do AF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4700:2018 Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 7p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4698:2008 Pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno - Determinação do índice de inchamento livre**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 18p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 7992:2020 Minérios de ferro como insumo para alto-forno — Determinação da redução sob pressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 13p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 7215:2018 Minérios de ferro como insumo para alto-forno - Determinação da redutibilidade pelo índice do grau de redução final**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4695:2018 Minérios de ferro como insumo para alto-forno - Determinação da redutibilidade pelo índice da taxa de redução**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4696-1:2018 Minérios de ferro como insumo para alto-forno - Determinação dos índices de desintegração sob redução a baixa temperatura pelo método estático - Parte 1: Redução com CO, CO₂, H₂ e N₂**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 12p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4696-2:2018 Minérios de ferro como insumo para alto-forno - Determinação dos índices de desintegração sob redução a baixa temperatura pelo método estático - Parte 2: Redução com CO e N₂**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 11p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9035:2007 Minérios de ferro - Determinação do teor de ferro (II) solúvel em ácido - Método volumétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 10p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9507:2003 Minérios de ferro - Determinação do teor de ferro total - Método de redução por cloreto de titânio (III)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 11p.
- BAYÃO, D. V. **Correlação entre propriedades físicas e metalúrgicas de pelotas de minério de ferro**. 2014. 65f. Monografia. Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, Brasil, 2014.
- BOWLING, K.M.; CARTER, N. B. **Chemical and Physical Variables Affecting iron ore pellet Properties**. Sidney - Austrália: Australia Japan Extrative Metallurgy Symposium, 1980.
- CARDOSO, T. H. **Sumário Mineral 2011**. Disponível em: <https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6350>. Acesso em: 05. jul. 2021.
- CARVALHO, P. S. L. DE; SILVA, M. M. DA; ROCIO, M. A. R.; MOSZKOWICZ, J. **Biblioteca Digital - Minério de ferro Bndes Setorial 39**. Anais eletrônicos. BNDES, p. 197-234, 2014. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CEFETES. **Especificação e caracterizações de minério de ferro para alto forno**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. Vitória - ES, 2011, p. 28-30.

CHUN, T. .; ZHU, D. .; J, P. Influence of sulfur content in raw materials on oxidized pellets. **Journal of Central South University of Technology**, v. 18, n. 6, p. 1924–1929, 2011.

DWARAPUDI, S.; GHOSH, T. K.; SHANKAR, A.; TATHAVADKAR, V.; BHATTACHARJEE, D.; VENUGOPAL, R. Effect of pellet basicity and MgO content on the quality and microstructure of hematite pellets. **International Journal of Mineral Processing**, v. 99, n. 1–4, p. 43–53, maio 2011.

DWARAPUDI, S. ET AL. Effect of pyroxenite flux on the quality and microstructure of hematite pellets. **International Journal of Mineral Processing**, v. 96, p. 45–53, 2010.

ELZEA, J. E; MURRAY, H. H. (1995). **Bentonite**, In: **Industrial Mineral and Rocks**. AIME, p. 223-246, 1995.

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. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, 2004.

FONSECA, V. O. **Envelhecimento de pelotas de minério de ferro com diferentes basicidades e teores de MgO**. 2003. 253f. Dissertação de Mestrado. REDEMAT, UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, 2003.

GUL, A.; SIRKECI, A. A.; BOYLU, F.; GULDAN, G.; BURAT, F. Improvement of mechanical strength of iron ore pellets using raw and activated bentonites as binders. **Physicochemical Problems of Mineral Processing**, v. 51, n. 1, p. 23–36, 2015.

HSIEH, L.-H.; WHITEMAN, J. A. Effect of oxygen potential on mineral formation in lime-fluxed iron ore sinter. **ISIJ International**, v. 29, n. 8, p. 625–634, 1989.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 2597-1:2006 Iron ores — Determination of total iron content — Part 1: Titrimetric method after tin(II) chloride reduction**. Genebra: ISO, 2006. 13p.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION **ISO 4996:2014 Hot-rolled steel sheet of high yield stress structural quality**. Genebra: ISO, 2014. 8p.

JESUS, C. A. G. DE. Ferro / Aço. In: DIDEM, D. DE D. E E. M. – (Ed.). . **Economia Mineral do Brasil**. Brasília - DF: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM, 2009. p. 99–116.

JESUS, C. A. G. DE; JOAQUIM, L. G. **Sumário Mineral Brasileiro 2018**. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018>. Acesso em: 02 jun. 2020.

LIU, H.; XIE, B.; QIN, Y. Effect of Bentonite on the Pelleting Properties of Iron Concentrate. **Journal of Chemistry**, v. 2017, p. 1–6, 2017.

LUCKHAM, P. F.; ROSSI, S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 82, n. 1–3, p. 43–92, out. 1999.

- LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A. E NETO, M. A. A. (2001b) **Bentonita: UBM – União Brasileira de Mineração**. In: **Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**, p. 373-376, Editores: João A Sampaio, Adão B. da Luz e Fernando F. Lins, CETEM/MCT, 398p, 2001.
- LUZ, A. B. DA; MACHADO, C. A. M. E; A.O.D. (2001a). **Relatório de viagem aos EUA preparado para o Projeto CTPetro-UFPE/CETEM, RV-10/01-CETEM**, 2001.
- LUZ, A. B. DA; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Aglomeração: Pelotização. In: **Introdução ao tratamento de minérios**. 6ª Edição ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. p. 676–724.
- LUZ, A. B. DA; OLIVEIRA, C. H. DE. Cap.11 Argila - Bentonita. In: SOUZA, V. C. DE; SOUZA, V. L. DO E. S. (Eds.). **Rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações**. 2ª ed. Rio de Janeiro - RJ: CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2008. p. 239–253.
- MARSHAL, W. E. **Taconite pellets in the blast furnace**. J. Metals, 1961. p. 308-313.
- 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> - Jader Martins - PROCEDIMENTOS PARA A V ALIAÇÃO DE AGLOMERANTES NA PELOTIZAÇÃO.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2020
- MEYER, K. **Pelletizing of Iron Ores**. 1ª ed. Frankfurt: Springer-Verlag, 1980. 302 p.
- MOURÃO, J. M. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico/ NT Minério de Ferro e Pelotas Situação Atual e Tendências 2025**. Brasília - DF: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Nota+Tecnica+TR02+MINERIO+DE+FERRRO+E+PELOTAS_rev_04_4766.pdf/e4611287-faa1-4244-b9a2-931c42385229?version=1.0>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- MURILO MOURÃO, J. **Aspectos Conceituais Relativos À Pelotização De Minérios De Ferro**. Vitória - ES: Conceitual Consultoria Minério - Siderúrgica, 2017.
- PEREIRA, L. H. C. S. **CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO : Beneficiamento , pelotização e análise online de teor**. 2013. 44f. Monografia (Pós Graduação em Engenharia de Recursos Minerais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- QIANG, Z.; YONGBIN, Y.; FEIYU, M; QIAN, L.; TAO, J. **Rheological properties of bentonite for iron ore pellets**. Changsha - China. Disponível em: <<http://www.cnmol.com/Search/ResultView.aspx?Page=1&conId=4yDYHny9q4k%3D>>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- ROSA, I. B. C. **AVALIAÇÃO DE TRAJETÓRIA DE FUIROS DE SONDAGEM EM MACIÇOS ROCHOSOS NA MINA DE S11D – CARAJÁS PA**. 2015. 145f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. ITABIRITOS E MINÉRIOS DE FERRO DE ALTO TEOR DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – UMA VISÃO GERAL E DISCUSSÃO. **Geonomos**, n. February 2016, p. 27–43, 1 dez. 2000.
- S.J., R.; S.K., K. Laboratory studies for improving green ball strength in bentonitebonded magnetite concentrate pellets. **Int. J. Miner. Process.**, 72, p. 429-441, 2003.

SAAB, M. W.; ASSIS, P. SANTOS; VONKRÜGER, P.; PENA, E. Q.; VIERA, C. B.; ARAÚJO, F. G. DA S.; PONTES, J. C.; GUIMARÃES, A.; MAFRA, W.; PIMENTA, H. **Curso de Mineração - Básico Módulo IV: Pelotização e Uso de Minério de Ferro na Siderurgia**. Vale S/A, notas de aula, Ouro Preto - MG, 2012, p 1-75.

SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista Estado da Paraíba**. 2011. 282f. Tese. Doutorado em Engenharia Metalúrgica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, São Paulo, SP, Brasil, 2011.

SILVA, A., & FERREIRA, H. 2008 Sep 6. 3. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos [Online]** 3:2. Disponível: <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/77/91>. Acesso em: 12 jul. 2020.

SOLÉ, R. A. L. et al. **Avaliação dos parâmetros metalúrgicos de granulados e pelotas de minério de ferro para alto forno**. Congresso do IAS, Rosário - Argentina, 2014.

SOLÉ, R. A.; WENDLING, F. **Curso de Pelotização**. Notas de aula, Ouro Preto - MG, 2020. Acesso em: 14 jul. 2020.

TAKEHARA, L. **Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros**. 2004. 421f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2004.

UMADEVI, T.; KUMAR, P.; LOBO, N. F.; PRABHU, M.; MAHAPATRA, P. C.; RANJAN, M. Influence of pellet basicity on iron ore properties and Microstructure. **ISIJ International**, Toranagallu, Karnataka, v. 51, n. 1, p. 14–20, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2020. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY (Ed.). . **Mineral Commodity Summaries 2020**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2020. p. 88–89.

USGS. Clays. U. S. Mineral Commodity Summaries. In: SURVEY, U. S. G. (Ed.). . **Mineral Commodity Summaries 2007**. Reston, Virginia. U.S. Geological Survey, 2007. p. 46–47.

VALE. **Em 1969, a primeira usina de pelotização do Brasil era instalada pela Vale na Ponta de Tubarão**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/primeira-usina-pelotizacao-brasil-vale-ponta-tubarao.aspx>. Acesso em: 3 jul. 2020.

VALE. **Adaptado Relatório Anual Vale**. 2018. Disponível em: http://www.vale.com/pt/investors/information-market/quarterly-results/resultadostrimestrais/preport4t18_p%2015.pdf. Acesso em: 6 jul. 2020.

VALE. **Mas afinal, o que é pelotização?** Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/voce-sabe-o-que-e-pelotizacao.aspx>. Acesso em: 4 jun. 2020.

VIEIRA, J. S. **Curso de pelotização de minério de ferro**. Notas de aula, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, 2014, p. 27. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/curso-de-pelotizacao-de-minerio-de-ferro/4865885/>. Acesso em: 20 jul. 2020

ZHU, D.; PAN, J.; LU, LIMING; HOLMES, R.J. Iron ore pelletization. In: **Iron Ore**. Elsevier, 2015. p. 435–473.

ZHU, D. ET AL. Influence of basicity and MgO content on metallurgical performances of Brazilian specularite pellets. **International Journal of Mineral Processing**, v. 125, 2013.

ZIMMERMANN, J. **Study of the reactions between iron ore slag and refractories**. 2007. 80f. Dissertação de Mestrado - Luleå University of Technology, Luleå, 2007.