

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de Mestrado

“Efeito da adição de cal hidratada na etapa de aglomeração das pelotas de minério de ferro produzidas pela Samarco S.A.”

Autor: Eng. Anderson Lúcio de Souza

Orientador: Prof. Marcelo Borges Mansur

Março/2014

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Anderson Lúcio de Souza

“EFEITO DA ADIÇÃO DE CAL HIDRATADA NA ETAPA DE AGLOMERAÇÃO DAS  
PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO PRODUZIDAS PELA SAMARCO S.A.”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Marcelo Borges Mansur

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2014

Dedico esse trabalho a meus pais, Espedito e Maria,  
à minha esposa, Carolina,  
à minha filha, Ana Carolina,  
ao meu irmão, Alexis,  
à minhas avós, Perpétua e Rita (em memória).

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por tudo em minha vida.

Agradeço à Samarco Mineração S.A. pela oportunidade de crescimento profissional.

Ao professor Marcelo Borges Mansur, meu orientador, pelo suporte técnico, sugestões, ensino e dedicação durante todo o período do curso e desenvolvimento do trabalho.

Ao Thiago Marchezi Doellinger pelo incentivo e apoio constante e irrestrito.

Ao Henrique Dias Gatti Turrer pelas orientações, revisões, discussões e disponibilidade.

Ao Sergio Fernando Nunes, Maurício Cota Fonseca e Maycon Athayde pelas sugestões, discussões e compartilhamento de experiência.

A todos os colegas de trabalho da Samarco pelas contribuições.

A toda a equipe do Pot Grate, pela realização dos testes, pela grande dedicação durante todo o trabalho, pelo grande profissionalismo e pelas inúmeras contribuições nas análises dos resultados.

A toda a equipe do laboratório sólido e líquido pelo apoio nos testes e nas análises.

A Alysson Werneque Pereira, Álvaro Pereira e Alexandre Portilho pela oportunidade e incentivo.

A Evandro Marchesi, Mateus Corona e Lara da Silva Varandas pela grande ajuda na coleta de amostras, auxílio na realização dos testes e análise dos resultados;

e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A Samarco é uma empresa brasileira de mineração, produtora de pelotas de minério de ferro de alta qualidade para a indústria siderúrgica mundial. O processo produtivo é totalmente integrado e realizado em duas unidades industriais: na unidade de Germano, localizada em Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, e na unidade de Ponta Ubu, localizada em Anchieta, no Espírito Santo. O minério lavrado é concentrado em Germano e transportado na forma de polpa via mineroduto até a unidade de Ponta Ubu. Para garantir as condições reológicas necessárias da polpa durante o transporte da mesma pelo mineroduto e evitar uma possível obstrução do mesmo devido a sedimentação da polpa após uma parada, é adicionada cal hidratada à polpa de minério. Para o processo de filtragem da polpa recebida em Ubu, a adição de cal na polpa antes do mineroduto favorece a etapa de filtragem, uma vez que a cal atua como um coagulante e auxilia na elevação do estado de agregação da polpa. Para avaliar o efeito da dosagem de cal na polpa de minério de ferro na etapa de pelotamento, foram realizados testes de pelotamento utilizando-se um *pellet feed* ao qual foram adicionadas soluções preparadas com diversas massas de cal. Observou-se que quanto maior a massa de cal hidratada usada na solução que foi misturada ao *pellet feed* (onde o teor de CaO do *pellet feed* aumenta com a massa de cal usada), maior foi o diâmetro médio das pelotas cruas obtidas nos testes de pelotamento. Maiores dosagens da solução de cal aumentaram o estado de agregação das partículas de minério, favorecendo um crescimento mais rápido do aglomerando de minério de ferro já nos minutos iniciais do pelotamento. Os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  presentes no *pellet feed*, em função da dosagem de cal, interagem com o polímero do aglomerante orgânico e com a bentonita, reduzindo a capacidade destes agentes aglomerantes de controlar o crescimento das pelotas durante os testes de pelotamento. Resultados satisfatórios de diâmetro médio das pelotas cruas somente foram obtidos nos testes onde o teor de CaO (%) do *pellet feed* em função da dosagem de cal hidratada foi menor ou igual que 0,08%, independentemente do agente aglomerante utilizado durante os testes.

Palavras-chave: minério de ferro, cal, pelotamento.

## ABSTRACT

Samarco is a Brazilian mining company, a high quality iron ore pellets producer for the global steel industry. The process is fully integrated and carried out in two industrial plants: the Germano unit, located in Ouro Preto and Mariana, Minas Gerais, and in Ponta Ubu unit, located in Anchieta, Espírito Santo. The mined ore is concentrated in Germano plant and transported as slurry through a pipeline to Ponta Ubu unit. In order to guarantee the necessary rheological conditions of the slurry during transportation by pipeline and avoid a possible obstruction due to sedimentation even after a shutdown, hydrated lime is added to the slurry. For the filtering process of received slurry in Ubu, lime addition in slurry before the pipeline support filtering step, since the lime acts as a coagulant and assists in raising the physical state of the slurry. To assess the lime dosage effect of iron ore slurry in the balling process, tests were done using different masses of prepared lime solutions added to a pellet feed. It was observed that the higher hydrated lime solution added to pellet feed (where the CaO content in the pellet feed increases with the mass of lime used), bigger was the green pellets average diameter obtained in the pelletizing test. Higher dosages of lime solution increased the aggregation state of the ore particles, favoring a faster growth of agglomerated iron ore, during the initial minutes of balling. The  $\text{Ca}^{2+}$  cations present in the pellet feed, as a function of lime dosage, interact with organic polymer binder and bentonite; reducing the ability of these agents to control the pellets growth during the pelletizing tests. Satisfactory results of the green pellets average diameter of the raw pellets were obtained only in tests in which CaO content (%) pellet feed as given by hydrated lime was equal or less than 0.08%, regardless the of agglomerating agent used in tests.

Key-words: iron ore, lime, pelletizing.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	III
ABSTRAT.....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIV
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
3.1 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PELOTAS NA SAMARCO .....	5
3.2 EFEITO DA DOSAGEM DE CAL NA POLPA E NAS CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO .....	9
3.3 INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE CAL NA ETAPA DE PELOTAMENTO.....	18
3.3.1 Aglomerante Orgânico .....	21
3.3.2 Bentonita .....	22
3.3.3 Influência da dosagem de cal na etapa de aglomeração .....	24
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
4.1. OBTENÇÃO DE AMOSTRA DE POLPA .....	28
4.2.1 Análise química .....	29
4.2.2 Perda por calcinação – PPC.....	30
4.2.3 Potencial hidrogeniônico – pH .....	31
4.2.4 Análise física .....	32
4.2.5 Umidade .....	35
4.3. TESTE DE PELOTAMENTO NO DISCO PILOTO .....	35
4.3.1 Ajuste da umidade e teor de CaO .....	35
4.3.3 Mistura .....	39
4.3.4 Pelotamento no disco piloto .....	39
4.3.5 Análise das propriedades das pelotas cruas.....	41
4.4. TESTE DE QUEIMA NO FORNO PILOTO .....	44
4.4.1 Preparação das pelotas cruas para queima no forno de <i>pot grate</i> .....	45
4.4.2 Queima das pelotas no forno de <i>pot grate</i> .....	46
4.5. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA PELOTA QUEIMADA .....	47
4.5.1 Índices de tamboramento e abrasão.....	47

4.5.2 Resistência à compressão .....	48
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO <i>PELLET FEED</i> E INSUMOS .....	50
5.2. Análise do pH e dispersão do <i>pellet feed</i> .....	53
5.2.1 Análise do pH do <i>pellet feed</i> .....	54
5.2.2 Análise de dispersão do <i>pellet feed</i> .....	55
5.3. PARTE 1 – TESTES DE PELOTAMENTO .....	56
5.3.1 Testes de pelotamento com aglomerante orgânico.....	58
5.3.2 Testes de pelotamento com bentonita.....	64
5.4. PARTE 2 – QUALIDADE DAS PELOTAS CRUAS .....	70
5.4.1 Teste de quedas.....	70
5.4.2 Compressão da pelota crua úmida (CPCU).....	72
5.4.2 Compressão da pelota crua seca (CPCS).....	74
5.5. PARTE 3 – QUALIDADE DAS PELOTAS QUEIMADAS .....	77
5.5.1 Testes de tamboramento .....	77
5.5.2 Testes de compressão .....	80
5.5.4 Teste pelotamento com cal hidratada .....	81
5.5.5 Pelotamento com minério envelhecido.....	89
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>100</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ISO - International Organization for Standardization

CMC - Carboximetil celulose

CPCU – Compressão de pelotas cruas úmidas

CPCS - Compressão de pelotas cruas secas

PS - Pelotas secas

PC - Pelotas cruas ou verdes

PQ - Pelotas queimadas

PF - *Pellet Feed*

PPC - Perda por calcinação

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Influência do grau de dispersão do <i>pellet feed</i> na formação das pelotas cruas: pelotas secas e com baixa resistência mecânica (1º cenário); pelotas com elevada umidade superficial (3º cenário); situação intermediária desejada (2º cenário) (DOELLINGER, 2011).	3
Figura 3.1: Imagem ilustrativa do processo produtivo integrado da Samarco (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2010).....	5
Figura 3.2: Fluxograma esquemático da unidade industrial de Germano (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2009). ....	7
Figura 3.3: Fluxograma esquemático da etapa de pelotamento (Manual de Produção Samarco 2013).....	8
Figura 3.4: Fluxograma esquemático da unidade industrial de Ponta Ubu (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2009). ....	9
Figura 3.5: Diagrama de especiação do cálcio ( $[Ca^{2+}] = 10^{-3}$ mol/L; T = 25°C) (FUERSTENAU e PALMER, 1976). ....	10
Figura 3.6: Representação esquemática do desenvolvimento de cargas na superfície do quartzo (YOPPS e FUERSTENAU, 1964). ....	11
Figura 3.7: Potencial zeta da hematita em função do pH (tamanho da partícula mineral < 5µm; [NaCl] = 0,03 mol/L) (ZHONGHUA <i>et al.</i> , 2004). ....	11
Figura 3.8: Representação esquemática da dupla camada elétrica (KIM, 1995). ....	12
Figura 3.9: Estrutura da dupla camada elétrica (PARKS, 1975).....	13
Figura 3.10: Estrutura da dupla camada elétrica (adsorção não específica) (PARKS, 1975)..	14
Figura 3.11: Estrutura da dupla camada elétrica (adsorção específica superequivalente) (PARKS, 1975).....	15
Figura 3.12: Compressão da dupla camada elétrica via adição de coagulantes (KIM, 1995)..	16
Figura 3.13: Variação da dispersão do sistema em função do pH e da concentração dos íons $CaOH^+$ e $Ca^{2+}$ (TURRER <i>et al.</i> , 2010). ....	17
Figura 3.14: Forças atuando em partículas minerais em suspensão sem reagentes, com cal, com polímeros coagulantes e floculantes (TURRER <i>et al.</i> , 2010).....	18
Figura 3.15: Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração (MEYER, 1980). ....	19
Figura 3.16: Estágios de formação das pelotas cruas (MEYER, 1980). ....	19

Figura 3.17: Formação das pelotas cruas nos discos de pelotamento (MEYER, 1980).....	20
Figura 3.18: Estrutura da carboximetilcelulose (CHAPLIN, 2006).....	21
Figura 3.19: Fluxograma simplificado da obtenção de CMC (DOELLINGER, 2011). ....	22
Figura 3.20: Representação esquemática da estrutura das esmectitas (DANA, 1983). ....	23
Figura 3.21: Desempenho do pelotamento em função da dispersão do minério (DOELLINGER, 2011). ....	25
Figura 3.22: Interação dos íons $Ca^{2+}$ com as cadeias da CMC (TURRER <i>et al.</i> , 2010). ....	26
Figura 4.1: Espectrômetro de emissão por plasma. ....	30
Figura 4.2: Mufla. ....	31
Figura 4.3: Balança Toledo. ....	31
Figura 4.4: pHmetro digital microprocessador. ....	32
Figura 4.5: Peneira granulométrica de bancada. ....	32
Figura 4.6: Permeabilímetro Blaine. ....	33
Figura 4.7: Picnômetro a hélio. ....	33
Figura 4.8: Materiais do teste de dispersão. ....	34
Figura 4.9: Destilador de água tipo pilsen. ....	37
Figura 4.10: Agitador mecânico de bancada. ....	38
Figura 4.11: Misturador Eirich modelo R-08W. ....	38
Figura 4.12: Disco piloto e sistema de alimentação de <i>pellet feed</i> . ....	40
Figura 4.13: Peneiras granulométricas quadradas. ....	42
Figura 4.14: Equipamento para ensaio de teste de quedas. ....	42
Figura 4.15: Máquina de compressão manual da pelota crua. ....	43
Figura 4.16: Esquema ilustrativo do forno <i>pot grate</i> (COTA, 2004). ....	44
Figura 4.17: Forno Piloto - <i>pot grate</i> . ....	46
Figura 4.18: Tambor rotativo para teste de tamboramento. ....	48
Figura 4.19: Prensa hidráulica usada nos testes resistência à compressão. ....	49
Figura 5.1: pH do <i>pellet feed</i> em função da dosagem de cal hidratada. ....	54
Figura 5.2: pH do <i>pellet feed</i> em função da dosagem de cal hidratada após 48 horas. ....	55
Figura 5.3: Dispersão do <i>pellet feed</i> em função da dosagem de cal hidratada. ....	55
Figura 5.4: Dispersão do <i>pellet feed</i> em função da dosagem de cal hidratada após 48 horas. ....	56
Figura 5.5: Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada. ....	57

Figura 5.6: Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada com o uso de aglomerante orgânico. ....	58
Figura 5.7: Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	59
Figura 5.8: Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	59
Figura 5.9: Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	60
Figura 5.10: Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	60
Figura 5.11: Aspecto visual das pelotas cruas com 7 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	61
Figura 5.12: Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	61
Figura 5.13: Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	62
Figura 5.14: Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	62
Figura 5.15: Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	63
Figura 5.16: Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada. ....	64
Figura 5.17: Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	65
Figura 5.18: Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	66
Figura 5.19: Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	66
Figura 5.20: Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,08%. ....	67
Figura 5.21: Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. ....	67

Figura 5.22: Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. .....	68
Figura 5.23: Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%.....	68
Figura 5.24: Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%. .....	69
Figura 5.25: Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,20%.....	69
Figura 5.26: Teste de quedas das pelotas cruas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	70
Figura 5.27: Teste de quedas das pelotas cruas com bentonita em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	71
Figura 5.28: Compressão da pelota crua úmida com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	72
Figura 5.29: Compressão da pelota crua úmida com bentonita em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	74
Figura 5.30: Compressão da pelota crua seca com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	75
Figura 5.31: Compressão da pelota crua seca com bentonita em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	76
Figura 5.32: Tamboramento das pelotas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	78
Figura 5.33: Tamboramento das pelotas com bentonita em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	79
Figura 5.34: Compressão das pelotas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	80
Figura 5.35: Compressão das pelotas com bentonita em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	81
Figura 5.36: Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	82
Figura 5.37: Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	83

Figura 5.38: Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	84
Figura 5.39: Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	84
Figura 5.40: Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	85
Figura 5.41: Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	85
Figura 5.42: Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com cal hidratada e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,26%. .....	86
Figura 5.43: Diâmetro médio das pelotas cruas em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	87
Figura 5.44: Teste de quedas das pelotas cruas em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	87
Figura 5.45: Compressão da pelota crua úmida em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	88
Figura 5.46: Compressão da pelota crua seca em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	89
Figura 5.47: Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	90
Figura 5.48: Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	91
Figura 5.49: Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	91
Figura 5.50: Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	92
Figura 5.51: Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	92
Figura 5.52: Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	93
Figura 5.53: Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do <i>pellet feed</i> em 0,14%. .....	93
Figura 5.54: Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada com o uso de aglomerante orgânico. .....	94
Figura 5.55: Teste de quedas das pelotas cruas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . .....	95

Figura 5.56: Compressão da pelota crua úmida com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	95
Figura 5.57: Compressão da pelota crua seca com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . ....	96
Figura 5.58: Tamboramento das pelotas queimadas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> . ....	97
Figura 5.59: Compressão das pelotas queimadas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do <i>pellet feed</i> .....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1: Parâmetros de qualidade pelota crua e queimada.....	49
Tabela V.1: Caracterização química do <i>pellet feed</i> .....	50
Tabela V.2: Caracterização física do <i>pellet feed</i> .....	51
Tabela V.3: Caracterização química do carvão .....	51
Tabela V.4: Caracterização física do carvão .....	52
Tabela V.5: Caracterização química do calcário .....	52
Tabela V.6: Caracterização física do calcário .....	52
Tabela V.7: Caracterização química da bentonita .....	53
Tabela V.8: Caracterização química da cal hidratada .....	53
Tabela V.9: Variação do pH e da dispersão do <i>pellet feed</i> x CaO (%) .....	54
Tabela V.10: Parâmetros dos testes de pelotamento .....	57

# 1. INTRODUÇÃO

O processo da Samarco Mineração S.A. para a produção de pelotas de minério de ferro é totalmente integrado e realizado em duas unidades industriais: (i) na unidade de Germano, localizada em Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais, onde se faz a extração e o beneficiamento do minério para elevar o seu teor de ferro, e (ii) na unidade de Ponta Ubu, localizada em Anchieta, no Espírito Santo, onde se faz a pelotização do minério. O controle da qualidade é realizado em todas as etapas unitárias e inicia-se na mina, com a especificação das frentes de lavra, passando pela etapa de concentração, transporte da polpa via mineroduto, separação sólido/líquido, pelotamento, forno de endurecimento, estocagem e embarque das pelotas para os clientes localizados em vários países.

As duas unidades industriais encontram-se interligadas por três minerodutos, com quase 400 km de extensão cada um, que transportam a polpa de minério de ferro de Minas Gerais até o Espírito Santo. Para evitar problemas no reinício de operação do mineroduto em função da obstrução da linha pela própria polpa e/ou por compactação de material sedimentado após uma parada do mesmo, adiciona-se cal (CaO) à polpa que será transportada através do mineroduto. A adição deste reagente permite a alteração e o controle da reologia da polpa, através do pH, favorecendo um processo adequado de bombeamento do concentrado. No processo em Ponta Ubu (ES), a cal atua como coagulante e auxilia na elevação do estado de agregação da polpa. Isso se mostra benéfico na filtragem, impactando positivamente na redução da umidade da torta formada e no aumento da produtividade da operação.

A cal adicionada à polpa de minério reage com a água e forma o hidróxido de cálcio, conforme a Eq. (1.1):



O hidróxido de cálcio formado se dissocia em  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CaOH}^+$ , liberando íons  $\text{OH}^-$ , que alteram o pH da solução e o estado de agregação das partículas de minério de ferro. Conforme estudos realizados por SILVA (2006), observou-se o efeito da cal no tempo de operação dos tecidos filtrantes durante o processo de filtragem nas usinas de pelotização em Ubu. Identificou-se que o enfraquecimento das fibras se dava pelo

enrijecimento das mesmas, que era causado pela formação de carbonatos originados de reações entre os íons  $\text{Ca}^{++}$  com o átomo de oxigênio presente na carbonila da poliamida, reduzindo a vida útil desses tecidos. Observou-se que a elevação do pH minimizava esse efeito.

O desempenho do pelotamento está associado às condições de agregação das partículas do minério, onde o descontrole no crescimento do aglomerado irá gerar pelotas fora de especificação.

Na etapa de pelotamento não é desejável a ocorrência de um alto nível de coagulação do minério, pois isso pode acarretar na obtenção de uma pelota seca no seu interior, mesmo com alta umidade superficial. Neste caso, a pelota apresentaria baixa resistência mecânica e trincaria/quebraria durante o seu transporte do disco de pelotização até o forno de endurecimento. Além disso, as pelotas localizadas no leito inferior do forno durante a queima poderão não suportar as pressões requeridas, gerando finos que impermeabilizarão o leito e impactarão na qualidade física da pelota queimada.

Também não é desejável no pelotamento uma elevada dispersão das partículas de minério de ferro. Com a elevação da intensidade da carga elétrica das partículas de minério de ferro, haverá uma maior dificuldade na formação das pelotas nos discos, conseqüentemente a instabilidade do sistema levará à formação de pelotas com elevada umidade superficial e com forma irregular, dificultando a etapa de queima.

Verifica-se, nos últimos anos, uma tendência de aumento no pH médio da polpa na chegada do mineroduto em Ponta Ubu (ES), com a ocorrência frequente de flutuações significativas em alguns períodos. Em função de mudanças nas características físico-químicas da polpa de minério bombeado e conseqüentemente do *pellet feed*, observaram-se, por diversas vezes, dificuldades na etapa de formação das pelotas cruas, mesmo quando os principais parâmetros físicos do *pellet feed* estavam adequados, como a área superficial, distribuição granulométrica das partículas e umidade do *pellet feed*. As principais dificuldades encontradas estavam no controle do crescimento das pelotas cruas, na excessiva formação de cachos e na elevada umidade superficial das mesmas.

Testes exploratórios em laboratório apontaram para uma possível influência da dosagem de cal à polpa no mineroduto em Germano (MG), na etapa anterior ao

bombeamento da polpa, como sendo uma das causas para a dificuldade no controle do crescimento das pelotas, em função da presença de íons  $\text{Ca}^{2+}$  e na alteração do grau de agregação do *pellet feed*. Na Figura 1.1 é ilustrado o aspecto visual das pelotas cruas formadas a partir de testes exploratórios controlados realizados no laboratório da Samarco para três níveis de dispersão da polpa de minério de ferro.



**Figura 1.1:** Influência do grau de dispersão do *pellet feed* na formação das pelotas cruas: pelotas secas e com baixa resistência mecânica (1º cenário); pelotas com elevada umidade superficial (3º cenário); situação intermediária desejada (2º cenário) (DOELLINGER, 2011).

É neste contexto que se insere o tema abordado na presente Dissertação de Mestrado, na qual se realizou um estudo do efeito da adição de cal hidratada ao minério em alguns parâmetros físico-químicos do *pellet feed* (pH e grau de dispersão) e no processo de formação de pelotas cruas de minério de ferro e a sua consequente qualidade.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal da presente Dissertação de Mestrado foi avaliar o efeito da adição da cal hidratada na forma de leite de cal na etapa de pelotamento e na qualidade das pelotas de minério de ferro produzidas pela Samarco Mineração S.A.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram propostos:

- Avaliar a influência da adição de cal hidratada ao *pellet feed* nos valores de pH e grau de dispersão do *pellet feed*;
- Avaliar a influência da adição de cal hidratada ao *pellet feed* na etapa de pelotamento; e,
- Avaliar a influência da concentração do CaO do *pellet feed* a partir da adição de cal hidratada na qualidade das pelotas cruas e queimadas.

## 3. REVISÃO DA LITERATURA

O processo produtivo da Samarco Mineração S.A. é descrito sucintamente no item 3.1, desde a extração e concentração do minério de ferro na unidade de Germano (MG), passando pelo bombeamento da polpa através de um mineroduto, até o seu pelotamento na unidade de Ponta Ubu (ES). Em seguida, os principais mecanismos através dos quais a dosagem de cal na polpa influencia nas características do minério de ferro são abordados no item 3.2. E finalmente, no item 3.3, avalia-se como a presença dos íons de cálcio influencia a carga elétrica das partículas de minério de ferro, alterando o nível de dispersão do mesmo.

### 3.1 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PELOTAS NA SAMARCO

O processo de produção de pelotas de minério de ferro na Samarco é totalmente integrado, desde a extração do minério nas frentes de lavra até a estocagem e embarque das pelotas queimadas, conforme ilustrado na Figura 3.1.



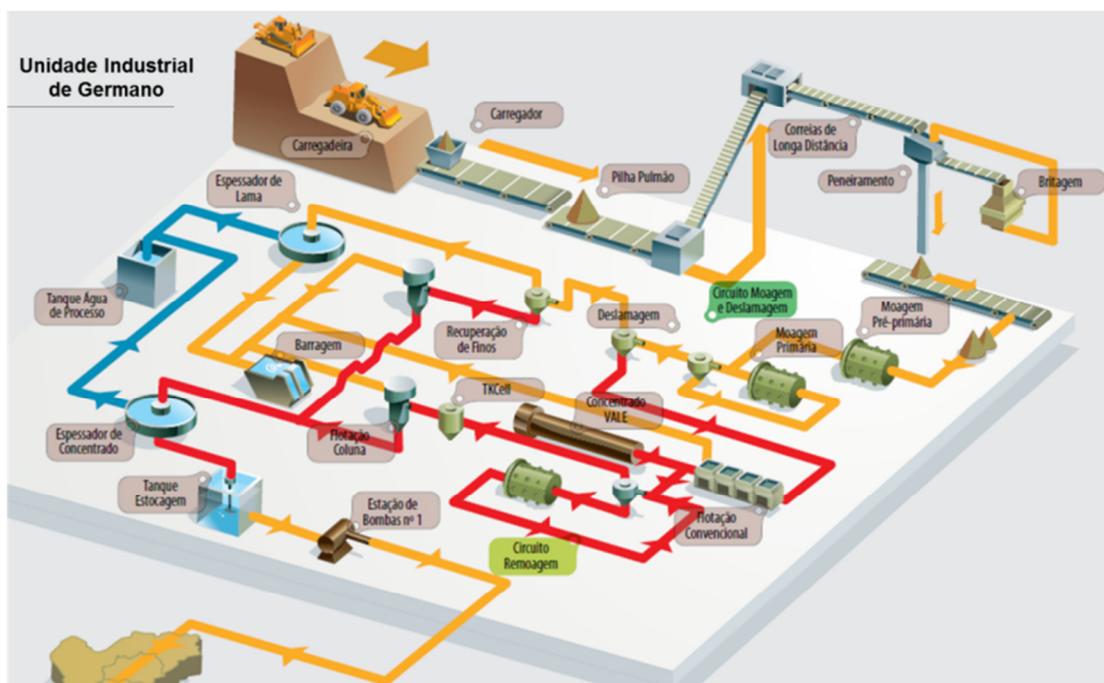
**Figura 3.1:** Imagem ilustrativa do processo produtivo integrado da Samarco (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2010).

A rota inicia-se na unidade industrial de Germano (MG) com a etapa de extração do minério das frentes de lavra. Em seguida, este é direcionado para uma unidade de peneiramento e britagem, onde ocorre a redução de tamanho dos blocos de minério para partículas de menor tamanho. O material é em seguida estocado em uma pilha pulmão para atender as necessidades logísticas da etapa seguinte.

Na próxima etapa, o minério britado é retomado por alimentadores rotativos na base da pilha pulmão e direcionado para a unidade de moagem a úmido, onde sofre uma redução significativa de tamanho, resultando em uma polpa com até 90% do minério abaixo de 149 $\mu$ m (100#).

Na sequência tem-se a etapa de concentração, onde o principal objetivo desta etapa é retirar a sílica (SiO<sub>2</sub>), que constitui a principal impureza do minério de ferro. Em seguida, obtém-se uma polpa concentrada de minério de ferro com aproximadamente 45% de sólidos, via adição de reagentes químicos específicos, como amido e a amina. A polpa então é direcionada para os espessadores e, com a adição de reagentes específicos, é possível aumentar a taxa de sedimentação das partículas. Obtém-se, então, uma polpa com aproximadamente 70% de sólido, que é direcionada para os tanques de estocagem do mineroduto.

Antes de ser transportada através do mineroduto, a polpa estocada recebe a adição de cal para adequar o seu estado de agregação. O objetivo desta adição é evitar a tendência de formação de *plug*, no caso de ocorrer uma eventual interrupção no bombeamento. A polpa de minério de ferro é bombeada por quase 400 km até chegar à unidade industrial de Ponta Ubu (ES). Na Figura 3.2 é mostrado o fluxograma das principais etapas do processo produtivo de Germano.



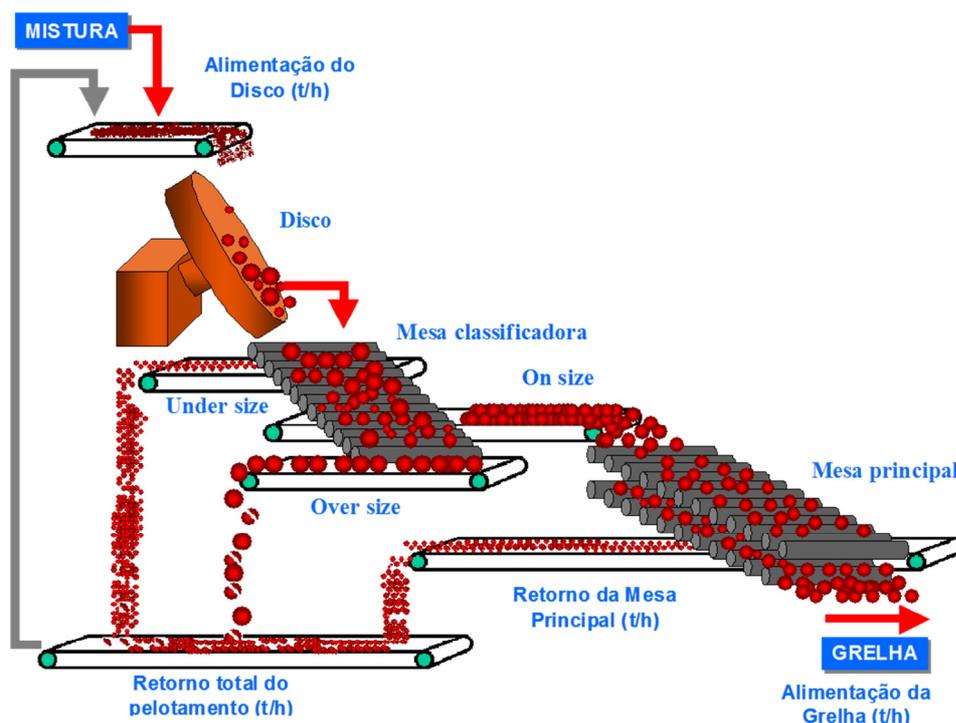
**Figura 3.2:** Fluxograma esquemático da unidade industrial de Germano (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2009).

Em Ponta Ubu, a polpa é recebida em tanques de homogeneização, posteriormente direcionada para os espessadores e na sequência para a etapa de filtragem. A polpa, recebida com aproximadamente 70% de sólidos e 30% de água, é filtrada utilizando-se filtros de discos, onde é criada uma pressão negativa (vácuo) que retira a umidade da torta de minério formada. Após a filtragem, a umidade do minério é em média de 10%.

O material filtrado, *pellet feed*, é então direcionado para a etapa de mistura, onde são adicionados os insumos necessários para a formação das pelotas. Os principais insumos adicionados são calcário, carvão e agentes aglomerantes (orgânicos ou minerais).

Após a mistura, tem-se início a etapa de pelotamento, cujo fluxograma é mostrado na Figura 3.3. O *pellet feed* é inicialmente direcionado para o silo do pelotamento, onde ficará estocado provisoriamente para, em seguida, ser direcionado para os discos pelotizadores. Nesses equipamentos ocorre a formação das pelotas cruas (também chamadas de pelotas verdes). A formação dessas pelotas se dá através de uma combinação de forças físicas, mecânicas e químicas. Ao saírem do disco, as pelotas passam por um conjunto de mesas classificadoras, nas quais se faz a seleção daquelas com tamanho adequado, entre 8,0 e 18,0 mm, de modo a serem direcionadas à etapa de

queima. As pelotas com diâmetro maior que 18,0mm e abaixo de 8,0mm são reprovadas nesta classificação e são coletadas por correias transportadoras, retornando para o processo como carga circulante em um circuito fechado. Antes de serem novamente alimentadas nos discos, estas são desagregadas nos afoadores dos discos para serem novamente aglomeradas.

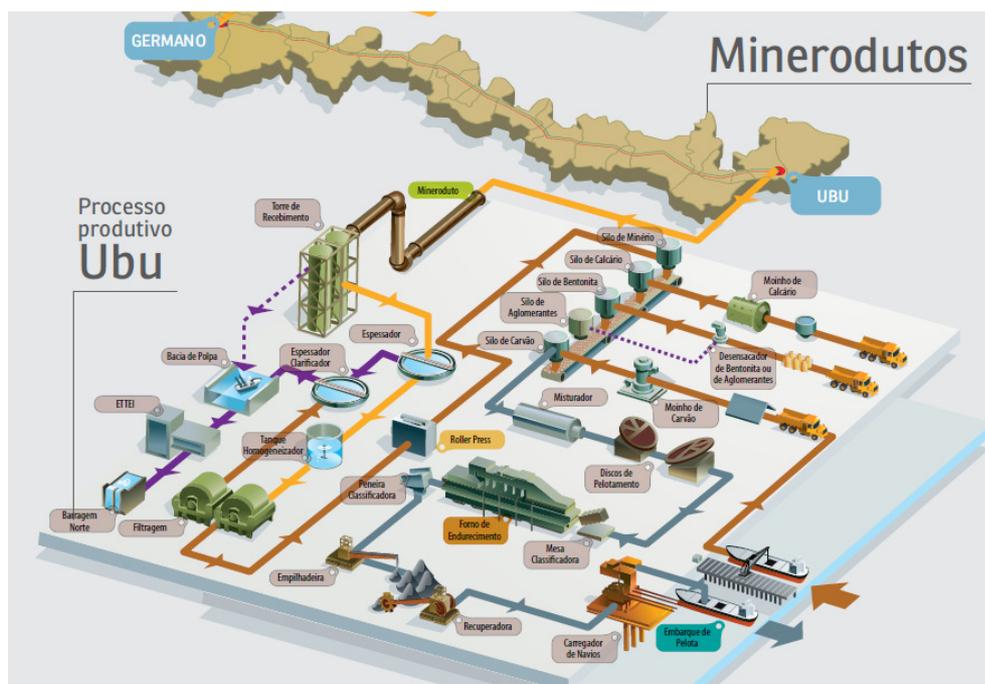


**Figura 3.3:** Fluxograma esquemático da etapa de pelotamento (Manual de Produção Samarco 2013).

Após a classificação, as pelotas cruas com tamanho adequado são direcionadas para o forno. Estas adquirem resistência física depois de serem submetidas a um processo de queima à temperatura média de 1350°C.

Por fim, na etapa seguinte, as pelotas queimadas são transportadas através de correias transportadoras até os pátios de estocagem. Ao todo, existem 3 pátios de estocagem com capacidade máxima para até 2,5 milhões de toneladas de minério. No pátio, máquinas empilhadeiras e recuperadoras se encarregam de fazer o empilhamento e a retomada do minério estocado, direcionando-o para o porto. Os navios são carregados e transportados aos respectivos clientes da Samarco.

Na Figura 3.4 é mostrado o fluxograma das principais etapas do processo produtivo de Ubu.

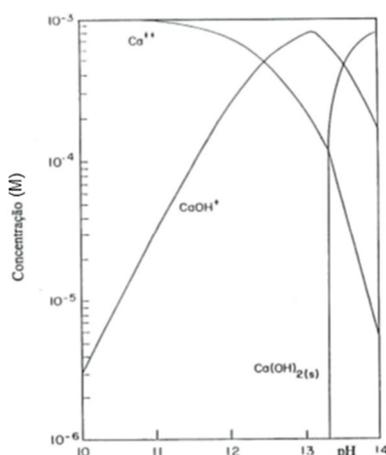


**Figura 3.4:** Fluxograma esquemático da unidade industrial de Ponta Ubu (Relatório Anual de Sustentabilidade Samarco, 2009).

### 3.2 EFEITO DA DOSAGEM DE CAL NA POLPA E NAS CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO

Dentre os diversos fatores do minério comumente decisivos para a formação e propriedades de pelotas verdes, citam-se: (i) forças físicas, tais como as de van der Waals, magnéticas ou eletrostáticas; (ii) área superficial, incluindo tamanho das partículas, distribuição de tamanho, forma e estrutura cristalina; e (iii) forças capilares e tensões de superfície, com a adição de aderentes como a água. Alguns desses fatores, principalmente os dependentes do minério natural, influenciam na formação da pelota. Há também fatores variáveis, como: unidade do *pellet feed*, granulometria e forma das partículas, assim como os parâmetros operacionais dos equipamentos utilizados. No caso específico do minério transportado através de mineroduto na forma de polpa, como é o caso da Samarco, alguns desses fatores também podem ser afetados pela presença de reagentes utilizados durante o processo, como por exemplo, a cal hidratada, que é

adicionada à polpa de minério de ferro com o objetivo de adequar as condições de dispersão da mesma. Como mostrado anteriormente, a cal reage com água e forma hidróxido de cálcio, conforme equação (1.1). O hidróxido de cálcio formado se dissocia em  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CaOH}^+$ , liberando íons  $\text{OH}^-$  alterando o pH da solução. O equilíbrio desse sistema é função do pH e da quantidade de cal adicionada. Na Figura 3.5 é mostrado um diagrama de especiação do cálcio, para uma concentração específica.

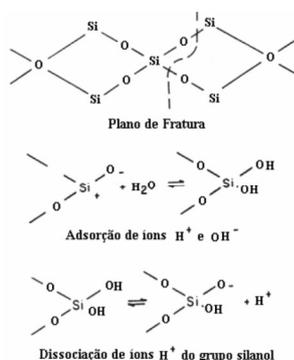


**Figura 3.5:** Diagrama de especiação do cálcio ( $[\text{Ca}^{2+}] = 10^{-3}$  mol/L;  $T = 25^\circ\text{C}$ ) (FUERSTENAU e PALMER, 1976).

A presença dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CaOH}^+$ , por sua vez, irá alterar o estado de dispersão da polpa de minério de ferro, afetando, assim, o processo de aglomeração. Há uma série de interações que regem o fenômeno do coagulação/dispersão da polpa. As duas principais são originárias das forças de van der Waals e das forças entre as duplas camadas elétricas das partículas.

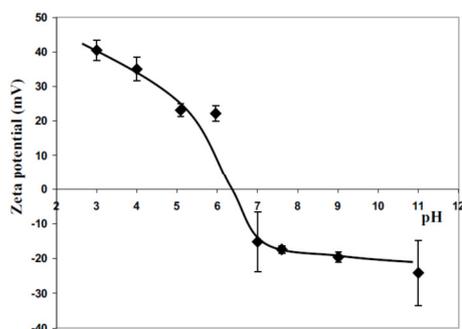
As forças de van der Waals para duas partículas de mesma natureza, em água ou outro solvente, são sempre atrativas. A intensidade depende da natureza da partícula e do solvente, e da distância entre as partículas, mas não dependem da carga das partículas, do valor do pH do meio nem significativamente da concentração de eletrólito da solução. A atração entre as partículas será mais fraca quando as partículas e o meio de dispersão forem semelhantes quimicamente.

A origem das forças eletrostáticas, que se encontra ilustrada na Figura 3.6 para o caso do quartzo, vem do fato de que partículas minerais em contato com água possuem carga superficial, que é função da atividade do íon hidrogênio na solução.



**Figura 3.6:** Representação esquemática do desenvolvimento de cargas na superfície do quartzo (YOPPS e FUERSTENAU, 1964).

Quando a atividade do íon hidrogênio na solução diminui, ou seja, quando a faixa de pH da solução se torna mais alcalina, a partícula torna-se carregada negativamente, como demonstrado na Figura 3.7 nas medidas do potencial zeta da hematita.



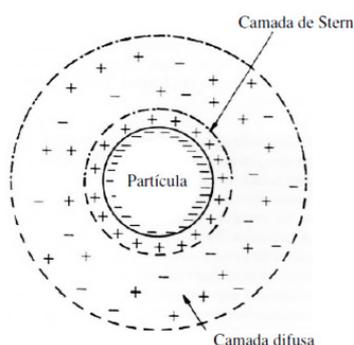
**Figura 3.7:** Potencial zeta da hematita em função do pH (tamanho da partícula mineral  $< 5\mu m$ ;  $[NaCl] = 0,03 mol/L$ ) (ZHONGHUA *et al.*, 2004).

Conforme descrito por BRAGANÇA (2008), grande parte das substâncias adquire carga elétrica superficial quando em contato com um meio polar. Segundo SHAW (1992), os possíveis mecanismos de criação destas cargas são os de ionização, dissolução ou adsorção de íons. Oxi-minerais, tais como a hematita ( $Fe_2O_3$ ), sofrem reações de hidrólise quando expostos em meio aquoso.

A superfície da hematita irá se tornar mais negativa em função do aumento do pH, quando acima do ponto isoelétrico. JONES *et al.* (1994) atribuíram este fato à ligação

dos ânions hidroxila à superfície. A carga superficial das partículas irá influenciar na distribuição dos íons no meio polar, onde as partículas sólidas ficam rodeadas por uma nuvem de íons. Íons de carga oposta, chamados de contra-íons, serão atraídos pela superfície e íons de carga de mesmo sinal, chamados de co-íons, serão repelidos para mais longe da superfície, garantindo a eletroneutralidade da suspensão.

A teoria da dupla camada elétrica descreve a distribuição dos íons e, portanto, a intensidade dos potenciais elétricos gerados pela superfície carregada (SHAW, 1992). Considera-se que a dupla camada elétrica seja constituída de duas regiões: uma camada externa difusa conhecida como camada de Gouy-Chapman, e uma camada interna compacta conhecida como camada de Stern (BRAGANÇA, 2008). Na Figura 3.8 é mostrada uma representação esquemática da dupla camada elétrica.



**Figura 3.8:** Representação esquemática da dupla camada elétrica (KIM, 1995).

O modelo desenvolvido por Gouy e Chapman fornece uma descrição quantitativa simples da distribuição de íons na camada difusa, de acordo com a influência de forças elétricas e do movimento térmico. Segundo SHAW (1992), este modelo baseia-se nos seguintes critérios: (i) a superfície é plana, infinita e com cargas elétricas distribuídas uniformemente; (ii) os íons são cargas pontuais localizadas segundo a distribuição de Boltzmann; (iii) o solvente possui o mesmo valor de constante dielétrica por toda a camada difusa; (iv) o eletrólito é isolado e simétrico de carga  $z$  (BRAGANÇA, 2008).

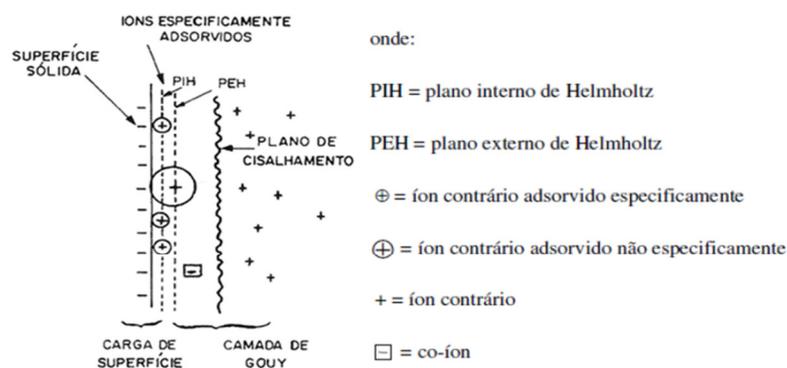
Considerando-se uma condição dinâmica, com um movimento relativo entre as partículas e o meio, a camada difusa é rompida em um plano que é chamado de plano de

cisalhamento. O potencial elétrico neste plano é conhecido como potencial zeta ( $Z$ ) ou potencial eletrocinético.

A presença de certos tipos de íons na solução provoca mudanças nos valores do potencial zeta, devido à adsorção específica na camada de Stern. Estes íons são denominados íons determinadores de potencial (idp). Dependendo da sua concentração pode haver uma reversão do potencial zeta ou a anulação deste, quando é atingido o ponto de carga zero (PCZ).

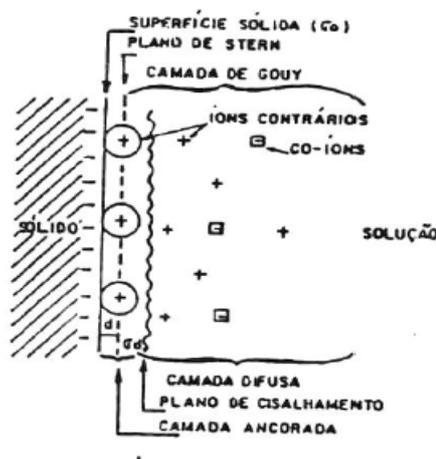
A atração entre as partículas será mais fraca quando as partículas e o meio de dispersão forem semelhantes quimicamente. Quanto maior a concentração de eletrólitos, isto é, da força iônica da solução, menor a barreira de energia devido à compressão da espessura da dupla camada elétrica.

O modelo de dupla camada elétrica, mostrado esquematicamente na Figura 3.9, ilustra a configuração eletrostática da superfície de um sólido em solução aquosa. O efeito resultante da interação entre as duplas camadas elétricas de partículas com cargas superficiais idênticas é a repulsão, e esta depende da distância entre as partículas, da magnitude da carga ou potencial de superfície e do valor do pH do solvente. As interações elétricas são também sensíveis à natureza e à concentração dos eletrólitos em solução, mas, a uma dada carga superficial, independem da natureza da partícula. As interações entre as forças de van der Waals e as elétricas são virtualmente aditivas. A dupla camada elétrica pode, também, ser visualizada de acordo com a presença ou ausência de adsorção específica.



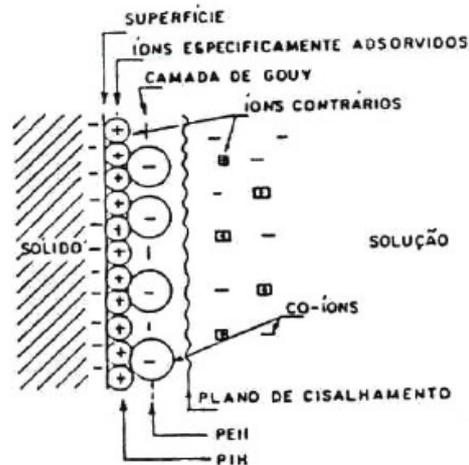
**Figura 3.9:** Estrutura da dupla camada elétrica (PARKS, 1975).

Se as forças envolvidas na adsorção são de caráter puramente eletrostático (adsorção não específica), visualizam-se apenas duas zonas de cargas distintas na dupla camada elétrica, conforme representado na Figura 3.10 (PARKS, 1975). Uma é a carga de superfície  $\sigma_0$  e a outra é a carga na camada difusa  $\sigma_c$ . Os íons de carga contrária, próximos à superfície, estão totalmente hidratados e, por esta razão, não conseguem aproximar-se mais que seus raios de hidratação. Observa-se, ainda, que o plano de Stern (constituído pela camada de íons contrários em contato com a superfície) é o lugar geométrico por onde passam os centros dos íons hidratados adsorvidos não especificamente (CARVALHO, 2003).



**Figura 3.10:** Estrutura da dupla camada elétrica (adsorção não específica) (PARKS, 1975).

Se as forças predominantes na adsorção independem da atração eletrostática, a adsorção é denominada específica e a dupla camada elétrica possui três zonas de carga, as quais são a carga da superfície do sólido, a carga correspondente aos íons adsorvidos especificamente e a carga correspondente aos íons adsorvidos eletrostaticamente na camada de Gouy, conforme representado na Figura 3.11 (PARKS, 1975). Nessa figura, destaca-se a existência de dois outros planos que são o Plano Interno de Helmholtz (PIH), definido como o lugar geométrico dos centros dos íons adsorvidos especificamente, e o Plano Externo de Helmholtz (PEH), definido como o lugar geométrico dos centros dos íons adsorvidos não especificamente (CARVALHO, 2003).



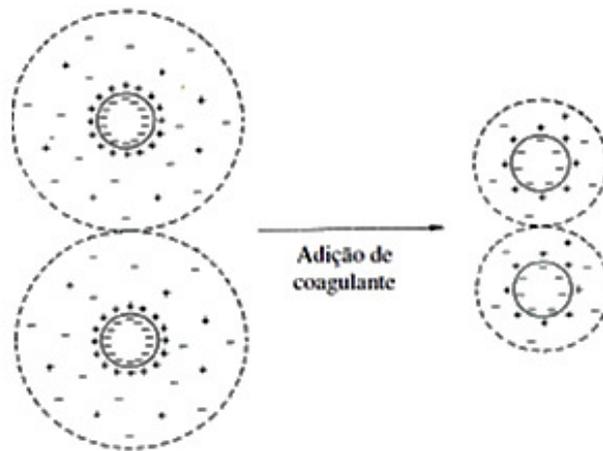
**Figura 3.11:** Estrutura da dupla camada elétrica (adsorção específica superequivalente) (PARKS, 1975).

Sempre que os íons adsorvidos especificamente reverterem o sinal da carga original da superfície sólida, diz-se que ocorreu uma adsorção super equivalente.

Quando as partículas de uma polpa deslocam-se em relação ao fluido, ou vice-versa, surge um plano no qual a dupla camada elétrica se parte. Esse plano não tem localização definida, mas pertence à camada de Gouy e deve estar próximo ao plano externo de Helmholtz, e é definido como Plano de Cisalhamento. Esse deslocamento diferencial entre o sólido e o fluido leva ao aparecimento de um potencial elétrico correspondente ao potencial do conjunto, que é denominado de potencial zeta.

Existem técnicas baseadas em fenômenos eletrocinéticos (eletroforese, eletroosmose, potencial de escoamento e potencial de sedimentação) que possibilitam a medição do potencial zeta. Existe um ponto onde a carga líquida do plano de cisalhamento se anula, ou seja, o potencial zeta é zero. Esse ponto é denominado ponto isoelétrico e é definido como sendo o logaritmo negativo da atividade de um dos íons determinadores de potencial que anula o potencial zeta.

Íons em solução podem causar um aumento na força iônica da suspensão, resultando em compressão da espessura da camada difusa e, logo, redução da repulsão entre as partículas, como mostrado esquematicamente na Figura 3.12. Coagulantes que atuam por este mecanismo são normalmente denominados eletrólitos indiferentes, uma vez que o íon não adsorve na superfície da partícula, mas apenas aumenta a força iônica do sistema (BRAGANÇA, 2008).



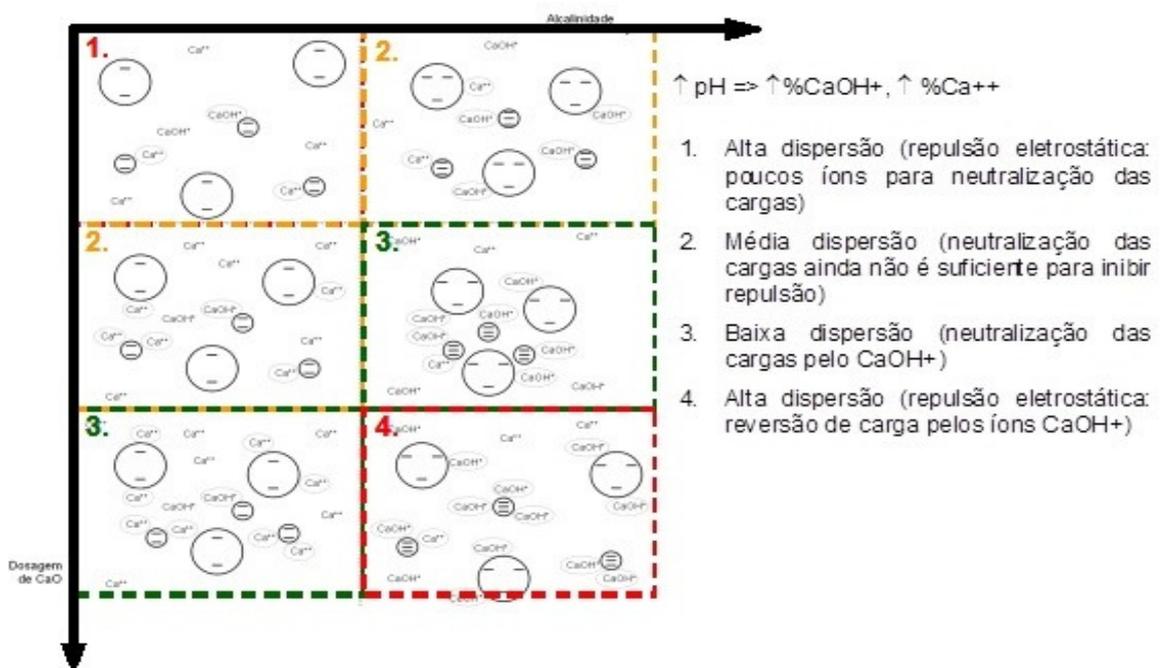
**Figura 3.12:** Compressão da dupla camada elétrica via adição de coagulantes (KIM, 1995).

Alguns autores evidenciaram que os íons de cálcio adsorvem-se na superfície da hematita. SAMPAIO (2002) comprovou, através de medidas de potencial zeta, que a adição de cal aumenta o potencial zeta da amostra de polpa para valores ligeiramente negativos ou positivos, confirmando o estado de agregação das partículas. A adsorção do cálcio na superfície mineral também foi comprovada pela análise química da água. IWASAKI *et al.* (1980) concluíram que os íons cálcio, na forma  $\text{CaOH}^+$  e em faixa de pH alcalino, eram responsáveis pelo aumento na instabilidade de uma dispersão constituída de polpa de minério de ferro.

Conforme descrito por ARAUJO *et al.* (2009), o íon  $\text{CaOH}^+$  pode se adsorver quimicamente, pois possui átomos capazes de formar ligações de hidrogênio. Caso a adsorção do  $\text{CaOH}^+$  seja suficientemente elevada, poderá ocorrer a reversão de carga do mineral e conseqüente repulsão. Nesses casos, os íons estariam contribuindo para alteração das forças eletrostáticas da superfície mineral e atuando no estado de agregação do sistema. Na Figura 3.13 encontra-se ilustrado como as concentrações dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  influenciam no estado de dispersão do sistema.

No cenário 1, tem-se uma baixa dosagem de cal no sistema, onde a menor concentração dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  não é capaz de neutralizar a carga superficial negativa das partículas de minério. Haverá nesse caso um maior afastamento entre as partículas de minério, criando um cenário de alta dispersão. No cenário 2, uma maior dosagem de cal irá aumentar a concentração dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , neutralizando a

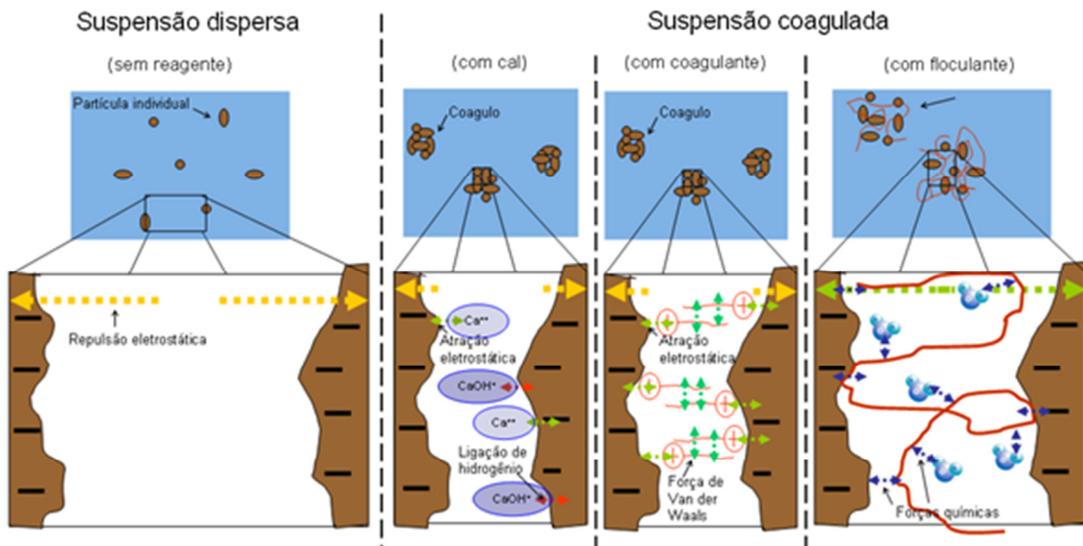
carga de uma maior quantidade de partículas de minério, promovendo uma maior aproximação das mesmas, deixando o sistema com uma menor dispersão. No cenário 3, uma dosagem extra de cal irá aumentar ainda mais a concentração dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , onde essa maior concentração será capaz de neutralizar a carga superficial de uma quantidade significativa de partículas de minério. Essa neutralização ocorre através da ligação dos íons de  $\text{CaOH}^+$  às partículas de minério por uma adsorção química, enquanto os íons de  $\text{Ca}^{2+}$  se ligam às partículas de minério por uma adsorção física. No cenário 4, uma dosagem excessiva de cal irá provocar uma concentração muito elevada dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , onde uma concentração significativa dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  na superfície do minério através de adsorção química e física, respectivamente, irá provocar a reversão da carga superficial das partículas, aumentando novamente a repulsão entre as mesmas e aumentando a dispersão do sistema.



**Figura 3.13:** Variação da dispersão do sistema em função do pH e da concentração dos íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  (TURRER *et al.*, 2010).

A cal age coagulando os óxidos de ferro, através de uma combinação de mecanismos, conforme descrito anteriormente. Na Figura 3.14 é ilustrado como os íons  $\text{CaOH}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  interagem com a superfície das partículas do minério de ferro reduzindo a repulsão eletrotástica entre as mesmas, em sistema onde foi adicionada a cal. É

ilustrado ainda os mecanismos usados por outros reagentes para promover uma maior aproximação entre as partículas de minério, sendo eles os coagulantes orgânicos e os floculantes.



**Figura 3.14:** Forças atuando em partículas minerais em suspensão sem reagentes, com cal, com polímeros coagulantes e floculantes (TURRER *et al.*, 2010).

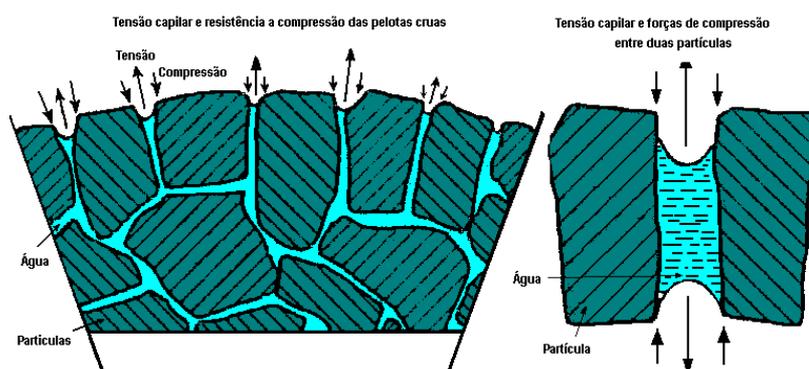
Os reagentes possuem mecanismos próprios para reduzir a barreira energética entre as duas partículas, favorecendo a agregação das mesmas quando elas se aproximam.

Segundo LINS (2000), outras forças também podem afetar a estabilidade de uma suspensão mineral, como é o caso de forças repulsivas de hidratação, forças atrativas hidrofóbicas entre partículas, etc.

### 3.3 INFLUÊNCIA DA DOSAGEM DE CAL NA ETAPA DE PELOTAMENTO

O processo de formação de pelotas cruas envolve uma fase sólida, sendo essa a mistura de finos de minérios, aditivos e agentes aglomerantes e uma fase líquida, a água, representa um importante papel nesse processo. As forças que se estabelecem nas interfaces sólido/líquido têm um efeito coesivo sobre o sistema partículas sólidas-líquido-ar. Estas forças interfaciais consistem na tensão superficial do líquido e nas forças capilares atuantes sobre as superfícies côncavas das pontes líquidas formadas entre as partículas de minério. Os efeitos de capilaridade têm importância significativa no mecanismo de formação das pelotas cruas. A água preenche os vazios intersticiais entre as partículas sólidas, formando um sistema capilar com múltiplas ramificações,

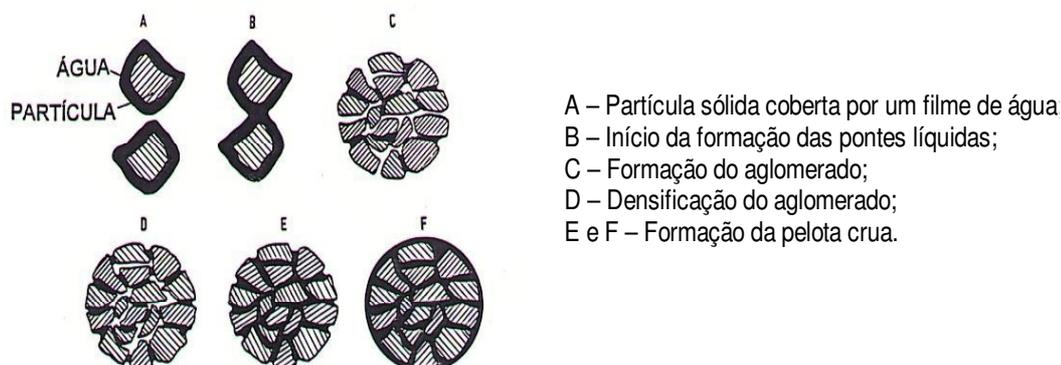
como ilustrado esquematicamente na Figura 3.15. Nas situações em que as extremidades dos capilares atingem a superfície externa da pelota (constituindo poros externos), a sucção capilar desenvolvida na interface ar/água provoca uma reação de igual intensidade sobre os grãos, mantendo as partículas unidas (MEYER, 1980).



**Figura 3.15:** Influência das forças capilares no mecanismo de aglomeração (MEYER, 1980).

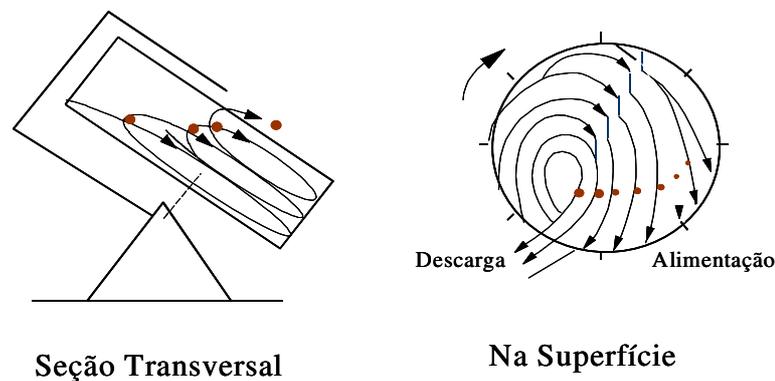
Os movimentos relativos entre as partículas irão favorecer a interação entre elas, através do aparecimento de diversos pontos de contato entre grãos e de superfícies, nas quais o maior número possível de capilares deve ser formado. As partículas da mistura para a pelletização, envolvidas por um filme de água (vide Figura 3.16A), tocam umas nas outras. Devido à tensão superficial do filme de água, pontes de líquido são formadas (Figura 3.16B), e como resultado do movimento das partículas dentro do disco de pelletização e da combinação individual das gotas de água, ocorre a formação de um aglomerado com diversas partículas (Figura 3.16C) (MEYER, 1980).

Na figura 3.16 são mostradas todas as etapas de formação do aglomerado até a sua forma final.



**Figura 3.16:** Estágios de formação das pelotas cruas (MEYER, 1980).

Na Figura 3.17 é exibido como o processo de aglomeração ocorre no interior dos discos de pelotamento, através da combinação de movimentos de rolagem das partículas dentro dos mesmos.



**Figura 3.17:** Formação das pelotas cruas nos discos de pelotamento (MEYER, 1980).

Entretanto, somente esta tensão superficial não é suficiente para manter a coesão dos grãos de um minério de densidade tão elevada quanto o minério de ferro. Para melhorar a resistência mecânica da pelota crua e, conseqüentemente, o rendimento do pelotamento, utilizam-se aglomerantes orgânicos ou inorgânicos. Esta adição tem como objetivo:

- a) Auxiliar no controle do crescimento das pelotas através do aumento da viscosidade da fase líquida dentro dos capilares;
- b) Aumentar a resistência da pelota crua, através de uma maior coesão entre as partículas de minério, para que a mesma possa resistir às quedas entre a saída do disco e a entrada no forno;
- c) Aumentar a resistência da pelota na etapa de secagem, onde a mesma é submetida a grandes pressões do fluxo de ar;
- d) Evitar o colapso da pelota crua nas etapas iniciais do aquecimento, devido a evaporação de água que ainda possa estar em seu interior.

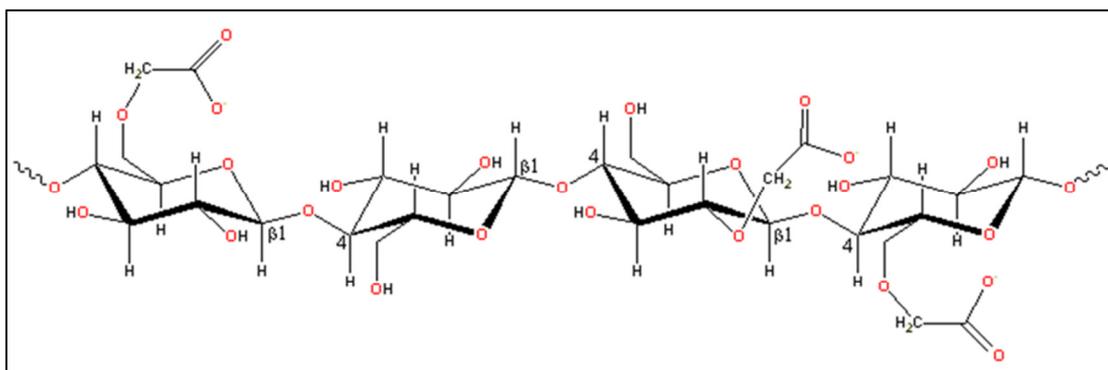
Os fatores mais importantes para a formação das pelotas cruas são: o tamanho médio, a mineralogia, distribuição granulométrica das partículas do minério e dos aditivos, assim como a estrutura de poros, a molhabilidade das partículas, o teor de umidade, as características químicas da mistura e o tipo e quantidade de aglomerante

utilizado (MEYER, 1980; CAPES, 1980). O controle dos parâmetros operacionais dos equipamentos tem forte influência na produtividade e qualidade das pelotas cruas formadas.

### 3.3.1 Aglomerante Orgânico

Os agentes aglomerantes atualmente utilizados no processo da Samarco são a bentonita e o aglomerante orgânico.

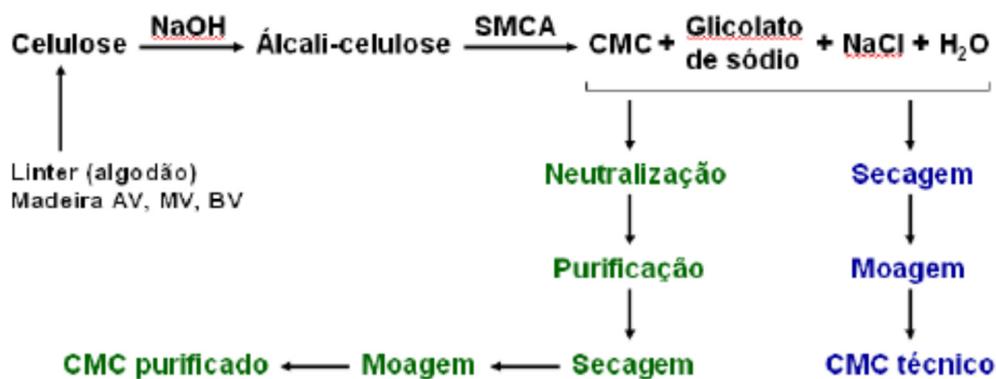
O aglomerante orgânico é constituído por uma mistura de ativadores e um polímero. O polímero dos aglomerantes atualmente utilizados na Samarco é a carboximetilcelulose (CMC), que atua como um “absorvedor” de água durante o pelotamento. Em solução aquosa, este polímero formará uma solução viscosa. Durante a rolagem das partículas nos discos de pelotização, as forças de compactação expulsam a água para a superfície do aglomerado, favorecendo o crescimento das pelotas. A velocidade com que a água é liberada para a superfície determina a velocidade de crescimento e o tamanho das pelotas. Como a CMC atua na viscosidade do líquido, ela terá um papel fundamental no desenvolvimento desta etapa. A estrutura da carboximetilcelulose é mostrada na Figura 3.18.



**Figura 3.18:** Estrutura da carboximetilcelulose (CHAPLIN, 2006).

A CMC é obtida a partir da celulose, que é um polímero natural, um homopolissacarídeo linear cuja unidade repetitiva é a celobiose. As propriedades físicoquímicas da CMC dependem do grau de substituição, do grau de polimerização, da uniformidade da substituição e da pureza do produto. A carboximetilcelulose

utilizada na produção de aglomerante orgânico é o CMC de grau técnico, contendo subprodutos de reação como cloreto de sódio e glicolato de sódio. A Figura 7 mostra de modo simplificado as etapas de obtenção do CMC. As fontes de celulose mais amplamente empregadas na fabricação da CMC são: o linter de algodão e madeiras de alta, média e baixa viscosidade.



**Figura 3.19:** Fluxograma simplificado da obtenção de CMC (DOELLINGER, 2011).

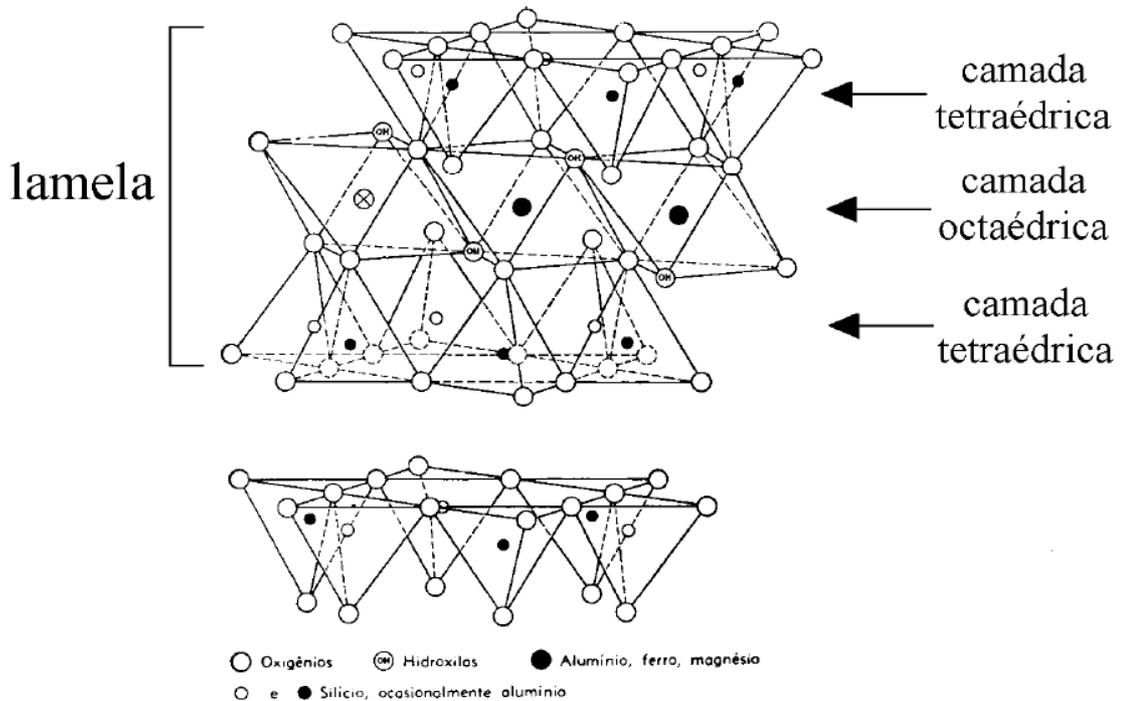
Segundo PEREIRA (2006), há um ganho de viscosidade devido à hidratação do polímero: o grupo carboximetil, quando em solução aquosa, libera o íon  $\text{Na}^+$  tornando-se aniônico e livre para hidratar-se. Desta forma, moléculas de água são adsorvidas às cadeias do polímero, que adquirem uma configuração alongada e elevam a viscosidade do sistema.

Entre os ativadores presentes na composição dos aglomerantes orgânicos, podemos citar o carbonato de sódio, metafosfato de sódio, tripolifosfato de sódio, citrato de sódio, silicato de sódio, soda cáustica, etc. Estes ativadores devem ser de natureza aniônica e possuem interações com a superfície do minério. Estas interações incluem o bloqueio efetivo da superfície, prevenindo a adsorção do polímero pelo minério. Além disso, os ativadores devem proporcionar a dispersão das partículas coloidais da limonita, as quais são normalmente encontradas na superfície da hematita.

### 3.3.2 Bentonita

As bentonitas são argilas do grupo das esmectitas (montmorilonitas), essa por sua vez são argilominerais que apresentam certas peculiaridades como inchamento

quando em contato com água, estrutura lamelar do tipo 2 para 1 e apresentam carga superficial entre 0,2 e 0,6 por fórmula unitária, Figura 3.20.



**Figura 3.20:** Representação esquemática da estrutura das esmectitas (DANA, 1983).

Os argilominerais montmoriloníticos foram formados pela desvitrificação e alteração química, em ambiente alcalino e com circulação de água restrita de materiais como tufo ou cinza vulcânica. O que confere a elevada absorção de água das bentonitas é o fato de que 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.

As bentonitas podem apresentar maior ou menor capacidade de inchamento. Essa propriedade depende de muitos fatores, tais como: natureza do cátion interplanar, carga lamelar, natureza dos sítios geradores de carga, interstratificação e presença de contaminantes (sais solúveis, substâncias orgânicas, etc.). De uma forma geral, o fator mais importante costuma ser a natureza do cátion interplanar, uma vez que se o íon sódio, que se hidrata muito facilmente, estiver presente em quantidades apreciáveis, a esmectita apresenta alta capacidade de inchamento, enquanto que se outros íons, como o

cálcio ou o potássio, forem predominantes, sua hidratação pouco intensa não permite uma grande separação das camadas (DARLEY e GRAY, 1988).

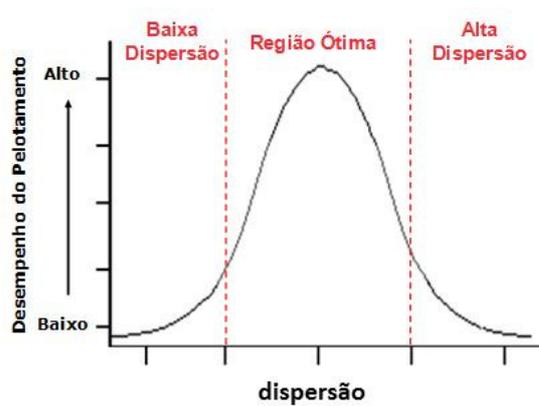
A quantidade de água entre as camadas depende principalmente da tendência à hidratação do cátion de compensação e da energia de interação entre as lamelas (STUMM, 1992).

O íon  $\text{Na}^+$  tem maior facilidade de hidratação do que o  $\text{Ca}^{2+}$ . Além disso, quando as lamelas têm suas cargas compensadas pelo íon sódio, de menor valência, apresentam-se mais afastadas devido à menor energia de interação, de modo a permitir a penetração de uma maior quantidade de água no espaço entre as lamelas. Isso explica porque a capacidade de expansão da bentonita sódica é muito maior do que a do tipo cálcica.

### 3.3.3 Influência da dosagem de cal na etapa de aglomeração

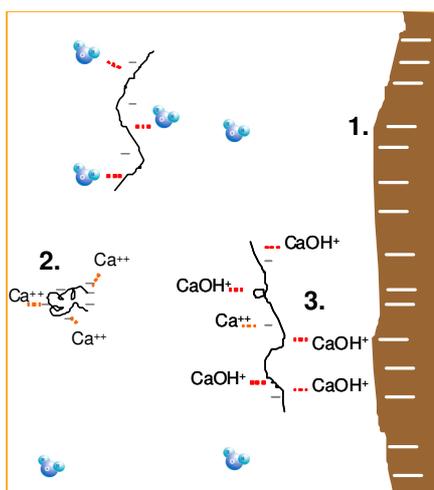
No pelotamento, não é desejável a ocorrência de uma elevada coagulação do minério, pois isso acarretaria na obtenção de uma pelota seca no seu interior, mesmo com alta umidade superficial. Neste caso, a pelota apresentaria baixa resistência mecânica e trincaria/quebraria durante o transporte do disco de pelotização até o forno de endurecimento.

Também não é desejável no pelotamento uma elevada dispersão das partículas de minério de ferro. As elevadas cargas das partículas de minério de ferro dificultarão a formação das pelotas nos discos. A instabilidade do sistema levará à formação de pelotas com elevada umidade superficial, dificultando a etapa de queima. Na Figura 3.21 é apresentado qualitativamente como o desempenho do pelotamento poderia estar associado ao grau de dispersão do minério.



**Figura 3.21:** Desempenho do pelotamento em função da dispersão do minério (DOELLINGER, 2011).

Considerando as ocorrências na área industrial, o minério processado no pelotamento, com elevadas dosagens de cal, apresentou um comportamento não satisfatório na etapa de aglomeração. Nesta situação, observou-se uma dificuldade em controlar o crescimento das pelotas e as mesmas apresentavam uma elevada umidade superficial. Acredita-se que uma elevada dosagem de cal poderia estar prejudicando a etapa de pelotamento, e ainda reduzindo a eficiência do agente aglomerante, como aglomerante orgânico ou bentonita. Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  podem interagir diretamente com as cadeias do polímero orgânico, em especial a carboximetilcelulose (CMC), que é o principal componente do aglomerante orgânico e desempenha importante papel no processo de controlar o crescimento das pelotas cruas, alterando a carga dos grupos carboxílicos e tornando-os ligeiramente negativos (teoria da dupla camada elétrica). Com isso, parte do polímero presente no aglomerante pode precipitar na superfície das partículas de minério, possivelmente por atração eletrostática, conforme ilustrado na Figura 3.22.



**Figura 3.22:** Interação dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  com as cadeias da CMC (TURRER *et al.*, 2010).

Quando esta precipitação ocorre, a CMC deixa de interagir com as moléculas de água para aumentar sua viscosidade. O aglomerante perde, então, parte de suas características, o que levará a uma maior dificuldade no controle da umidade superficial das pelotas, com consequente queda na qualidade das pelotas produzidas (ARAUJO *et al.*, 2009).

Em teores baixos de cal no *pellet feed*, os aglomerantes são capazes de apresentar um desempenho que possibilite a obtenção de pelotas com boa qualidade. A partir de uma determinada concentração de CaO é atingida, adições extras de aglomerante geralmente não resultará em uma melhora no pelotamento.

O controle da dosagem de cal passaria então a ser um parâmetro de controle importante para a etapa de pelotamento. Valores elevados de dosagem de cal podem alterar significativamente o estado de agregação das partículas de minério, levando à formação de pelotas fora de especificação, mesmo quando os principais parâmetros físicos do *pellet feed* estiverem adequados. As principais dificuldades a serem encontradas estarão no controle do crescimento das pelotas cruas, na excessiva formação de cachos e na elevada umidade superficial das mesmas.

Um descontrole no crescimento das pelotas irá impactar na eficiência do pelotamento e na produtividade das plantas. Outra consequência será o aumento significativo da carga circulante, em função do maior percentual de pelotas fora da faixa de tamanho objetivada, entre 8,0 e 18,0mm, sendo essa a faixa de corte das mesas de rolos dos discos. Estudos realizados por NUNES (2007) avaliaram a influência da carga

circulante do pelotamento na qualidade física das pelotas cruas e queimadas. Nesses estudos foi avaliado a influência da granulometria da carga circulante e o percentual da carga circulante na qualidade das pelotas produzidas.

O aumento da carga circulante irá aumentar a carga nos discos, para manter um mesmo nível de produtividade das plantas, isso irá impactar na distribuição granulométrica das pelotas produzidas nos discos, bem como na qualidade das mesmas. NUNES (2007) identificou em seus estudos que a quantidade da carga circulante e sua granulometria contribuem significativamente para a geração de pelotas nucleadas, que possuem um menor nível de qualidade em relação às pelotas não nucleadas.

O entendimento da influência de aditivos como a cal hidratada na etapa de pelotamento e na dinâmica de crescimento das pelotas cruas é de grande importância para garantir a eficiência do pelotamento e a qualidade final das pelotas.

## 4. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a descrição da metodologia utilizada para coleta, preparo e caracterização das amostras de polpa de minério de ferro. Faz-se também a descrição dos testes de pelotamento e queima, que foram realizados com as amostras de *pellet feed* a partir da polpa e preparadas com a adição de uma solução de cal, objetivando a obtenção de amostras de *pellet feed* com diversos teores de CaO. A metodologia inclui, ainda, a análise dos principais parâmetros de qualidade das pelotas cruas e queimadas obtidas em cada teste. A metodologia utilizada para a realização dos testes está dividida em seis etapas:

- Obtenção da amostra de polpa;
- Preparo e caracterização do *pellet feed*;
- Testes de pelotamento no disco piloto;
- Avaliação da qualidade das pelotas cruas;
- Testes de queima no forno piloto;
- Avaliação da qualidade das pelotas queimadas.

### 4.1. OBTENÇÃO DE AMOSTRA DE POLPA

Para realização dos testes, foram utilizadas amostras de polpa de minério de ferro coletadas no *underflow* do espessador de concentrado em Germano - MG, antes da etapa de adição de cal no mineroduto. Foram coletadas aproximadamente nove toneladas de polpa, considerando a proporção de 70% de minério de ferro e 30% de água.

A polpa coletada foi armazenada em tambores e posteriormente desaguada. Depois de desaguado, o minério, *pellet feed*, foi secado em temperatura ambiente, depois desagregado e homogeneizado. Em seguida, o mesmo foi colocado em tambores, devidamente lacrados, e enviado para Ponta Ubu, sendo armazenados no Laboratório de Desenvolvimento de Processos - LDP.

## 4.2. PREPARO E CARACTERIZAÇÃO DO *PELLET FEED*

A amostra de *pellet feed* recebida em Ubu, aproximadamente cinco toneladas, foi caracterizada através das análises listadas a seguir:

- Análises químicas: determinação dos elementos presentes (Ferro total - FeT, Óxido de ferro – FeO, Sílica - SiO<sub>2</sub>, Alumina - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Óxido de cálcio – CaO, Óxido de magnésio – MgO, PPC – Perda por calcinação, Fósforo – P e pH – potencial hidroeletrolítico).
- Análises físicas: determinação do percentual de sólidos com granulometria maior que 200 mesh (+200 #), percentual de sólidos com granulometria menor que 325 mesh (-325 #), da área superficial das partículas (cm<sup>2</sup>/g), do peso específico, do grau de dispersão (%) e da umidade do *pellet feed* (%).

### 4.2.1 Análise química

Os procedimentos para realizar as análises químicas dependem do elemento químico a ser determinado. Para determinar o teor de FeO foi utilizado o procedimento interno - U-QQ-Q08, regido pela norma ISO 9035 - IRON ORES - DETERMINATION OF ACID SOLUBLE IRON II - CONTENT TITRIMETRIC METHOD. Esta norma estabelece o procedimento para a determinação do teor de FeO em amostras de minério de ferro.

Para determinar o teor de Fe Total foi utilizado o procedimento interno U-QQ-Q07 - DETERMINAÇÃO DE FERRO TOTAL. Estabelece o procedimento para determinação do teor de ferro total em amostras de minério de ferro e minério de ferro reduzido, e é regido pela norma ISO 9507 - IRON ORES - DETERMINATION OF TOTAL IRON CONTENT – TITANIUM (III) CHLORIDE REDUCTION METHODS.

Os teores dos demais elementos foram determinados pelo procedimento interno U-QQ-Q11. Esta norma estabelece o procedimento para determinação dos teores de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO e P em minérios de ferro por espectrometria de emissão atômica em plasma de acoplamento indutivo (ICP-AES). É regido pela norma ISO 11535 - IRON ORES - DETERMINATION OF VARIOUS ELEMENTS - INDUCTIVELY COUPLED PLASMA ATOMIC EMISSION SPECTROMETRIC

METHOD. O espectrômetro de emissão atômica utilizado é da marca CIROS, modelo CCD.



**Figura 4.1:** Espectrômetro de emissão por plasma.

Foi determinada também a basicidade binária (B2) da amostra. Esta é a relação entre o óxido de cálcio (%) e a sílica (%) contida no minério. O cálculo da basicidade binária é feito conforme a Eq. (4.1):

$$B2 = (\%CaO) / (\%SiO_2) \quad (4.1)$$

#### 4.2.2 Perda por calcinação – PPC

A perda por calcinação ou perda ao fogo consiste na calcinação de uma amostra, de massa conhecida, em uma estufa (Figura 4.2), para determinar a quantidade de matéria volátil ou não volátil presente na amostra, como umidade e matéria orgânica, por exemplo, que são removidos por ação da alta temperatura. Este ensaio foi realizado por meio de procedimento interno, U-QQ-Q05, PROCEDIMENTO PARA DETERMINAÇÃO DE PERDA POR CALCINAÇÃO EM MINÉRIO DE FERRO.

O cálculo do percentual de perda por calcinação da amostra é feito conforme a Eq. (4.2):

$$\%PPC = [(m2 - m3) / (m2 - m1)] \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

m1 = Massa, em gramas, do cadinho.

$m_2$  = Massa, em gramas, do conjunto cadinho + amostra antes da calcinação.

$m_3$  = Massa, em gramas, do conjunto cadinho + amostra após calcinação.



**Figura 4.2:** Mufla.

Para medir os valores de massa foi utilizada uma balança da marca Toledo, modelo 2185FS (vide Figura 4.3).



**Figura 4.3:** Balança Toledo.

#### 4.2.3 Potencial hidrogeniônico – pH

Para determinar o pH das soluções foi utilizado um pHmetro marca Micronal S.A, modelo AJX-512 (Figura 4.4). Foi utilizado o procedimento interno U-QQ-Q42, DETERMINAÇÃO DE PH EM AMOSTRAS DE *PELLET FEED*, MISTURA PARA PELOTAMENTO E OUTRAS SOLUÇÕES, bem como a operação e calibração de pHmetros. O mesmo consiste em um eletrodo que é acoplado a um potenciômetro – aparelho que mede a diferença de potencial da solução.



**Figura 4.4:** pHmetro digital com microprocessador.

#### 4.2.4 Análise física

A norma que regulamenta este ensaio é a ABNT NBR ISO 4701:2009 - MINÉRIOS DE FERRO E PRÉ-REDUZIDOS - DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO. Esta norma especifica os métodos que foram empregados para determinação da distribuição granulométrica de minério de ferro por peneiramento utilizando peneiras, como as mostradas na Figura 4.5. A distribuição granulométrica é expressa em termos de massa e percentagem de massa, passante ou retida, nas peneiras selecionadas. As peneiras têm como unidade de referência o mesh (#) que representa um número de aberturas na malha da peneira por polegada linear. As peneiras utilizadas nos testes foram: 325 # (0,045 mm), 200 # (0,074 mm) e 100# (0,149 mm).



**Figura 4.5:** Peneira granulométrica de bancada.

A área superficial do *pellet feed* é definida como a de uma unidade de massa, expressa em centímetros quadrados por grama de amostra ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) e foi determinada utilizando-se o método de permeabilidade ao ar (método de Blaine, *vide* Figura 4.6). O

ensaio consiste em fazer passar uma quantidade determinada de ar através de uma camada preparada de minério de ferro de porosidade definida. O número e o tamanho dos poros da camada preparada e o tamanho das partículas determinam a velocidade do fluxo de ar através da mesma. Foi utilizado o procedimento interno U-QF-Q65, DETERMINAÇÃO DA ÁREA SUPERFICIAL DAS PARTÍCULAS.



**Figura 4.6:** Permeabilímetro Blaine.

A densidade é a massa por unidade de volume de um determinado material, no caso do *pellet feed* é expresso em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ). Foi determinado pelo procedimento interno U-QQ-Q20, DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO. Esta norma estabelece procedimento para determinação da densidade real (massa específica) utilizando o Picnômetro (mostrado na Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Picnômetro a hélio.

O estado de agregação ou dispersão de sólidos imersos em um meio aquoso é definido pela interação entre as partículas, quando elas apenas colidem umas com as outras. A dispersão do *pellet feed* é medida pelo grau de dispersão de uma suspensão. O

procedimento utilizado foi o ensaio de dispersão. Os materiais utilizados foram: Picnômetro de 25 mL (1), proveta adaptada de 250 mL (2), balança com precisão de quatro casas decimais (3) e cronômetro, conforme Figura 4.8. O tempo padrão usado no teste é de 10 minutos. Após esse tempo a válvula da proveta é aberta e o sobrenadante é coletado em um béquer. Depois o mesmo é homogeneizado e o sobrenadante é transferido para um picnômetro até que a solução comece a transbordar.



**Figura 4.8:** Materiais do teste de dispersão.

O cálculo da densidade da suspensão é feito conforme a Eq. (4.3):

$$DS = (N - A) / (B - A) \quad (4.3)$$

Onde:

DS: Densidade da suspensão (g/ml);

A: Massa do picnômetro vazio (g);

B: Massa do picnômetro preenchido com água destilada (g);

N: Massa do picnômetro preenchido com a solução com suspensão (g);

O cálculo para o grau de dispersão, GD, é feito conforme a Eq. (4.4):

$$GD (\%) = (DS - 1) \times 25 \quad (4.4)$$

#### 4.2.5 Umidade

Os testes foram realizados conforme a norma ABNT NBR ISO 3087:2012 MINÉRIOS DE FERRO - DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE UM LOTE. ESTA NORMA ESPECIFICA UM MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE UM LOTE DE MINÉRIO DE FERRO. O método tradicional é gravimétrico e utiliza uma estufa de secagem com temperatura entre 105 e 110°C. A amostra é seca através do ar quente e determina-se o conteúdo de umidade pela diferença de massa final e inicial com auxílio de uma balança analítica. Esse método de secagem é um procedimento de referência com boa reprodutibilidade. O tempo de medição dura em média 1 hora. O cálculo da porcentagem de umidade é feito conforme a Eq. (4.5):

$$\text{Umidade (\%)} = \left[ \frac{M_i - M_f}{M_i} \right] \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

$M_i$  = massa inicial de *pellet feed* (g)

$M_f$  = massa final *pellet feed* (g)

#### 4.3. TESTE DE PELOTAMENTO NO DISCO PILOTO

Após a caracterização, a amostra de *pellet feed* foi prensada na prensa piloto. O objetivo foi aumentar a área superficial das partículas do mesmo, de forma a atingir um valor mais próximo dos valores mais comuns na área industrial. Após ser prensado, foi feita uma nova caracterização física, utilizando as normas e procedimentos citados no item 4.2. O preparo do *pellet feed* e os testes de pelotamento foram realizados conforme as seguintes etapas.

##### 4.3.1 Ajuste da umidade e teor de CaO

Foram preparados, para cada ensaio, 250 kg de *pellet feed*. Essa massa foi dividida em 2 lotes de 125 kg. Para cada batelada de 125 kg foi adicionada uma solução de cal hidratada com uma concentração tal que o percentual final de CaO do *pellet feed*

de cada par de lotes fosse 0,08%; 0,14%; 0,20% e 0,26% de CaO, respectivamente. Como o CaO do pellet feed coletado estava em 0,02%, esse foi considerado o teste em branco, no qual não foi adicionado a solução de cal. Estes valores foram selecionados de forma a cobrirem a faixa de valores mais comuns na área industrial, 0,06 a 0,10% e ainda avaliar o efeito de valores mais elevados de CaO em função da dosagem de cal.

A cal hidratada utilizada nos ensaios foi a mesma que é utilizada no mineroduto, na unidade industrial de Germano. As soluções de cal foram preparadas no Laboratório Sólido-Líquido da Samarco em Ubu, conforme descrito a seguir.

Para preparar a solução de cal (cal hidratada), foi determinada a umidade e a porcentagem desejada de CaO no *pellet feed* após a mistura. Em todos os testes, a umidade objetivada foi 10,0%. Para a faixa de área superficial das partículas do *pellet feed* que foi utilizado nos testes, entre 2000 a 2100 cm<sup>2</sup>/g, a umidade do mesmo em 10,0% proporcionou uma condição mais favorável para o pelotamento, eliminando-se a possibilidade da umidade ser um ruído durante os testes. Desta forma, todos os ensaios, sob o ponto de vista de umidade do *pellet feed*, foram realizados com uma umidade adequada e favorável para um pelotamento dentro do esperado.

Com o resultado da análise de umidade, foi calculada a massa de água (g) necessária para ajustar a umidade do *pellet feed* em 10,0%, através da adição da solução de cal. O ajuste da umidade e do percentual de CaO foi feito utilizando um procedimento para preparo e adição da solução de cal ao *pellet feed*, como é demonstrado a seguir. O cálculo é feito conforme a Eq. (4.6):

$$Ma = (Mpf * 10) * [(100 - Ui) * Ud] / [(100 - Ud) - Ui] \quad (4.6)$$

Onde:

Ma: Massa de água a ser acrescentada (g).

Mpf: Massa de *pellet feed* por batelada (kg);

Ui: umidade inicial (%);

Ud: umidade desejada (%).

A água destilada e deionizada, utilizada para preparar a solução de cal, foi cedida pelo laboratório de análises químicas da Samarco em Ubu, que conta com um

equipamento próprio para esta finalidade (marca Tex Tech, modelo Q341-210, Figura 4.9). Foi usada tal água para não houvesse qualquer tipo de interferência química na solução.



**Figura 4.9:** Destilador de água tipo pilsen.

Definido o teor de CaO final desejado para a mistura (0,02%, 0,08%, 0,14%, 0,20% ou 0,26%), foi calculada então a massa de cal a ser acrescentada na solução. O teor de CaO da amostra de cal utilizada em todos os testes foi determinada pela análise química da mesma (ver procedimento acima) e o resultado foi de 88,1%. O cálculo é feito conforme a Eq. (4.7):

$$Mc = ((((((Pd - 0,02) / 100) * Mpf) / Pc) * 100) / 2) * 1000 \quad (4.7)$$

Onde:

Mc: Massa de cal a ser acrescentada (g);

Pd: Porcentagem de CaO desejada na mistura (%);

Mpf: Massa de *pellet feed* por batelada (kg);

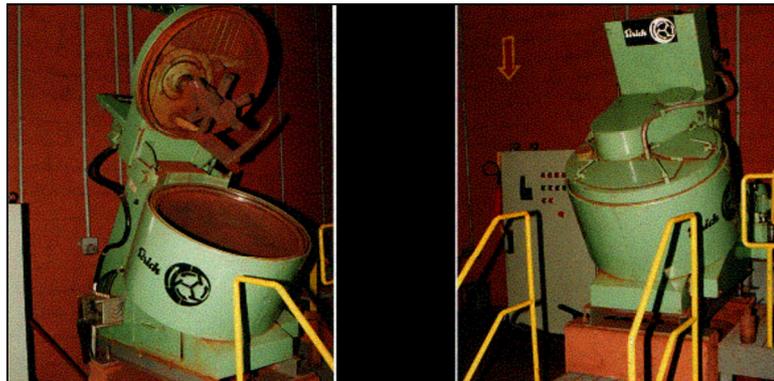
Pc: Porcentagem de CaO da cal (%).

Feitos os cálculos, a massa de água e a massa de cal foram colocadas em um balde, onde a solução foi mantida em agitação por 60 minutos, para homogeneização e normalização do pH e da temperatura da solução. A agitação foi feita por um agitador (marca, modelo, impelidor de aço inoxidável), ilustrado na Figura 4.10.



**Figura 4.10:** Agitador mecânico de bancada.

Terminada a agitação, os valores de pH foram registrados e a solução foi adicionada à massa de *pellet feed* no misturador (Figura 4.11), onde a mistura do *pellet feed* com a solução de cal foi feita por 20 segundos. Feito este procedimento para as duas bateladas de 125 kg, o *pellet feed*, com a umidade e o teor de CaO ajustados para as especificações do teste, foi acondicionado em um tambor que foi tampado, e assim permaneceu por 48 horas.



**Figura 4.11:** Misturador Eirich modelo R-08W.

#### 4.3.2 Balanço de massas

Utilizando os resultados obtidos na etapa de caracterização do *pellet feed* e insumos, um balanço de massas desenvolvido em uma planilha Excel foi utilizado para determinação da quantidade de cada constituinte para as misturas estabelecidas.

### 4.3.3 Mistura

Passado o período de 48 horas, outra alíquota representativa de 5 kg de cada lote foi retirada para ser caracterizada. A umidade foi determinada novamente, e se necessário, foi ajustada para 10%. Desta forma, cada lote de *pellet feed* estava pronto para a adição dos insumos (carvão, calcário e agente aglomerante) e realização dos testes de pelotamento.

Os insumos utilizados na composição das misturas (calcário moído, carvão moído, bentonita ou aglomerante orgânico) foram coletados nas linhas de mistura das usinas de pelotização da SAMARCO. Os mesmos foram armazenados em recipientes plásticos hermeticamente fechados, após criteriosa etapa de homogeneização, para evitar possíveis contaminações com outros produtos ou a absorção de água.

A composição das misturas foi elaborada com 240 kg de *pellet feed* cada. As dosagens de carvão moído (antracito) e calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) foram padronizadas para todos os testes. Os agentes aglomerantes, aglomerante orgânico e a bentonita, foram dosados em 0,035% e 0,40% (porcentagem em massa), respectivamente, para cada tipo de mistura. A porcentagem de cal ( $\text{CaO}$ ) variou na mistura da seguinte forma: 0,02%, 0,08%, 0,14%, 0,20% e 0,26%, tanto para os testes com aglomerante orgânico quanto para os testes com bentonita. O *pellet feed* com os respectivos insumos foram misturados no misturador, por um 1 minuto.

### 4.3.4 Pelotamento no disco piloto

Com cada par de lotes de minério (total 240 kg), preparado na etapa anterior, foi realizado um teste completo no disco piloto no *pot grate* (Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Samarco). O objetivo do teste foi avaliar como a concentração de  $\text{CaO}$  no *pellet feed* através da adição de cal hidratada na forma de leite de cal poderia influenciar no processo de pelotamento (aglomeração) e nos parâmetros de qualidade das pelotas cruas e queimadas. Os testes de pelotamento foram realizados conforme procedimento interno.

O disco de pelotamento piloto utilizado nos testes é o equipamento da marca Dravo-Lurgi, modelo W-3511-1, que possui um diâmetro de 1 metro e a profundidade

da panela é de 20 cm. A inclinação foi mantida em 45° e a alimentação nominal em 0,8 t/h/m<sup>2</sup>. O mesmo possui 3 raspadores, sendo 2 raspadores de fundo e um raspador lateral. A rotação foi mantida em 15 rpm. O sistema de alimentação é móvel, permitindo alterar o ponto de alimentação do disco.

O procedimento para os testes consiste, basicamente, em alimentar a mistura continuamente no disco até a formação das pelotas cruas. A posição padrão do fim de curso da correia do alimentador é próxima a borda esquerda do disco durante os primeiros 08 minutos de pelotamento, sendo que a partir desse tempo a alimentação é voltada para o meio do disco até o final do ensaio. Do oitavo até o décimo segundo minuto de pelotamento, as pelotas geradas e coletadas na saída do disco são descartadas. Após 12 minutos de pelotamento, as pelotas geradas são coletadas em baldes a cada um minuto, para depois realizar o peneiramento e classificação de tamanho das mesmas. Para um teste de pelotamento completo, com 240 kg de mistura e taxa de alimentação constante, o tempo total do teste varia entre 22 e 23 minutos. Desta forma podemos dividir o teste de pelotamento em três etapas:

- 1ª Etapa: 0 a 8 minutos: formação do aglomerado e crescimento das pelotas;
- 2ª Etapa: De 8 a 12 minutos: homogeneização do tamanho das pelotas e melhoria no acabamento superficial;
- 3ª Etapa: A partir de 12 minutos: formação final das pelotas e amostragem para classificação por tamanho.

Na Figura 4.12 é mostrado o esquema do disco piloto, sistema de alimentação e seus principais componentes, utilizado nos testes de pelotamento.



**Figura 4.12:** Disco piloto e sistema de alimentação de *pellet feed*.

Após a realização de cada pelotamento, as pelotas cruas geradas foram submetidas aos seguintes testes para aferir a sua qualidade:

- Medição do diâmetro médio;
- Teste de quedas;
- Compressão da pelota crua úmida (CPCU);
- Compressão da pelota crua seca (CPCS).

#### 4.3.5 Análise das propriedades das pelotas cruas

As análises foram feitas utilizando-se o procedimento interno U-QF-Q61, AMOSTRAGEM E TESTE COM AMOSTRA DE PELOTAS CRUAS PARA DETERMINAÇÃO DAS QUALIDADES FÍSICAS DAS PELOTAS.

##### 4.3.5.1 Diâmetro médio das pelotas cruas

As pelotas cruas geradas nos testes de pelotamento foram classificadas em peneiras manuais quadradas, com as seguintes dimensões: 500 x 500 x 100 mm. As malhas utilizadas foram: 26,5 mm, 25,4 mm, 22,4 mm 21,0 mm 19,0 mm, 16,0 mm, 12,5 mm, 9,0 mm, 8,0 mm e 6,3 mm. Para cada peneira utilizada, determina-se a massa retida na mesma e calcula-se a porcentagem (%) que essa massa representa em relação à massa total. Com os resultados obtidos, determina-se o diâmetro médio das pelotas conforme a Eq. (4.8):

$$D_{m\u00e9dio} = \sum(\%retida \times \Phi), \quad \Phi = \left[ \left( \#_{superior} - \#_{inferior} \right) / 2 \right] * 100 \quad (4.8)$$

onde:

$D_{m\u00e9dio}$  = diâmetro médio (mm);

%Retida = porcentagem de pelotas retidas na peneira;

# = malha da peneira (mm).

Para a classificação de pelotas cruas e queimadas foi utilizado o jogo de peneiras Manupem, fabricadas por Telastem Peneiras Análise LTDA (Figura 4.13).



**Figura 4.13:** Peneiras granulométricas quadradas.

#### 4.3.5.2 Teste de quedas

O equipamento utilizado para os testes de quedas é composto de duas placas de aço presas a uma haste de ferro e distanciadas entre si em 45 cm (Figura 4.14). Primeiro deve-se classificar as pelotas cruas úmidas na faixa de 16,0 x 12,5 mm e escolher 10 pelotas sem nenhuma trinca. Em seguida, coloca-se cada pelota na altura da primeira placa e a deixa cair livremente sobre a segunda, repetindo a operação quantas vezes forem necessárias, até a pelota apresentar uma trinca por menor que seja. No final, anota-se o número de quedas daquela pelota, incluindo a queda em que a pelota trincou. Repetem-se as operações com as 10 pelotas. O resultado é dado por intermédio da média aritmética das quedas das 10 pelotas ensaiadas, sendo comumente expresso em número de quedas por pelota e com uma casa decimal.



**Figura 4.14:** Equipamento para ensaio de teste de quedas.

#### 4.3.5.3 Teste de resistência à compressão das pelotas cruas

Para a determinação da resistência à compressão das pelotas cruas foi utilizada uma prensa manual. As pelotas são individualmente submetidas à ação de uma força compressiva uniaxial. Este ensaio consiste em colocar uma pelota entre duas placas paralelas e comprimi-la, até que ocorra a ruptura da mesma. Este procedimento é repetido em 20 pelotas selecionadas na amostra (pelotas sem trincas).

O teste de compressão é realizado em pelotas cruas úmidas e secas. Em pelotas úmidas é denominado de resistência à compressão das pelotas cruas úmidas (CPCU). Em pelotas secas, é denominado de resistência à compressão das pelotas cruas secas (CPCS). Para este teste, as pelotas passam por uma etapa de secagem em uma estufa, a 100°C, durante 2 horas. A máquina de compressão para pelota crua é da marca Chatillon.



**Figura 4.15:** Máquina de compressão manual da pelota crua.

#### 4.5.3.4 Umidade das pelotas cruas

Para a determinação da umidade das pelotas cruas, 100 gramas de pelotas são colocadas em uma estufa a 100°C, durante 2 horas e o cálculo, conforme a Eq. (4.9), do percentual de umidade é realizado através da expressão demonstrada a seguir, conforme a norma ABNT NBR ISO 3087:2012.

$$\text{Umidade (\%)} = \left[ \frac{Pu - Ps}{Pu} \right] \times 100 \quad (4.9)$$

Onde:

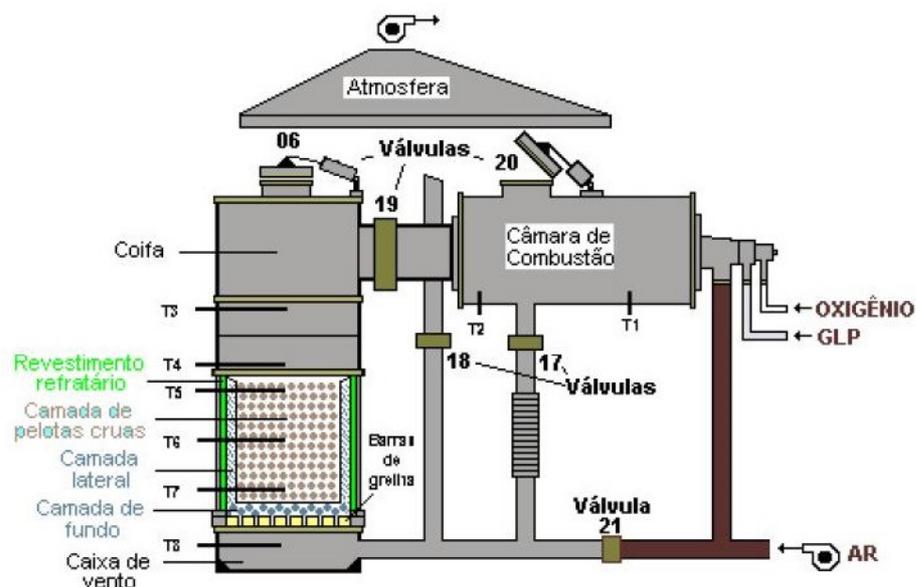
$P_u$  = Massa das pelotas úmidas

$P_s$  = Massa das pelotas secas

#### 4.4. TESTE DE QUEIMA NO FORNO PILOTO

Para cada teste de pelotamento foi realizado um teste de queima no forno piloto com as pelotas cruas geradas na etapa anterior conforme procedimento interno.

O forno piloto é um equipamento planejado para simular o ciclo térmico utilizado industrialmente no processo de endurecimento ou queima das pelotas cruas. A Figura 4.16 ilustra o equipamento com seus principais componentes. O equipamento usado nos ensaios é mostrado na Figura 4.17.



**Figura 4.16:** Esquema ilustrativo do forno *pot grate* (COTA, 2004).

- Câmara de combustão: recipiente onde o GLP (gás liquefeito de petróleo) é queimado para o aquecimento do ar de processo. O ar aquecido é direcionado à panela em fluxo ascendente ou descendente, dependendo da etapa do processo em simulação.

- Panela: recipiente onde as pelotas cruas são depositadas para a simulação da queima. A mesma é revestida internamente por refratários e possui três termopares em pontos diferentes da camada de pelotas para a medição da temperatura durante o processo.

- Caixa de vento: parte sob a panela por onde passam o ar quente responsável pela secagem ascendente, o ar frio utilizado no resfriamento e os gases provenientes do processo de secagem descendente e da queima.

- Coifa: acessório externo localizado sobre a panela, que tem por funções canalizar o ar aquecido sobre a camada de pelotas cruas durante as etapas de secagem descendente e queima, e o fluxo de ar ascendente das etapas de secagem e resfriamento para um sistema de exaustão e descarga para atmosfera.

- Sistema de controle: programa computacional que permite a simulação do tempo de permanência das pelotas nas zonas de secagem, de queima e de resfriamento, em função do ritmo de produção que se quer estabelecer e do perfil de temperaturas em cada etapa, de forma a simular o processo industrial.

- Sistema de medição de temperaturas: composto por conjunto de termopares para medição de temperaturas em todas as regiões do forno. Os termopares T4, T5, T6, T7 e T8 medem as temperaturas da coifa, das camadas que compõem o leito de pelotas e da caixa de vento, respectivamente.

- Válvulas de controle de fluxo gasoso, para simulação do processo de queima.

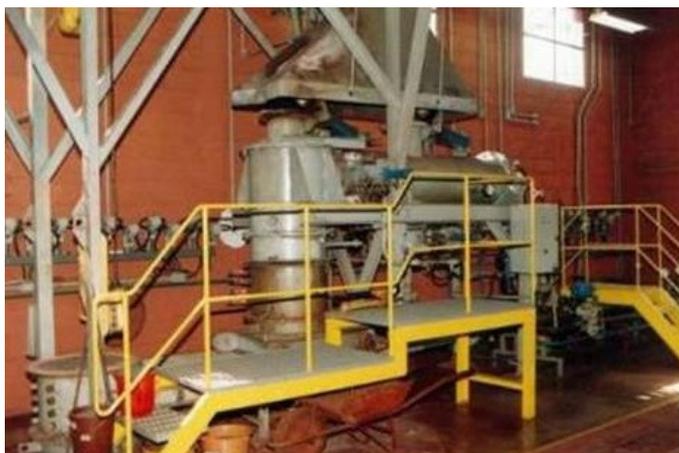
#### 4.4.1 Preparação das pelotas cruas para queima no forno de *pot grate*

Para minimizar os efeitos da distribuição granulométrica das pelotas do leito no fluxo gasoso, prepara-se a panela da seguinte forma:

- A camada de fundo, com altura de 7 cm, é preenchida com pelotas queimadas acima de 16 mm;

- A camada lateral é preenchida com *pellet screening* (produto do peneiramento das pelotas) com granulometria entre 3,15 e 8,0 mm;

- Pelotas cruas provenientes da etapa de pelotamento, com distribuição granulométrica previamente determinada (50% das pelotas entre 16,0 e 12,5 mm e 50% entre 12,5 e 9,0 mm).



**Figura 4.17:** Forno Piloto - *pot grate*.

#### 4.4.2 Queima das pelotas no forno de *pot grate*

Após a preparação do leito de pelotas na panela do *pot grate*, as mesmas passarão pela etapa de endurecimento conforme programado. Neste estudo, as condições de queima no forno piloto foram ajustadas de forma a simular o ritmo atual de produtividade da usina 1 de 7 milhões de toneladas métricas secas por ano.

As condições de queima (temperaturas, pressões e tempo em cada etapa da queima) foram estabelecidas de acordo com a similaridade às condições operacionais estabelecidas no processo industrial. Desta maneira buscou-se obter pelotas queimadas, em escala piloto, com grau de sinterização próximo ao obtido em condições reais. As etapas de secagem, de queima e de resfriamento foram subdivididas em grupos, permitindo um melhor controle de temperatura e pressão.

Em seguida, as pelotas queimadas foram submetidas aos seguintes testes para medir a sua qualidade:

- Teste de tamboramento;
- Teste de compressão da faixa maior.

#### 4.5. ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DA PELOTA QUEIMADA

Nos testes físicos procura-se avaliar a granulometria e a resistência física das pelotas para resistir ao manuseio desde a produção até o seu carregamento nos reatores de redução dos clientes finais. Para os ensaios seguintes foi utilizado o procedimento interno, U-QF-Q60, para amostragem, preparação da amostra de pelota queimada produzida para teste de controle de qualidade, determinação da resistência da pelota queimada ao impacto, índice de tamboramento, índice de abrasão e calibração do tambor de abrasão.

##### 4.5.1 Índices de tamboramento e abrasão

A norma determinação dos índices de tamboramento e abrasão - ABNT NBR ISO 3271:2009 é utilizada para minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta e especifica um método para obter uma medida relativa para avaliar a resistência de minérios de ferro à degradação de tamanho por impacto e abrasão. Ela cobre a determinação dos índices de tamboramento e abrasão.

No teste são determinados dois índices de resistência da pelota, tamboramento e abrasão, utilizados para avaliar a resistência das pelotas ao atrito durante transporte, manuseio e ao próprio atrito entre as mesmas durante a descida da carga nos reatores industriais. O teste consiste em colocar uma massa de 15 kg da amostra de pelotas, de granulometria entre 6,3 mm e 19,0 mm, em um tambor de abrasão e submetê-las a 200 rotações, a uma velocidade de 25 rpm. O resultado de tamboramento é expresso como o percentual retido na peneira de 6,3 mm, e a abrasão é o percentual passante na peneira de 0,5 mm. O tambor rotativo utilizado no teste de tamboramento é da marca Usivit (Figura 4.18).



**Figura 4.18:** Tambor rotativo para teste de tamboramento.

#### 4.5.2 Resistência à compressão

A norma determinação da resistência à compressão - ABNT NBR ISO 4700:2010 especifica um método para fornecer uma medida da carga de compressão, para pelotas de minério de ferro como insumo para alto-forno e redução direta que, quando atingida, causa a ruptura de pelotas. Esta norma se aplica a pelotas queimadas.

Segundo o referido padrão, 100 pelotas da amostra de granulometria entre 16,0 mm e 12,5 mm são individualmente colocadas entre duas placas paralelas e submetidas à ação de uma força compressiva uniaxial, a uma velocidade específica (10 a 20 mm/min), até a ruptura da mesma. O resultado do teste de compressão é medido em kgf/pelota e seu valor é a média aritmética dos valores das pelotas testadas. A média é expressa em número inteiro.

A prensa hidráulica utilizada nos testes de resistência à compressão da pelota queimada é da marca Automática Tecnologia (Figura 4.19).



**Figura 4.19:** Prensa hidráulica usada nos testes resistência à compressão.

Na Tabela IV.1 são apresentadas as faixas de valores de referência que serão considerados adequados para os parâmetros de qualidade das pelotas cruas e queimadas que serão medidos durante os testes de pelotamento com cada tipo de agente aglomerante utilizado durante o experimento.

**Tabela IV.1:** Parâmetros de qualidade pelota crua e queimada

Parâmetros	Faixa	
	Aglomerante	Bentonita
Diâmetro Médio (mm)	9,0 - 16,0	9,0 - 16,0
Teste de Quedas	2,5 - 5,0	2,5 - 5,0
CPCU (kg/pel.)	> 1,5	> 1,8
CPCS (kg/pel.)	> 3,5	> 5,0
Tamboramento (%)	> 93,6	> 93,6
Compressão (kgf/pel)	> 280	> 280

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme descrito no capítulo 4, os testes experimentais deste estudo foram realizados em três partes. Na primeira, avaliou-se o efeito da adição de cal hidratada (em diversas concentrações) na etapa de aglomeração (pelotamento) do *pellet feed*, utilizando-se, em separado, os dois tipos de agentes aglomerantes empregados no processo da Samarco. Na segunda parte, avaliou-se a qualidade das pelotas cruas obtidas em cada teste de pelotamento. Na terceira parte, avaliou-se a qualidade das pelotas queimadas geradas em cada teste de pelotamento.

### 5.1. CARACTERIZAÇÃO DO *PELLET FEED* E INSUMOS

Nas Tabelas V.1 e V.2 são apresentados, respectivamente, os resultados dos testes da caracterização química e física do *pellet feed* utilizado em todos os testes. As análises foram realizadas no laboratório da Samarco, utilizando-se as respectivas normas e padrões para cada tipo de análise.

**Tabela V.1:** Caracterização química do *pellet feed*

ANÁLISE QUÍMICA DO <i>PELLET FEED</i> (%)	
Descrição	Resultados
Fe Total	66,82
FeO	0,89
SiO <sub>2</sub>	1,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38
CaO	0,02
MgO	0,02
P	0,044
PPC	2,70
Outros	27,85
Somatório	100,00

**Tabela V.2:** Caracterização física do *pellet feed*

ANÁLISE FÍSICA DO <i>PELLET FEED</i>		
Descrição	<i>Pellet feed</i> sem prensar	<i>Pellet feed</i> prensado
GRANULOMETRIA (%)		
+100 #	0,3	0,2
+200 #	4,1	3,0
+325 #	12,3	7,8
-325 #	83,3	89,0
Somatório	100,0	100,0
Área superficial (cm <sup>2</sup> /g)	1439	2098
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	4,906	4,905
MINERALOGIA DO <i>PELLET FEED</i> (%)		
Hematita Especular	41,9	
Hematita Porosa	38,2	
Goethita	12,8	
Outros	7,2	
Somatório	100,0	

Nas Tabelas V.3 e V.4 são apresentados, respectivamente, os resultados dos testes de caracterização química e física do carvão mineral utilizado em todos os testes. O procedimento usado na caracterização do carvão foi idêntico ao empregado na caracterização do *pellet feed*.

**Tabela V.3:** Caracterização química do carvão

ANÁLISE QUÍMICA DO CARVÃO (%)	
Descrição	Resultados
Fe Total	0,76
SiO <sub>2</sub>	7,87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,88
CaO	0,55
MgO	0,23
P	0,000
S	0,00
PPC	84,26
Outros	1,45
Somatório	100,00
Basicidade Binária	0,07
Carbono	72,69

**Tabela V.4:** Caracterização física do carvão

ANÁLISE FÍSICA CARVÃO	
GRANULOMETRIA (%)	
Descrição	Resultados
+200 #	36,0
-325 #	54,0
Outras #	10,0
Somatório	100,0

Nas Tabelas V.5 e V.6 são apresentados, respectivamente, os resultados dos testes de caracterização química e física do calcário utilizado em todos os testes, usando os mesmos procedimentos citados anteriormente.

**Tabela V.5:** Caracterização química do calcário

ANÁLISE QUÍMICA DO CALCÁRIO CALCÍTICO (%)	
Descrição	Resultados
SiO <sub>2</sub>	4,29
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--
CaO	49,30
MgO	3,52
PPC	40,77
Outros	2,12
Somatório	100,00

**Tabela V.6:** Caracterização física do calcário

ANÁLISE FÍSICA CALCÁRIO CALCÍTICO (%)	
Descrição	Resultados
+ 100 #	12,0
- 100 + 200 #	15,8
- 200 + 325 #	13,0
- 325 + 400 #	3,8
- 400 #	55,4
Somatório	100,0
Umidade (%)	0,15
Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,87
Superfície específica (cm <sup>2</sup> /g)	4862

Na Tabela V.7 são apresentados os resultados dos testes de caracterização química da bentonita sódica utilizada em todos os testes.

**Tabela V.7:** Caracterização química da bentonita

ANÁLISE QUÍMICA DA BENTONITA (%)	
Descrição	Resultados
SiO <sub>2</sub>	56,40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,32
CaO	0,60
MgO	2,32
Outros	25,36
Somatório	100,00

Na Tabela V.8 são apresentados os resultados dos testes de caracterização química da cal hidratada utilizada em todos os testes.

**Tabela V.8:** Caracterização química da cal hidratada

ANÁLISE QUÍMICA DA CAL HIDRATADA (%)	
Descrição	Resultados
SiO <sub>2</sub>	3,11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27
CaO	88,10
MgO	0,37
Outros	8,15
Somatório	100,00

Por ser um produto protegido por segredo de negócio (propriedade intelectual), não será exibida a caracterização do aglomerante orgânico utilizado nos testes.

Em todos os testes e na etapa de preparo da solução de cal hidratada, foi utilizada apenas água destilada e deionizada, preparada no próprio laboratório da Samarco.

## 5.2. ANÁLISE DO PH E DISPERSÃO DO *PELLET FEED*

Para avaliar o efeito da adição de cal hidratada no pH e no grau de dispersão do *pellet feed*, foram preparadas 5 amostras de *pellet feed* com 10 kg cada. Foram preparadas ainda 4 soluções com cal hidratada de forma que a massa de cal usada em cada uma fosse proporcional ao teor de CaO final desejado no minério. À primeira amostra, na qual o teor de CaO do *pellet feed* já estava em 0,02%, não foi adicionada nenhuma solução de cal, sendo esta considerada a amostra em branco.

Todas as amostras de *pellet feed* tiveram sua umidade corrigida para 10,0% através da adição de água destilada e deionizada. Desta forma foi possível medir a

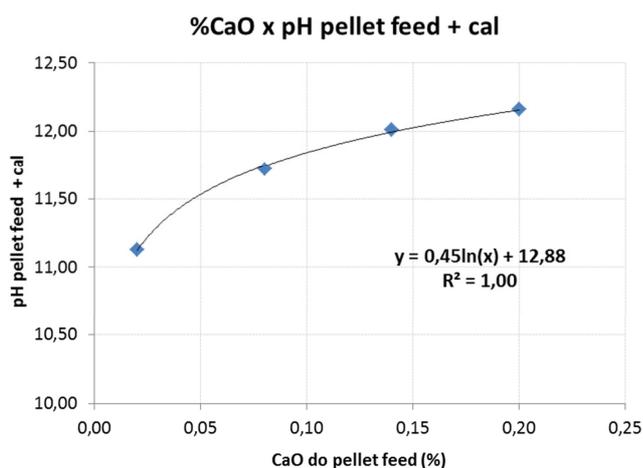
variação do pH e do grau de dispersão do *pellet feed* antes da adição da solução de cal e 60 minutos após a adição da solução de cal. Após essa etapa, as amostras foram armazenadas em baldes fechados por 48 horas. Após esse período, foram realizados novos testes de pH e de dispersão. A Tabela V.9 apresenta os dados resumidos dos testes.

**Tabela V.9:** Variação do pH e da dispersão do *pellet feed* x CaO (%)

Variação do pH e grau de dispersão do <i>pellet feed</i> (P.F) x CaO (%)					
CaO <i>pellet feed</i> (%)	0,02	0,08	0,14	0,20	0,26
Dosagem extra cal (g/kg de P.F)	0,00	6,81	13,62	20,43	27,24
pH <i>pellet feed</i> Natural	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
pH <i>pellet feed</i> + cal		11,1	11,7	12,0	12,2
pH <i>pellet feed</i> + cal (48 hs)		10,5	11,0	11,4	11,5
Dispersão <i>pellet feed</i> Natural	2,22	2,22	2,22	2,22	2,22
Dispersão <i>pellet feed</i> + cal		2,15	2,13	2,09	2,11
Dispersão <i>pellet feed</i> + cal (48 hs)		2,13	2,11	2,08	2,10

### 5.2.1 Análise do pH do *pellet feed*

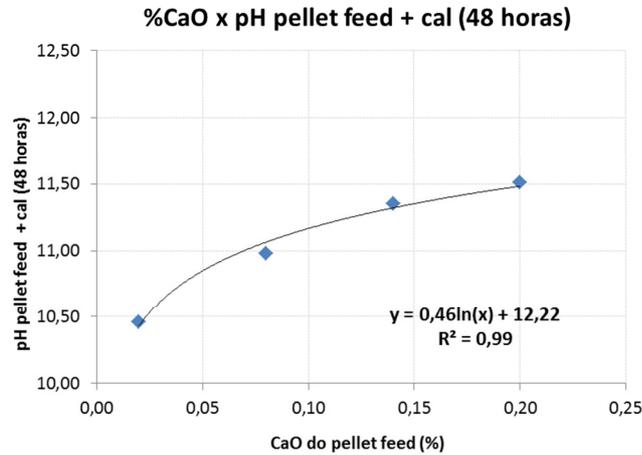
Na Figura 5.1 é mostrada a variação do pH do *pellet feed* após a adição da solução de cal. Observa-se um aumento no valor de pH em função do aumento da dosagem de cal.



**Figura 5.1:** pH do *pellet feed* em função da dosagem de cal hidratada.

Na Figura 5.2 é mostrada a variação do pH do *pellet feed* após a adição da solução de cal e armazenado por 48 horas. Observa-se uma queda nos valores de pH para cada

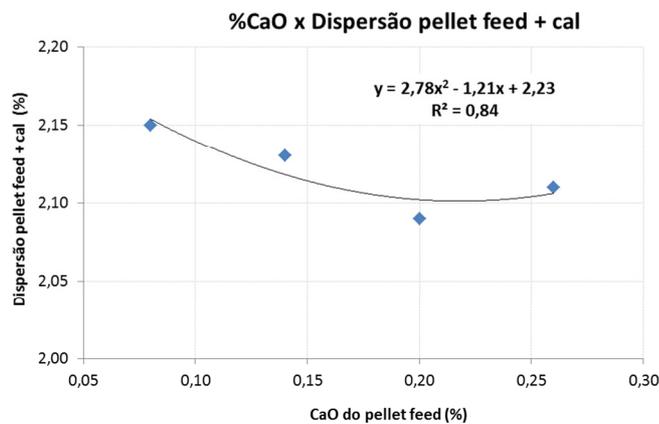
amostra. Estes resultados evidenciam uma tendência de queda do pH durante o período em que a mistura ficou armazenada.



**Figura 5.2:** pH do *pellet feed* em função da dosagem de cal hidratada após 48 horas.

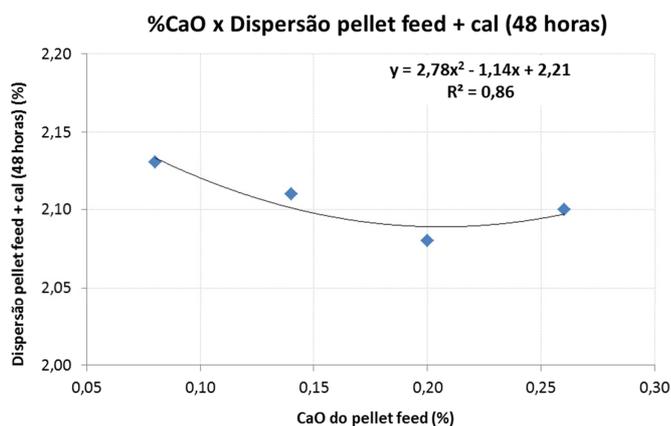
### 5.2.2 Análise de dispersão do *pellet feed*

Na Figura 5.3 é mostrada a variação do grau de dispersão do *pellet feed* após a adição da solução de cal. Observa-se uma tendência de queda no grau de dispersão em função do aumento da dosagem de cal (para a faixa testada). Essa queda demonstra uma tendência no aumento da coagulação / agregação das partículas de minério em função da dosagem de cal hidratada (para a faixa testada), em função das características do *pellet feed* usado nos testes.



**Figura 5.3:** Dispersão do *pellet feed* em função da dosagem de cal hidratada.

Na Figura 5.4 é mostrada a variação do grau de dispersão do *pellet feed* após a adição da solução de cal e armazenado por 48 horas. Observa-se uma pequena variação nos valores de dispersão após esse período, mas a tendência de queda nos valores de dispersão em função da dosagem de cal se mantém.



**Figura 5.4:** Dispersão do *pellet feed* em função da dosagem de cal hidratada após 48 horas.

Os resultados dos testes para avaliar a influência da dosagem de cal hidratada no *pellet feed* confirmam a alteração no valor de pH e mostram uma tendência de queda no grau de dispersão do mesmo em função do aumento na dosagem de cal hidratada para a faixa de CaO do *pellet feed* testada e ainda para as principais características do *pellet feed* usado nos testes.

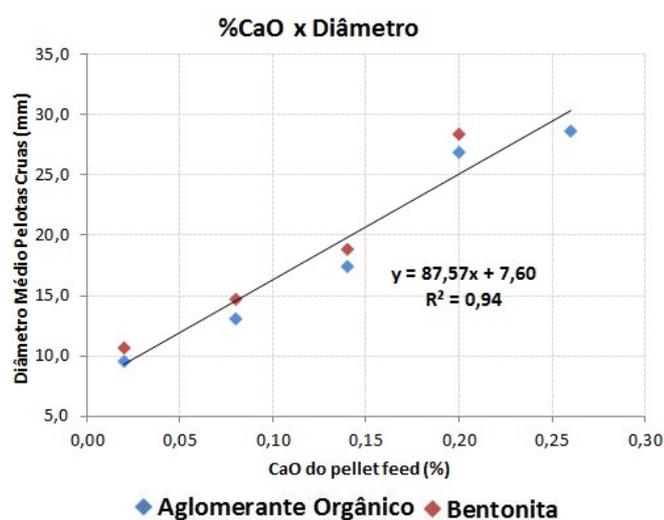
### 5.3. PARTE 1 – TESTES DE PELOTAMENTO

Nesta fase foram realizados testes completos de pelotamento no disco piloto, utilizando os insumos descritos no item anterior e os seguintes agentes aglomerantes: aglomerante orgânico a base de carboximetilcelulose (CMC) e bentonita sódica. A Tabela V.10 apresenta a massa de cal hidratada utilizada no preparo de cada solução, a respectiva concentração de CaO (% em massa) do *pellet feed* após a adição da solução de cal hidratada e o agente aglomerante utilizado em cada teste.

**Tabela V.10:** Parâmetros dos testes de pelotamento

Descrição	PARÂMETROS DOS TESTES DE PELOTAMENTO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Umidade do <i>pellet feed</i> (%)	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Agente aglomerante	Aglomerante orgânico					Bentonita			
Dosagem agente aglomerante (%)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,40	0,40	0,40	0,40
Adição extra de cal (g/kg de <i>pellet feed</i> )	0,0	170,3	340,5	510,8	681,0	0,0	170,3	340,5	510,8
Descrição	ANÁLISE QUÍMICA DO <i>PELLET FEED</i> APÓS ADIÇÃO EXTRA DE CAL (%)								
CaO	0,02	0,08	0,14	0,20	0,26	0,02	0,08	0,14	0,20
SiO <sub>2</sub>	1,23	1,24	1,25	1,24	1,24	1,23	1,26	1,24	1,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,36	0,38	0,38	0,38	0,36	0,36	0,38	0,37	0,38
MgO	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Fe Total	66,82	66,78	66,74	66,70	66,65	66,82	66,78	66,74	66,70
Outros	31,55	31,49	31,46	31,45	31,46	31,55	31,47	31,48	31,43
Somatório	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Durante os testes de pelotamento com cada teor de CaO, buscou-se avaliar nesta fase o processo de formação das pelotas cruas, principalmente em relação à dinâmica de crescimento das mesmas. Observou-se ainda o aspecto superficial das pelotas formadas, a sua forma e o diâmetro médio. Ao final de cada pelotamento, determinou-se o diâmetro médio das pelotas cruas formadas e a partir destes resultados foi possível determinar a relação entre o teor de CaO em função da adição de cal hidratada e o diâmetro médio das pelotas, conforme exibido na Figura 5.5.



**Figura 5.5:** Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada.

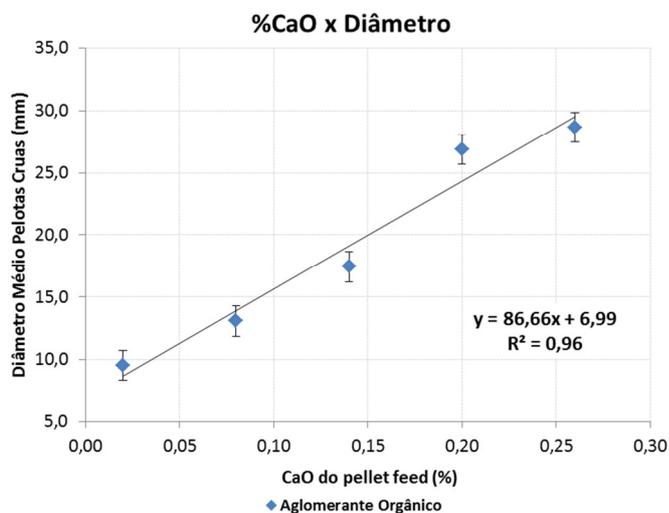
Na Figura 5.5 fica evidenciado que para maiores dosagens de cal hidratada, maior será o diâmetro médio das pelotas formadas, independentemente do agente aglomerante

utilizado, na faixa de condições operacionais investigada. Considerando-se os resultados comuns para o teste de pelotamento em escala piloto no *pot grate* da Samarco, o diâmetro médio desejado situa-se abaixo de 16,0mm. Com base nos resultados obtidos, verifica-se que pelotas com esta característica foram obtidas somente em pelotamentos com o teor de CaO abaixo de 0,10%.

De acordo com os resultados dos testes, para dosagens de cal hidratada cujo teor final de CaO do *pellet feed* foi igual ou maior que 0,14%, espera-se a formação de pelotas com diâmetro médio superior a 20,0mm, sendo essa faixa de tamanho indesejável para o processo de pelotamento.

### 5.3.1 Testes de pelotamento com aglomerante orgânico

Na Figura 5.6, observa-se a relação entre o teor de CaO e diâmetro médio das pelotas cruas para os testes de pelotamento usando o aglomerante orgânico a base de CMC.



**Figura 5.6:** Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada com o uso de aglomerante orgânico.

Nos testes realizados com maiores teores de CaO em função da dosagem de cal hidratada, observou-se um descontrole no crescimento das pelotas cruas. Os testes onde o diâmetro médio das pelotas formadas estavam dentro da faixa esperada foram aqueles com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,02 e 0,08%. Na Figura 5.7 é mostrado o aspecto

das pelotas cruas geradas no teste com CaO em 0,08% com aglomerante orgânico, com aproximadamente 5 minutos de pelotamento, ainda na etapa 1.



**Figura 5.7:** Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

No início da etapa 2 do pelotamento, observa-se uma melhora no acabamento das pelotas cruas, conforme mostrado na Figura 5.8.



**Figura 5.8:** Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

Aos 20 minutos de pelotamento, as pelotas já se encontram na faixa de tamanho e forma adequada, conforme se observa na Figura 5.9.



**Figura 5.9:** Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas são acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.10 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com aglomerante orgânico e teor de CaO em 0,08%.



**Figura 5.10:** Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

As pelotas formadas nesse teste (com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,08%) apresentaram uma distribuição de tamanho adequada, com um bom acabamento superficial. As pelotas geradas no teste foram peneiradas e classificadas por faixa de tamanho, e o seu diâmetro médio calculado. O resultado obtido foi de 13,1mm.

Nos testes realizados com o teor de CaO do *pellet feed* igual ou maior que 0,20%, observou-se um crescimento mais rápido das pelotas cruas, ainda na etapa 1. Com 7

minutos, praticamente todas as pelotas nos discos já estavam com diâmetro muito acima do desejado, conforme se observa na Figura 5.11.



**Figura 5.11:** Aspecto visual das pelotas cruas com 7 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Aos 15 minutos de pelotamento, já na etapa 3, ao contrário do que se esperava para um pelotamento padrão, as pelotas não apresentaram redução de tamanho. Observou-se que as pelotas continuaram crescendo, apresentando uma elevada umidade superficial, conforme mostrado na Figura 5.12.



**Figura 5.12:** Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Ao fim do pelotamento, após aproximadamente 22 minutos, praticamente todas as pelotas formadas se encontravam com diâmetro acima de 19,0mm. A visão geral do

disco evidenciava certa homogeneização das pelotas, porém com um diâmetro muito acima do desejado, conforme se observa na Figura 5.13.



**Figura 5.13:** Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas foram acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.14 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com aglomerante orgânico e teor de CaO em 0,20%.



**Figura 5.14:** Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Uma análise mais detalhada das pelotas no disco ao término do teste evidencia a existência de uma elevada umidade superficial das pelotas geradas, conforme mostrado em detalhe na Figura 5.15. Isso ocorreu mesmo com a umidade em todos os testes ter permanecido constante. Na maioria das vezes, um crescimento excessivo da pelota crua

nos discos pelletizadores é associado a uma elevada umidade do pellet feed. Entretanto, conforme observado, essa dificuldade em controlar o crescimento pode estar associada à presença de outros elementos e reagentes como, por exemplo, a cal hidratada.



**Figura 5.15:** Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelletamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Após a realização dos testes, observou-se que quanto maior a dosagem de cal hidratada ao *pellet feed*, mais rápido era o crescimento das pelotas cruas na etapa 1 do pelletamento (até 8 minutos). Para teores de CaO do *pellet feed* iguais ou maiores que 0,20%, praticamente todas as pelotas estavam com diâmetro acima de 19,0mm aos 8 minutos de pelletamento; observou-se, ainda, que, após a etapa 1, as pelotas não reduziam mais de tamanho e apresentavam elevada umidade superficial.

Tal comportamento pode ser explicado pelo caráter coagulante da cal, que em meio aquoso se dissocia formando íons  $\text{CaOH}^+$  que são capazes de se adsorverem quimicamente na superfície do minério, pois possui átomos capazes de formar ligações de hidrogênio. Conforme estudos de ARAUJO *et al.*, (2009), haverá uma redução na barreira energética entre as partículas de minério, favorecendo a aproximação entre as mesmas. Dependendo da concentração de íons  $\text{CaOH}^+$ , a interação entre as partículas de minério será significativamente forte, ao ponto de acelerar a formação do aglomerado, que irá apresentar um crescimento mais rápido das pelotas já nos primeiros minutos do pelletamento, formando pelotas de elevado diâmetro ainda na etapa 1.

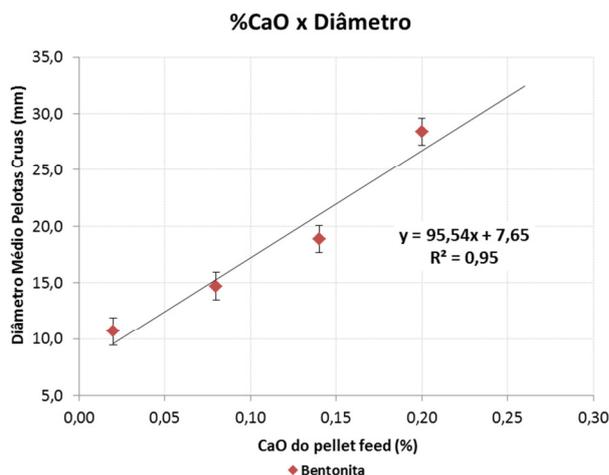
Na etapa 3, tem-se a maioria das pelotas formadas com diâmetros muito elevados, e ainda com o efeito coagulante/aglomerante da cal predominando. Isso fará com que as pelotas continuem crescendo. Espera-se que nesta etapa o aglomerante

orgânico seja capaz de atuar aumentando a viscosidade da água e controlando o crescimento das pelotas. Entretanto, a presença de cátions bivalentes como o  $\text{Ca}^{2+}$  em maiores concentrações pode interagir com o polímero CMC provocando a precipitação deste, conforme estudos de BURDUKOVA *et al.*, (2008). Neste caso, o aglomerante orgânico terá sua eficiência significativamente reduzida, não sendo mais capaz de controlar o crescimento das pelotas de forma adequada.

Sendo assim, o efeito coagulante da cal através dos íons  $\text{CaOH}^+$  irá acelerar o crescimento das pelotas cruas ainda na etapa 1 do pelotamento e, ao mesmo tempo, a presença dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  atuaria reduzindo a eficiência do aglomerante orgânico. Estes fatores justificam os resultados observados na figura 5.6.

### 5.3.2 Testes de pelotamento com bentonita

Os testes de pelotamento variando o teor de CaO em função da adição de cal hidratada também foram realizados usando bentonita sódica como agente aglomerante. Na Figura 5.16, observa-se a relação entre o teor de CaO e diâmetro médio das pelotas cruas para esses testes.



**Figura 5.16:** Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada.

Conforme observado nos testes de pelotamento com o aglomerante orgânico, a mesma tendência de crescimento das pelotas cruas em função da dosagem da cal é observada nos testes com bentonita. Acredita-se que o comportamento coagulante da cal

na etapa 1 do pelotamento seja forte o suficiente para aumentar a velocidade de crescimento das pelotas cruas, independentemente do agente aglomerante utilizado no estudo.

A bentonita deveria ser capaz de interagir com a água formando um gel viscoso e, ao mesmo tempo, absorver a água livre na superfície das partículas de minério de ferro. Entretanto, tanto na etapa 1 quanto na etapa 3 do pelotamento, as pelotas continuam crescendo sem um controle adequado. Segundo AHMED e MOHAMED (2005), a presença de íons de cálcio  $\text{Ca}^{2+}$  em elevada concentração pode interagir diretamente com bentonita, substituindo os íons de sódio da estrutura da mesma por íons de cálcio. Com isso, a capacidade de absorção de água da bentonita seria reduzida, minimizando a capacidade da mesma em controlar o crescimento das pelotas cruas.

Nos testes realizados usando a bentonita como agente aglomerante, somente os testes com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,02 e 0,08% formaram pelotas nas faixas de tamanho adequadas. Na Figura 5.17 é mostrado o aspecto das pelotas cruas geradas no teste com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,08% usando bentonita como agente aglomerante após 5 minutos de pelotamento.



**Figura 5.17:** Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

No início da etapa 2 do pelotamento, observa-se uma melhora no acabamento das pelotas cruas, conforme mostrado na Figura 5.18.



**Figura 5.18:** Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

Aos 20 minutos de pelotamento, as pelotas já se encontram na faixa de tamanho e forma adequada, conforme se verifica na Figura 5.19.



**Figura 5.19:** Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas foram acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.20 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com bentonita e teor de CaO em 0,08%.



**Figura 5.20:** Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,08%.

As pelotas formadas nesse teste (com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,08%) apresentaram uma distribuição de tamanho adequada, com um bom acabamento superficial. Observou-se a presença de algumas pelotas com diâmetro elevado. As pelotas geradas no teste foram peneiradas e classificadas por faixa de tamanho, e o seu diâmetro médio calculado, com resultado em 14,7mm.

Nos testes realizados com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,20%, observou-se um crescimento muito rápido das pelotas cruas, ainda na etapa 1. Com 5 minutos, praticamente todas as pelotas nos discos já estavam com diâmetro muito acima do desejado, conforme se observa na Figura 5.21.



**Figura 5.21:** Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Aos 15 minutos de pelotamento, já na etapa 3, ao contrário do que se esperava para um pelotamento padrão, as pelotas não apresentaram redução de tamanho. Observou-se que as pelotas continuaram crescendo, apresentando uma elevada umidade superficial, conforme a Figura 5.22.



**Figura 5.22:** Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Ao fim do pelotamento, após aproximadamente 22 minutos, todas as pelotas formadas se encontravam com diâmetro acima de 19,0mm. A visão geral do disco evidenciava certa homogeneização das pelotas, porém com um diâmetro muito acima do desejado, conforme se observa na Figura 5.23.



**Figura 5.23:** Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas foram acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.24 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com bentonita e teor de CaO em 0,20%.



**Figura 5.24:** Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

Uma análise mais detalhada das pelotas formadas ao término do teste evidencia uma elevada umidade superficial das pelotas, conforme mostrado em detalhe na Figura 5.25.



**Figura 5.25:** Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20%.

A elevada umidade superficial das pelotas formadas no teste com bentonita e CaO do *pellet feed* em 0,20% evidencia a dificuldade da bentonita em absorver a umidade livre na superfície das partículas de minério durante a formação do aglomerado. O crescimento mais rápido das pelotas em função do efeito coagulante/aglomerante da cal

e a redução da eficiência da bentonita em função da presença de íons  $\text{Ca}^{2+}$  levaram a formação de praticamente todas as pelotas com diâmetro acima de 19,0mm.

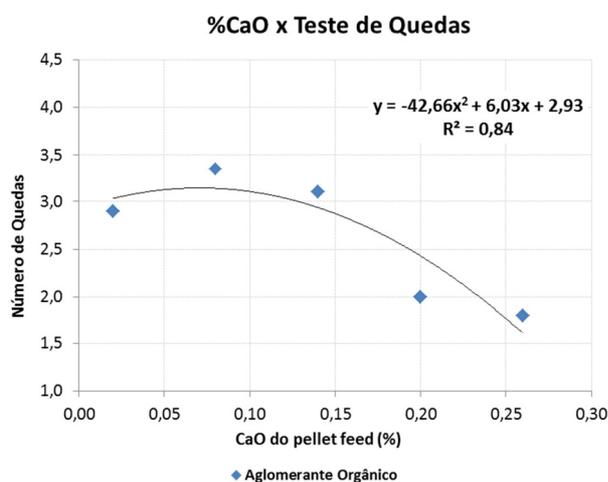
#### 5.4. PARTE 2 – QUALIDADE DAS PELOTAS CRUAS

Nesta parte do trabalho foram realizados testes para medir a qualidade das pelotas cruas geradas em cada ensaio realizado na parte 1, item 5.3. Os testes realizados foram:

- Teste de quedas: tem como objetivo medir o número de quedas que a pelota crua suporta antes de trincar ou se partir;
- Compressão da pelota crua úmida (CPCU): tem como objetivo medir a resistência à compressão da pelota crua úmida;
- Compressão da pelota crua seca (CPCS): tem como objetivo medir a resistência à compressão da pelota crua seca.

##### 5.4.1 Teste de quedas

Na Figura 5.26 são mostrados os resultados do teste de quedas para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.26:** Teste de quedas das pelotas cruas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O teste de quedas, conforme descrito no capítulo 4, tem como objetivo medir a resistência das pelotas cruas a quedas. É desejável que as pelotas tenham elevada resistência a quedas para que as mesmas cheguem inteiras e sem trincas ao forno, após

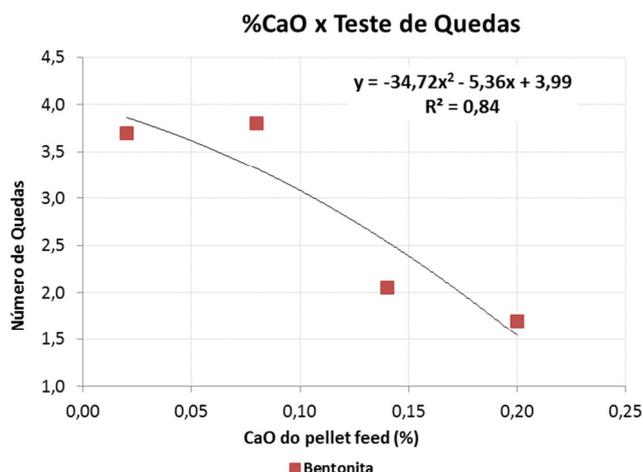
passarem por todas as diferenças de níveis entre os equipamentos e correias transportadoras, desde a saída da panela do disco.

Quanto maior o diâmetro das pelotas, maior será a sua massa, de forma que para suportar o mesmo número de quedas em relação às pelotas de menor diâmetro, as pelotas precisam de uma maior compactação do aglomerado durante a sua formação.

Nos testes realizados, variando-se o teor de CaO do *pellet feed*, observou-se a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro em função do aumento da dosagem de cal hidratada ao *pellet feed*.

Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.26, observa-se que para os testes usando aglomerante orgânico, os valores do teste de quedas para as pelotas cruas formadas nos testes com o teor de CaO entre 0,02 a 0,14% apresentaram-se dentro da faixa esperada, em torno de 3,0 quedas, considerando-se o diâmetro médio das pelotas obtidas nos respectivos testes. Nos testes com o teor de CaO igual ou maior que 0,20%, onde as pelotas apresentaram um diâmetro médio superior a 20,0mm, observa-se uma queda significativa nos valores de teste de quedas, com resultados igual ou abaixo de 2,0 quedas.

Na Figura 5.27 são mostrados os resultados de teste de quedas para as pelotas obtidas em cada teste usando bentonita.



**Figura 5.27:** Teste de quedas das pelotas cruas com bentonita em função do teor de CaO do *pellet feed*.

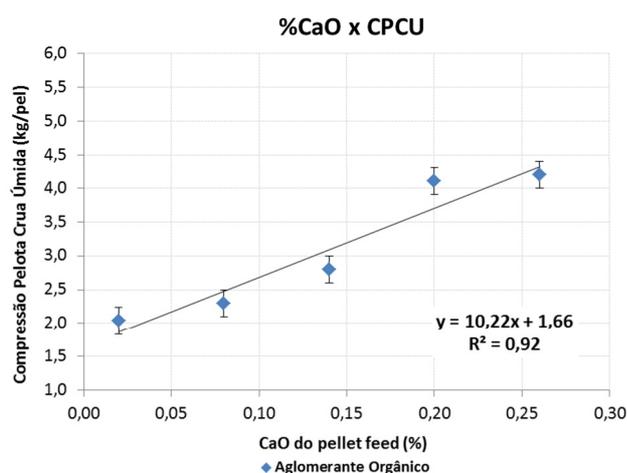
Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.27, observa-se a mesma tendência identificada nos testes com aglomerante orgânico. Os resultados de teste de quedas para os testes onde o CaO encontrava-se em 0,02 e 0,08% mostraram-se dentro

do esperado, igual ou maior que 3,0 quedas. A partir dos testes com o teor de CaO em 0,14%, os resultados já apresentam uma tendência de queda, chegando a valores abaixo de 2,0 quedas com o teor de CaO em 0,20%.

Desta forma, os resultados evidenciam que tanto nos testes usando aglomerante orgânico ou bentonita, a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro, acima do desejado, em função da dosagem de cal hidratada no *pellet feed* influenciou nos resultados de teste de quedas das pelotas cruas formadas, impactando de forma negativa a qualidade final das mesmas.

#### 5.4.2 Compressão da pelota crua úmida (CPCU)

Na Figura 5.28 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua úmida para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.28:** Compressão da pelota crua úmida com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O teste de compressão da pelota crua úmida (CPCU) tem como objetivo medir a resistência das pelotas cruas a forças de compressão. É desejável que as pelotas cruas tenham elevada resistência à compressão para que possam suportar a carga das próprias pelotas cruas quando as mesmas forem carregadas nos carros de grelha do forno.

Durante a etapa de secagem, as pelotas cruas ainda úmidas são submetidas, além da carga devido ao peso das próprias pelotas (a elevadas pressões em função do fluxo de ar quente ascendente e descendente) que passa pelo leito de pelotas para retirar a umidade das mesmas. Durante essa etapa do processo, as pelotas cruas devem suportar

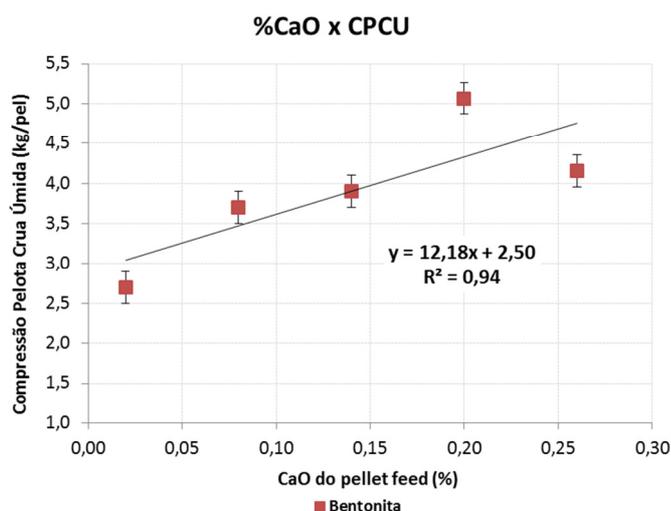
a variação de pressão estabelecida ao longo da zona de secagem do forno, sem que as mesmas apresentem trincas ou se quebrem totalmente. Quanto maior a resistência à compressão das pelotas cruas, menor é a possibilidade de quebra das mesmas.

Nos testes realizados variando-se o teor de CaO do *pellet feed*, observou-se a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro em função do aumento da dosagem de cal hidratada ao *pellet feed*.

Analisando-se os dados apresentados na Figura 5.28, observa-se que para os testes usando aglomerante orgânico, os valores de CPCU aumentam quase que linearmente, para a faixa estudada, em função do teor de CaO. Estes testes são realizados de forma individual, sendo cada pelota submetida a um carregamento contínuo até o rompimento da mesma. Desta forma, as pelotas com maiores diâmetros irão suportar uma maior carga de compressão. Esse resultado se mostra positivo quando é considerada apenas uma pelota. Porém, no caso de uma operação contínua, quanto maior o diâmetro da pelota crua, maior será o tempo de secagem necessário para que toda a água existente no seu interior seja evaporada, o que irá comprometer a produtividade dos fornos.

Caso não seja possível retirar toda a água existente no interior da pelota ainda na etapa de secagem, ao entrar na zona de queima do forno, estas pelotas serão submetidas a elevadas temperaturas, o que irá provocar uma evaporação muito rápida da água, o que irá quebrar as pelotas cruas, gerando trincas nas pelotas queimadas, prejudicando, com isso, a qualidade das pelotas queimadas.

Na Figura 5.29 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua úmida para as pelotas obtidas em cada teste usando bentonita.



**Figura 5.29:** Compressão da pelota crua úmida com bentonita em função do teor de CaO do *pellet feed*.

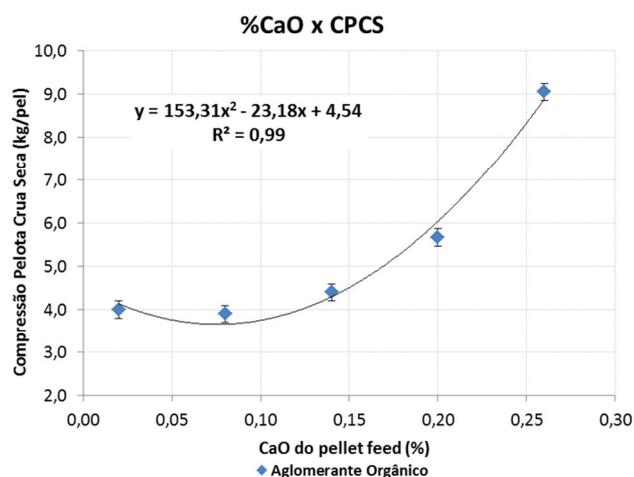
Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.29, observa-se a mesma tendência identificada nos testes com aglomerante orgânico. Os resultados de CPCU para os testes onde o CaO do *pellet feed* encontrava-se mais elevado foram maiores.

No caso dos testes realizados variando-se a dosagem de cal hidratada, observou-se a tendência de formação de pelotas com maior diâmetro médio nos testes com bentonita em comparação aos testes com aglomerante orgânico. Sendo assim, os valores mais elevados de CPCU mostrados na Figura 5.25 em comparação aos da Figura 5.24 também podem ser explicados pelo efeito do diâmetro da pelota no resultado de CPCU.

Desta forma, os resultados evidenciam que tanto nos testes usando aglomerante orgânico ou bentonita, a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro, acima do desejado, em função da dosagem de cal hidratada no *pellet feed* influencia nos resultados de CPCU.

#### 5.4.2 Compressão da pelota crua seca (CPCS)

Na Figura 5.30 são mostrados os resultados de compressão das pelotas cruas secas para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



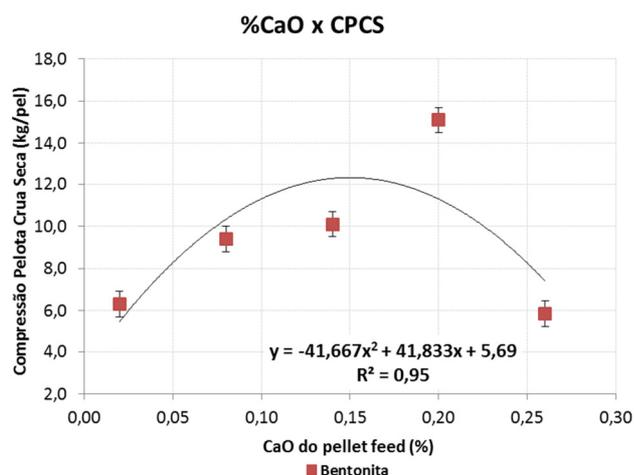
**Figura 5.30:** Compressão da pelota crua seca com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O teste de compressão da pelota crua seca (CPCS) tem como objetivo medir a resistência das pelotas cruas a forças de compressão após a secagem das mesmas. É desejável que as pelotas cruas após passarem pela etapa de secagem tenham elevada resistência à compressão para que as mesmas possam suportar a carga das próprias pelotas cruas durante a passagem pelo forno. As pelotas que se encontram no leito inferior do carro de grelha deverão suportar a pressão gerada pela carga de pelotas que se encontram acima destas, além das pressões geradas devido à passagem do fluxo de ar pelo leito de pelotas. Quanto maior a resistência à compressão das pelotas cruas após a secagem, menor é a possibilidade de quebra das mesmas durante a etapa de queima.

Nos testes realizados variando-se o teor de CaO do *pellet feed*, observou-se a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro em função do aumento da dosagem de cal hidratada ao *pellet feed*.

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5.30, observa-se que, para os testes usando aglomerante orgânico, os valores de CPCS aumentam em função do maior teor de CaO, sendo o aumento mais acentuado a partir de 0,15% de CaO no *pellet feed*. Estes testes são realizados de forma individual, no qual cada pelota após a secagem é submetida a um carregamento contínuo até o rompimento da mesma. Desta forma, as pelotas com maiores diâmetros irão suportar uma maior carga de compressão.

Na Figura 5.31 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua seca para as pelotas obtidas em cada teste usando bentonita.



**Figura 5.31:** Compressão da pelota crua seca com bentonita em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.31, observa-se a mesma tendência identificada nos testes com aglomerante orgânico. Os resultados de CPCS para os testes onde o CaO do *pellet feed* encontrava-se mais elevado foram maiores. No caso dos testes com bentonita, é comum os resultados de CPCS apresentarem valores mais elevados em comparação aos testes com aglomerante orgânico. Essa diferença deve-se ao fato que, após a secagem, a bentonita, por ser um aglomerante mineral (inorgânico) ainda se mantém presente na estrutura da pelota crua, favorecendo uma maior coesão entre as partículas de minério, o que aumenta a resistência das pelotas cruas.

Desta forma, os resultados evidenciam que tanto nos testes usando aglomerante orgânico ou bentonita, a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro, acima do desejado, em função da dosagem de cal hidratada no *pellet feed* influencia nos resultados de CPCS. No caso da bentonita, esse agente aglomerante tende a conferir maiores valores de CPCS às pelotas cruas após a secagem em comparação com o aglomerante orgânico.

## 5.5. PARTE 3 – QUALIDADE DAS PELOTAS QUEIMADAS

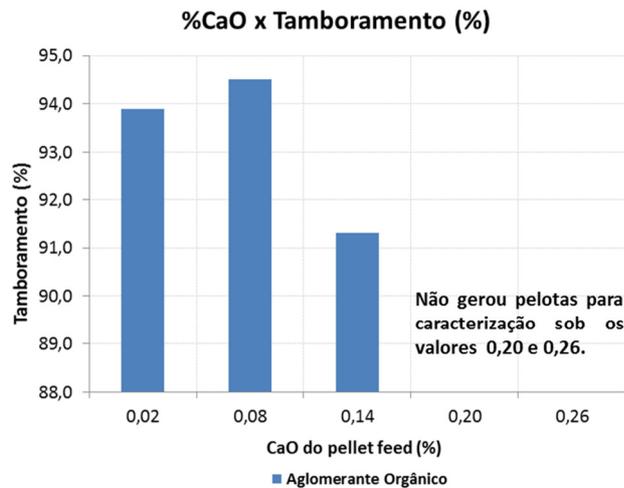
Nesta parte do trabalho foram realizados testes para mensurar a qualidade das pelotas queimadas geradas em cada ensaio. Os testes realizados foram:

- Tamboramento: tem como objetivo medir a geração de finos durante o manuseio;
- Compressão: tem como objetivo medir a resistência à compressão da pelota queimada.

Conforme descrito no capítulo 4, para a realização dos testes de queima no forno piloto, é necessário o preparo adequado da panela, onde 50% das pelotas cruas a serem queimadas devem estar na faixa de tamanho entre 16,0 e 12,5 mm, e os 50% restante entre 12,5 e 9,0 mm. Nos testes de pelotamento realizados variando-se a dosagem de cal hidratada, tanto com aglomerante orgânico ou bentonita, para teores de CaO do *pellet feed* acima de 0,14%, praticamente não foram formadas pelotas com diâmetro na faixa entre 12,5 e 9,0 mm. Sendo assim, nestes testes não foram realizados a queima das pelotas. Nos testes em que o teor de CaO foi igual a 0,14%, houve um menor percentual de pelotas formadas na faixa entre 12,5 e 9,0 mm quando comparado com a faixa entre 16,0 e 12,5 mm. Neste caso, os testes de queima com as pelotas formadas nestes ensaios não foram realizados com a composição adequada da panela, o que impactou nos resultados de qualidade para estes ensaios. Portanto, os testes de qualidade das pelotas queimadas foram realizados conforme procedimento apenas para os pelotamentos com teor de CaO em 0,02 e 0,08%.

### 5.5.1 Testes de tamboramento

Na Figura 5.32 são mostrados os resultados de tamboramento para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.32:** Tamboramento das pelotas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O teste de tamboramento tem como objetivo medir a geração de finos durante o manuseio e transporte das pelotas queimadas. Quanto maiores os valores medidos no teste, menor será a degradação das pelotas durante o manuseio. Esse resultado é influenciado por diversas variáveis, por exemplo, granulometria, composição química, mineralogia, percentual de umidade do *pellet feed*, etc. Como em todos os testes realizados usou-se o mesmo minério, com as mesmas características e o mesmo teor de umidade, mantendo-se constantes as demais variáveis operacionais do teste, é possível avaliar os resultados de forma comparativa.

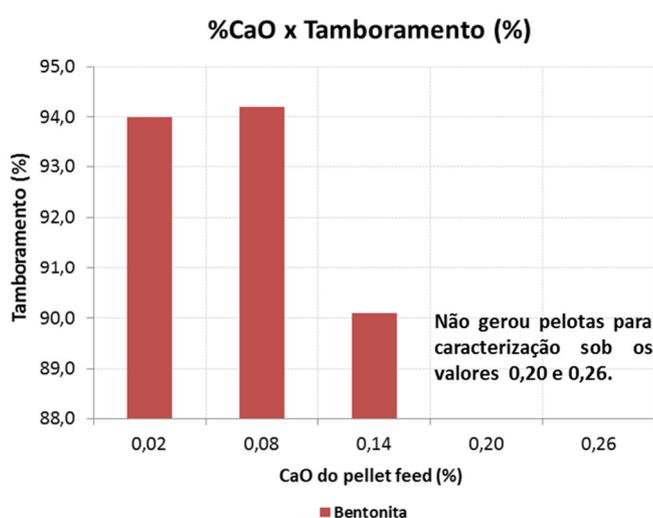
Assim como nos demais testes realizados, a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro em função do aumento da dosagem de cal hidratada ao *pellet feed* é uma das principais variáveis que influenciaram nos parâmetros de qualidade das pelotas queimadas.

Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.32, observa-se que, para os testes usando aglomerante orgânico, os valores de tamboramento mostraram-se satisfatórios para os testes onde os teores de CaO do *pellet feed* foram 0,02 e 0,08%. Nos testes com o teor de CaO em 0,14%, foi necessário realizar o teste de queima com um percentual maior de pelotas na faixa 16,0 e 12,5 mm, onde a maioria das pelotas estavam com diâmetro médio próximo a 16,0 mm. Neste caso, além do fluxo inadequado de gases durante a queima ser um fator negativo, as pelotas de maior

diâmetro têm a tendência de apresentar menores resultados de tamboramento, devido a uma secagem ineficiente das pelotas cruas.

Sendo assim, o teste de tamboramento apresentou melhores resultados para os testes onde houve uma melhor distribuição de tamanho das pelotas cruas formadas, com diâmetro médio abaixo de 15,0 mm e acima de 10,0 mm.

Na Figura 5.33 são mostrados os resultados de tamboramento para as pelotas obtidas em cada teste usando bentonita.



**Figura 5.33:** Tamboramento das pelotas com bentonita em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Analisando-se os resultados mostrados na Figura 5.33, observa-se a mesma tendência identificada nos testes com aglomerante orgânico. Os valores de tamboramento mostraram-se satisfatórios somente para os testes onde os teores de CaO do *pellet feed* foram 0,02 e 0,08%. Nos testes com o teor de CaO em 0,14% foi necessário realizar o teste de queima com um percentual maior de pelotas na faixa 16,0 e 12,5 mm, em que a maioria das pelotas estavam com diâmetro médio próximo a 16,0 mm. Neste caso, além do fluxo inadequado de gases durante a queima ser um fator negativo, as pelotas de maior diâmetro têm a tendência de apresentar menores resultados de tamboramento, devido a uma secagem ineficiente das pelotas cruas.

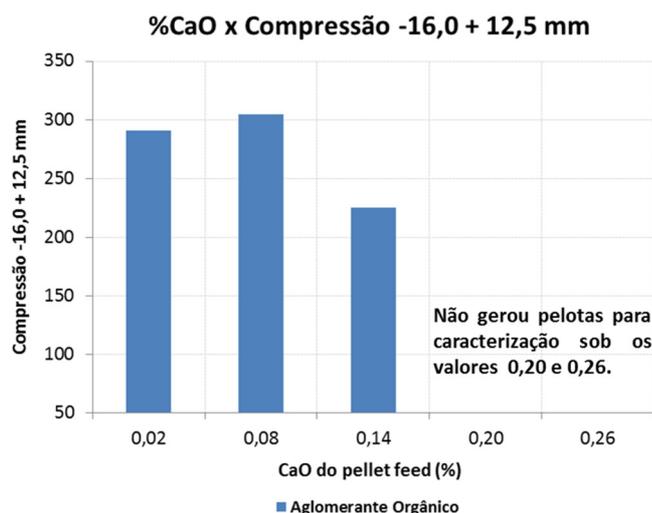
Sendo assim, o teste de tamboramento apresentou melhores resultados para os testes onde houve uma melhor distribuição de tamanho das pelotas cruas formadas, com

diâmetro médio abaixo de 15,0 mm e acima de 10,0 mm, que no caso dos testes com bentonita foi para teores de CaO em 0,02 e 0,08%.

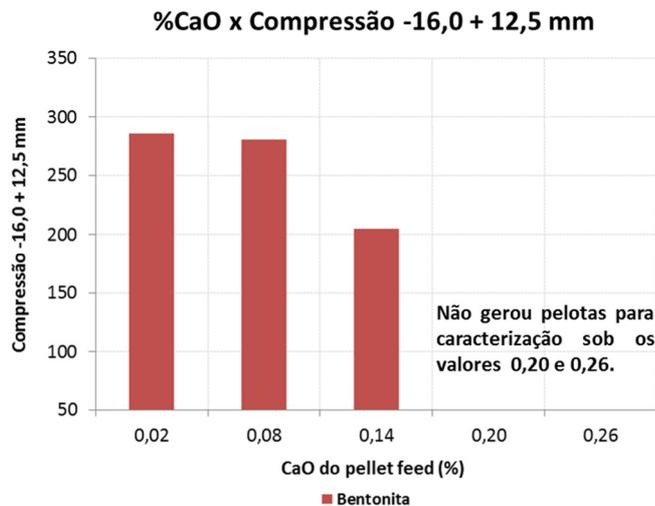
Desta forma, os resultados evidenciam que tanto nos testes usando aglomerante orgânico ou bentonita, a tendência de formação de pelotas de maior diâmetro, acima do desejado, em função da dosagem de cal hidratada no *pellet feed* influenciaram nos resultados de tamboramento.

### 5.5.2 Testes de compressão

Nas Figuras 5.34 e 5.35 são mostrados os resultados de compressão para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico e bentonita, respectivamente.



**Figura 5.34:** Compressão das pelotas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.



**Figura 5.35:** Compressão das pelotas com bentonita em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Analisando-se os resultados mostrados nas Figuras 5.34 e 5.35, observa-se a mesma tendência entre os resultados dos testes usando aglomerante orgânico e bentonita. Os valores de compressão mostraram-se satisfatórios somente para os testes onde os teores de CaO do *pellet feed* foram 0,02 e 0,08%. Nos testes com o teor de CaO em 0,14% foi necessário realizar o teste de queima com um percentual maior de pelotas na faixa 16,0 e 12,5 mm, em que a maioria das pelotas estavam com diâmetro médio próximo a 16,0 mm. Neste caso, além do fluxo inadequado de gases durante a queima ser um fator negativo, as pelotas de maior diâmetro têm a tendência de apresentar menores resultados de compressão, devido a uma secagem ineficiente das pelotas cruas.

#### 5.5.4 Teste pelotamento com cal hidratada

Com o objetivo de verificar a influência da cal hidratada no crescimento das pelotas cruas já nos primeiros minutos de teste, conforme observado nos testes realizados usando aglomerante orgânico e bentonita, realizou-se um teste de pelotamento usando-se apenas a cal hidratada, sem ou uso de nenhum agente aglomerante.

Conforme descrito anteriormente, uma das principais funções do agente aglomerante (bentonita e aglomerante orgânico) é interagir com as moléculas de água aumentando a viscosidade da mesma. Desta forma, tem-se um controle do crescimento

das pelotas. Em testes de pelotamento usando-se um *pellet feed* e um agente aglomerante padrão, observa-se a formação de pelotas com uma distribuição granulométrica adequada, com diâmetro médio geralmente entre 10,0 e 14,0 mm (esse resultado depende das características do *pellet feed* usado nos testes).

Conforme o procedimento utilizado nos testes anteriores, preparou-se uma solução de cal hidratada que foi misturada ao *pellet feed* com as mesmas características dos testes anteriores. A massa de cal adicionada na solução foi calculada objetivando-se um teor de CaO do *pellet feed* em 0,26%. Depois o minério misturado com a solução de cal hidratada foi armazenado em um tambor, que foi fechado e mantido assim por 48 horas.

Após as 48 horas, o *pellet feed* foi separado em duas bateladas de 125 kg, e foram adicionados calcário e carvão. Especificamente nesse teste, não foi usado aglomerante orgânico e nem bentonita. Após a adição dos insumos acima, aguardou-se 60 minutos e então se iniciou o pelotamento, conforme os demais testes realizados anteriormente.

Na Figura 5.36, é mostrado o aspecto das pelotas cruas geradas no teste com o CaO do *pellet feed* em 0,26% sem a adição de nenhum agente aglomerante, com aproximadamente 5 minutos de pelotamento, ainda na etapa 1.



**Figura 5.36:** Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

Conforme observado nos testes anteriores, com poucos minutos de teste, a maior parte das pelotas no disco apresentam diâmetro médio acima do desejado. Sem a adição de bentonita ou aglomerante, o que se espera é um crescimento sem controle das pelotas

cruas, que neste caso especificamente, será ainda influenciado pela ação da cal hidratada.

Na Figura 5.37, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 10 minutos de pelotamento, já na etapa 2.



**Figura 5.37:** Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

Após poucos minutos de teste já na etapa 2 do pelotamento, conforme a Figura 5.37, observou-se que a maioria das pelotas estavam com diâmetro bem acima do desejado, conforme observado nos testes com CaO igual ou maior que 0,20%.

Na Figura 5.38, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 15 minutos de pelotamento.



**Figura 5.38:** Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

Observou-se que a maioria das pelotas estava com diâmetro bem acima do desejado, conforme observado nos testes com CaO igual ou maior que 0,20%.

Na Figura 5.39, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 20 minutos de pelotamento.



**Figura 5.39:** Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

Observou-se que, ao longo do teste, as pelotas continuavam a crescer, onde as pelotas se mostravam com diâmetro bem acima do desejado.

Ao fim do pelotamento, após aproximadamente 22 minutos, todas as pelotas formadas se encontravam com diâmetro acima de 19,0mm. A visão geral do disco evidenciava certa homogeneização das pelotas, porém com um diâmetro muito acima

do desejado, conforme se observa na Figura 5.40. Observam-se ainda, nas laterais do disco, pelotas com aspecto de umidade muito elevada.



**Figura 5.40:** Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas foram acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.41 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com teor de CaO em 0,26%.



**Figura 5.41:** Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento após término do teste com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

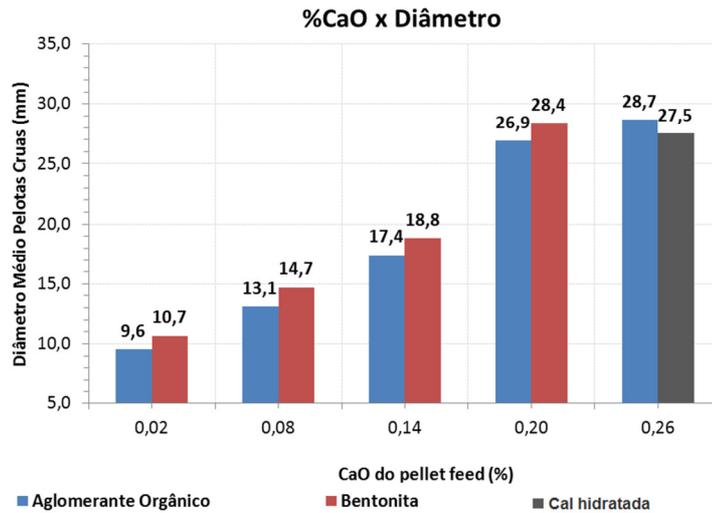
Uma análise mais detalhada das pelotas formadas ao término do teste evidencia uma elevada umidade superficial das mesmas, conforme mostrado em detalhe na Figura 5.42.



**Figura 5.42:** Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com cal hidratada e CaO do *pellet feed* em 0,26%.

O teste de pelotamento com a adição da cal hidratada evidenciou a influência da mesma na velocidade de crescimento das pelotas e ainda na formação de pelotas com diâmetro elevado, muito acima do desejado. Semelhantemente ao que foi observado nos testes com aglomerante orgânico e bentonita, as pelotas cruas formadas apresentavam elevada umidade superficial. Uma análise mais detalhada das pelotas formadas evidencia que, ao contrário das pelotas formadas nos testes com bentonita e aglomerante orgânico, as pelotas formadas somente com o uso da cal apresentavam uma forma ovalada e um acabamento muito ruim, característico de pelotas com crescimento irregular. Nesse caso, a ausência completa de qualquer um dos agentes aglomerantes (bentonita e aglomerante orgânico) pode ser a causa para formação de pelotas com forma irregular e pior acabamento.

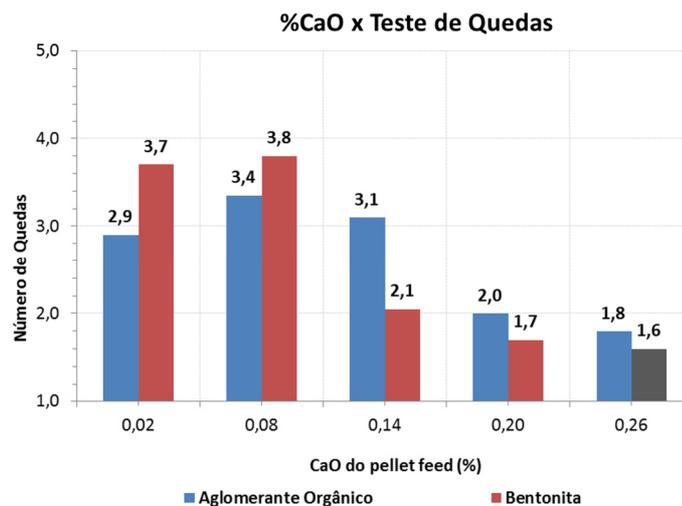
Na Figura 5.43, são mostrados os resultados de diâmetro médio para as pelotas obtidas em cada teste variando-se o teor de CaO do *pellet feed* com o uso de aglomerante orgânico e bentonita e o resultado do teste usando apenas cal hidratada com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,26%.



**Figura 5.43:** Diâmetro médio das pelotas cruas em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Observa-se que o diâmetro médio das pelotas obtidas no teste de pelotamento usando somente a cal hidratada foi muito próximo aos valores obtidos nos testes com teor de CaO em 0,20 e 0,26%, evidenciando a influência da cal hidratada no diâmetro médio das pelotas cruas.

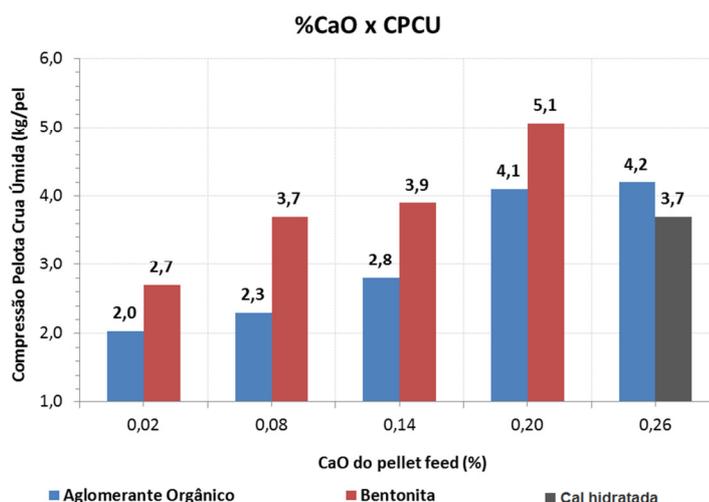
Na Figura 5.44 são mostrados os resultados de teste de quedas para as pelotas obtidas em cada teste.



**Figura 5.44:** Teste de quedas das pelotas cruas em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Observa-se que o teste de quedas das pelotas obtidas no teste de pelotamento usando somente a cal hidratada foi muito próximo aos valores obtidos nos testes com teor de CaO em 0,20 e 0,26%, evidenciando a influência da cal hidratada no diâmetro médio das pelotas cruas e conseqüentemente na qualidade da pelota crua.

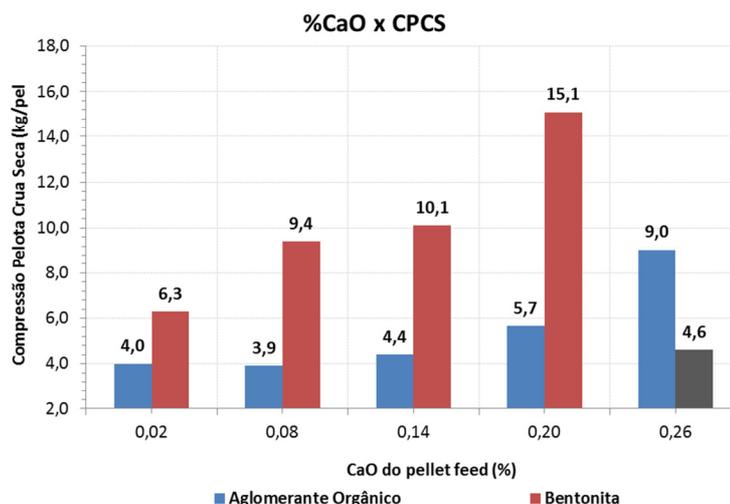
Na Figura 5.45 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua úmida para as pelotas obtidas em cada teste.



**Figura 5.45:** Compressão da pelota crua úmida em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Observa-se que a resistência a compressão das pelotas cruas úmidas obtidas no teste de pelotamento usando somente a cal hidratada foi muito próximo aos valores obtidos nos testes com teor de CaO em 0,20 e 0,26%, em função do elevado diâmetro médio das pelotas cruas, devido a dosagem de cal.

Na Figura 5.46 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua seca para as pelotas obtidas em cada teste.



**Figura 5.46:** Compressão da pelota crua seca em função do teor de CaO do *pellet feed*.

Observa-se que a resistência a compressão das pelotas cruas secas obtidas no teste de pelotamento usando somente a cal hidratada foi mais baixo que os valores obtidos nos testes com teor de CaO em 0,20 e 0,26%. Apesar do maior diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal, a ausência de um agente aglomerante, capaz de promover uma maior coesão entre os grãos de minério e dar maior resistência ao aglomerado, impactou no resultado de CPCU para o teste usando apenas a cal.

#### 5.5.5 Pelotamento com minério envelhecido

Testes realizados em laboratório evidenciaram a queda do pH do *pellet feed* com o tempo quando este foi mantido em contato com o ar ambiente. Acredita-se que essa queda nos valores de pH do minério pode estar relacionada à ação do CO<sub>2</sub>, que quando em contato com a água do *pellet feed* gera o ácido carbônico. Essa queda no pH pode ainda ser acompanhada de uma variação no grau de dispersão do minério.

Sendo assim, realizou-se um teste exploratório para avaliar se o efeito da cal hidratada, através do aumento do pH e do grau de coagulação do *pellet feed*, poderia ser minimizado ou até mesmo anulado através do contato do minério já misturado com a cal hidratada durante um longo período com o ar ambiente.

Conforme o procedimento utilizado nos testes anteriores, preparou-se uma solução de cal hidratada que foi misturada ao *pellet feed* com as mesmas características dos testes anteriores. A massa de cal adicionada na solução foi calculada objetivando-se

um teor de CaO do *pellet feed* em 0,14%. Depois o minério misturado com a solução de cal hidratada foi armazenado em baldes sem tampa, e mantido em contato com o ar ambiente (ao abrigo de chuvas) por 35 dias.

Após os 35 dias, o *pellet feed* foi separado em duas bateladas de 125 kg, e foram adicionados calcário, carvão e aglomerante orgânico. A umidade do mesmo foi ajustada com o uso de água destilada e deionizada para 10,0%, o mesmo valor dos testes anteriores. Após a adição dos insumos acima, aguardou-se 60 minutos e então se iniciou o pelotamento, seguindo o mesmo procedimento utilizado nos testes anteriores.

Na Figura 5.47, é mostrado o aspecto das pelotas cruas geradas no teste com aproximadamente 5 minutos de pelotamento e com o CaO do *pellet feed* em 0,14%. O teste usou o *pellet feed* misturado com a cal após 35 dias em contato com o ar ambiente e aglomerante orgânico que foi dosado em 0,035% (m/m) em relação ao *pellet feed*.



**Figura 5.47:** Aspecto visual das pelotas cruas com 5 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Observou-se a presença de algumas pelotas com diâmetro elevado, mas estas não eram predominantes na panela do disco. Um ponto importante é que as pelotas não apresentaram uma umidade superficial elevada, característica nos testes realizados com elevadas dosagens de cal.

Na Figura 5.48, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 10 minutos de pelotamento, já na etapa 2.



**Figura 5.48:** Aspecto visual das pelotas cruas com 10 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Nesta etapa do teste, observa-se uma tendência de redução no diâmetro das pelotas, que inicialmente estavam maiores. As pelotas apresentaram uma distribuição granulométrica dentro do esperado. O aspecto superficial das pelotas e o acabamento das mesmas se mostraram muito bons.

Na Figura 5.49, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 15 minutos de pelotamento.



**Figura 5.49:** Aspecto visual das pelotas cruas com 15 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Neste momento do teste, não se identificou praticamente nenhuma pelota com diâmetro elevado. As pelotas apresentaram uma distribuição de tamanho dentro da faixa esperada. As pelotas apresentaram ainda um ótimo acabamento superficial.

Na Figura 5.50, é mostrado o aspecto das pelotas cruas com aproximadamente 20 minutos de pelotamento.



**Figura 5.50:** Aspecto visual das pelotas cruas com 20 minutos de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Neste momento do teste, as pelotas estavam com uma distribuição de tamanho adequada, e com um bom acabamento superficial.

Ao fim do pelotamento, após aproximadamente 21 minutos, praticamente todas as pelotas formadas se encontravam com diâmetro abaixo de 19,0mm. A visão geral do disco evidenciava uma boa homogeneização das pelotas, sem a presença de pelotas com elevado diâmetro, conforme se observa na Figura 5.51.



**Figura 5.51:** Aspecto visual das pelotas cruas no disco de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Após o término do pelotamento, as pelotas geradas foram acomodadas em uma bandeja para análise e inspeção visual. Na Figura 5.52 é mostrado o aspecto final das pelotas geradas no teste de pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14% (após 35 dias).



**Figura 5.52:** Aspecto visual das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Observa-se uma distribuição adequada de tamanho das pelotas e poucas pelotas com diâmetro acima de 19,0mm.

Uma análise mais detalhada das pelotas formadas ao término do teste evidencia um bom acabamento superficial das pelotas, conforme mostrado em detalhe na Figura 5.53.



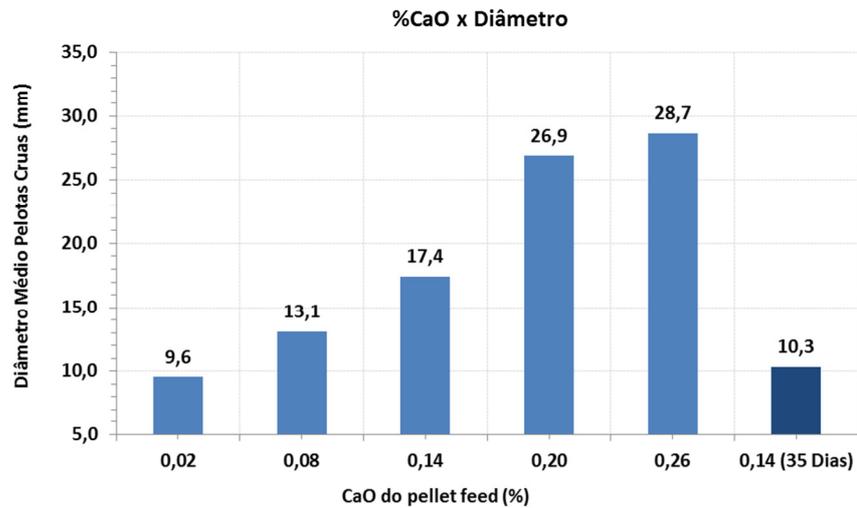
**Figura 5.53:** Detalhe da elevada umidade superficial das pelotas cruas após o pelotamento com aglomerante orgânico e CaO do *pellet feed* em 0,14%.

Ao contrário dos demais testes em que o teor de CaO do *pellet feed* estava em 0,14%, onde identificou-se a formação de pelotas com diâmetro elevado e um acabamento superficial ruim, com elevada umidade superficial, nesse teste os resultados foram satisfatórios.

As pelotas formadas apresentam um bom acabamento, umidade superficial adequada e diâmetro médio dentro do esperado. O *pellet feed* misturado com a cal, após

mantido em contato com o ar ambiente por um longo período, minimizou o efeito da cal hidratada no crescimento das pelotas e diâmetro médio final das mesmas.

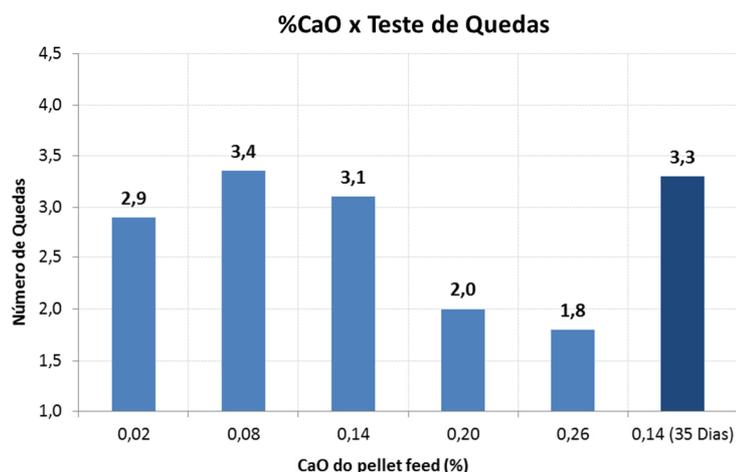
Na Figura 5.54, são mostrados os resultados de diâmetro médio para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.54:** Diâmetro médio das pelotas cruas em função da dosagem de cal hidratada com o uso de aglomerante orgânico.

Observa-se que o diâmetro médio das pelotas cruas formadas no teste usando o minério envelhecido, após 35 dias de contato com o ar ambiente, está entre o diâmetro médio obtido nos testes com o teor de CaO do *pellet feed* em 0,02 e 0,08%. O diâmetro médio obtido nesse teste está bem abaixo do diâmetro obtido no teste para o mesmo teor de CaO usando o aglomerante orgânico, com a mesma dosagem.

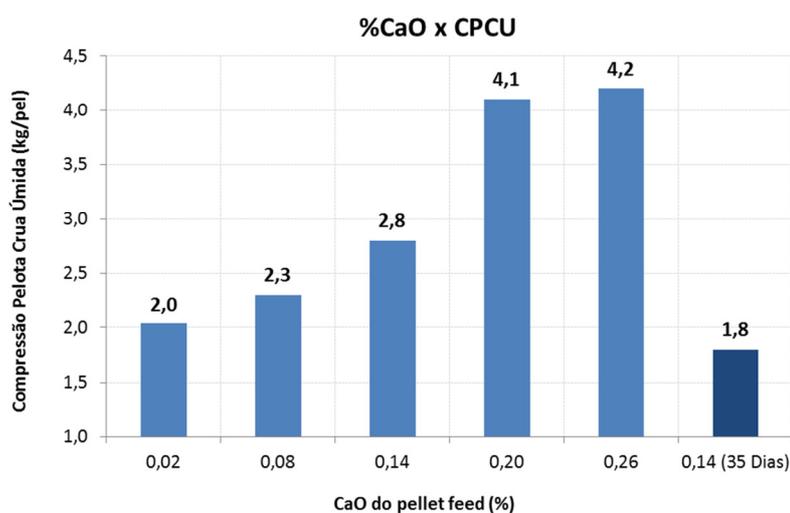
Na Figura 5.55 são mostrados os resultados do teste de quedas para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.55:** Teste de quedas das pelotas cruas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O resultado do teste de quedas das pelotas no teste usando o minério envelhecido mostrou-se muito satisfatório. O resultado está dentro do esperado para testes com o CaO em 0,08%.

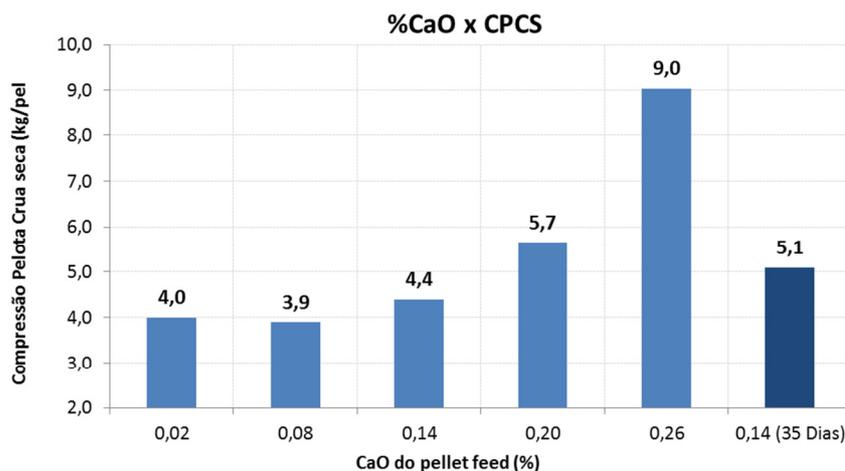
Na Figura 5.56 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua úmida para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.56:** Compressão da pelota crua úmida com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O resultado do teste de CPCU foi mais baixo que nos testes em que o teor de CaO do minério encontrava-se em 0,02 e 0,08%. Entretanto, o valor de 1,8 kgf/pelota está dentro do aceitável.

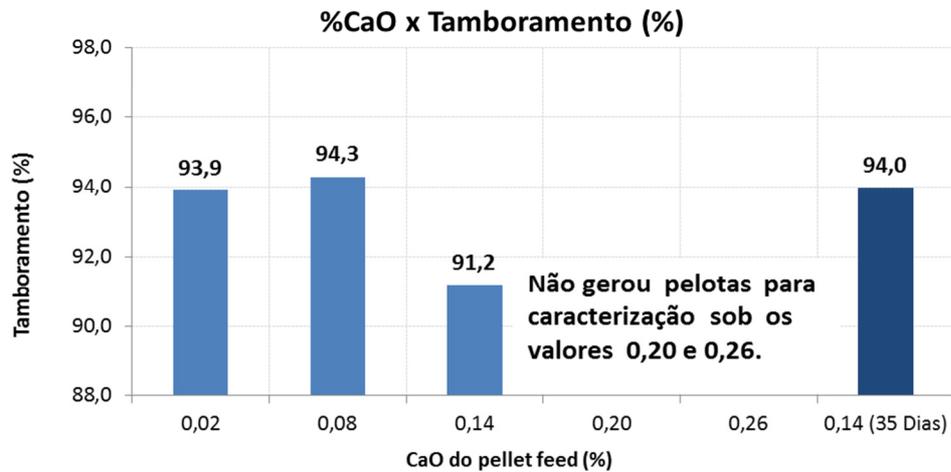
Na Figura 5.57 são mostrados os resultados de compressão da pelota crua seca para as pelotas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.57:** Compressão da pelota crua seca com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O resultado do teste de CPCS foi mais elevado que nos testes em que o teor de CaO do minério encontrava-se em 0,02 e 0,08%. Este resultado evidencia que a pelota estava com uma resistência adequada, consequência de uma boa formação do aglomerado, com um crescimento controlado, gerando pelotas com uma boa compactação das partículas de minério.

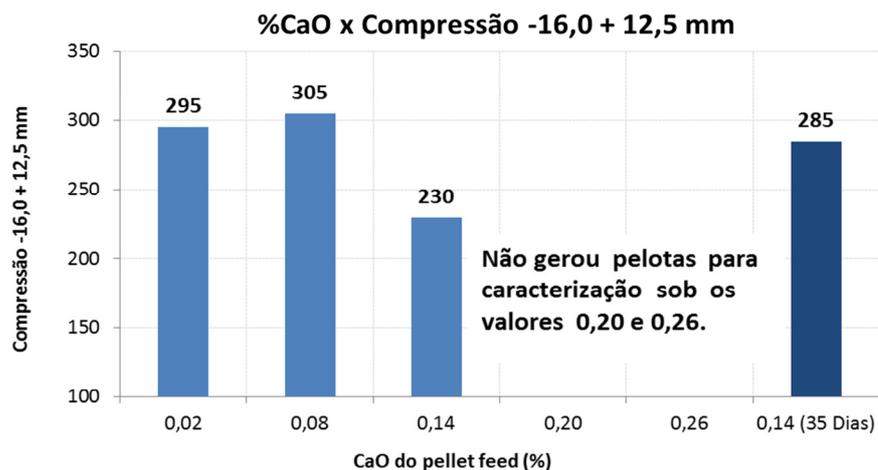
Na Figura 5.58 são mostrados os resultados de tamboramento para as pelotas queimadas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.58:** Tamboramento das pelotas queimadas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O resultado de tamboramento mostrou-se satisfatório. Esse resultado está associado a uma formação adequada das pelotas cruas e ainda uma boa distribuição de tamanhos com um diâmetro médio favorável à queima.

Na Figura 5.59 são mostrados os resultados de compressão para as pelotas queimadas obtidas em cada teste usando aglomerante orgânico.



**Figura 5.59:** Compressão das pelotas queimadas com aglomerante orgânico em função do teor de CaO do *pellet feed*.

O resultado de compressão mostrou-se em linha com os resultados obtidos nos testes com o CaO em 0,02 e 0,08%.

Após a realização desses testes, têm-se evidências que a cal hidratada, quando misturada ao *pellet feed* na forma de leite de cal, é capaz de influenciar no crescimento e no diâmetro médio das pelotas cruas durante a etapa de pelotamento. Acredita-se que o aumento da concentração dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{CaOH}^+$ , em função do aumento da dosagem de cal, favorece a interação entre os mesmos e o polímero do aglomerante orgânico, fazendo com que a eficiência no controle do crescimento das pelotas seja reduzida. Nos testes usando bentonita, os cátions  $\text{Ca}^{2+}$  podem interagir com a estrutura da bentonita, promovendo a substituição dos átomos de sódio por cálcio, o que reduz a eficiência da bentonita no controle do crescimento das pelotas.

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos testes realizados na planta piloto para testes completos de pelotamento mostraram que a adição de uma solução de cal hidratada ao *pellet feed* variando-se a massa de cal usada na solução influencia na etapa de formação das pelotas cruas durante o pelotamento.

Observou-se uma tendência de crescimento mais rápido das pelotas e a formação de pelotas cruas com diâmetros médios elevados em função de uma maior dosagem de cal hidratada. A adição de cal hidratada alterou o pH do *pellet feed* e o estado de agregação das partículas de minério, favorecendo a formação de pelotas com diâmetro acima do desejado.

Observou-se ainda que, para os testes de pelotamento nos quais foi adicionada cal hidratada de forma que o teor de CaO do *pellet feed* foi igual ou maior que 0,14%, o efeito da dosagem de cal no crescimento das pelotas cruas e a formação de pelotas com diâmetro acima do desejado foi o mesmo, tanto para os testes usando aglomerante orgânico ou bentonita.

A formação de pelotas com distribuição granulométrica inadequada, onde ocorre a concentração de pelotas nas faixas de maior diâmetro (acima de 16,0mm), impacta na qualidade das pelotas cruas e ainda na qualidade das pelotas queimadas.

Considerando-se esse comportamento no ambiente industrial, a formação de pelotas com diâmetro acima de 16,0 mm acarreta na redução da eficiência do processo pelotamento, onde haverá um aumento significativo da carga circulante, sobrecarregando os discos de pelotamento e impactando na qualidade das pelotas cruas. Haverá ainda um impacto no desempenho da etapa de queima, onde a concentração de pelotas de maior diâmetro irá impactar na etapa de secagem das mesmas, onde uma secagem ineficiente das pelotas cruas irá impactar na qualidade das pelotas queimadas e no ritmo de produção das plantas.

Portanto, considerando-se o processo pelotamento e os resultados obtidos nos testes, é desejável que a dosagem de cal hidratada se mantenha abaixo de patamares nos quais o teor final de CaO% do *pellet feed* esteja abaixo de 0,10% e próximo a 0,08%. Conforme os testes realizados na planta piloto, os melhores resultados obtidos foram para os pelotamentos onde os teores de CaO foram iguais ou menores que 0,08%.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar testes de pelotamento com reagentes que sejam capazes de reduzir ou eliminar os efeitos de elevadas dosagens de cal hidratada, de forma a garantir a formação de pelotas com distribuição granulométrica e diâmetro médio adequado;
- Realizar testes de pelotamento usando coagulantes orgânicos em conjunto com a bentonita e/ou aglomerante orgânico de forma a ter um melhor controle no crescimento das pelotas, favorecendo a formação de pelotas com diâmetro e distribuição granulométrica em faixas mais estreitas;
- Realizar testes de pelotamento avaliando o efeito a dosagem de cal hidratada para um *pellet feed* com menor área superficial (abaixo de  $1.800 \text{ cm}^2/\text{g}$ );
- Desenvolver/realizar testes para averiguar o comportamento das pelotas queimadas durante o manuseio;
- Realizar testes para averiguar a qualidade metalúrgica da pelota queimada;
- Realizar testes de pelotamento alterando as dosagens de aglomerante orgânico e bentonita para analisar as interações com a cal;
- Realizar testes de pelotamento para determinar a taxa de crescimento das pelotas em função de várias dosagens de CaO e níveis diferentes de área superficial e umidade do *pellet feed*.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, Y.M.Z.; MOHAMED, F.M. Variation in physic-chemical properties of iron oxide pellets using bentonite with calcium hydroxide as binder. *La Metallurgia Italiana*, vol. 11-12, 31-37, 2005.
- ARAUJO JUNIOR, A.M; PERES, A.E.C.; TURRER, H.D.G.; FONSECA, M.C.; BEHRING; R.S.; DOELLINGER, T.M.; PASSIGATI, V.P. Influência da cal na filtragem e pelotamento. In: XXIII ENTMME, Gramado, RS, 8p., 2009.
- BRAGANÇA, A.C.C.R. Avaliação de reagentes alternativos para substituição da cal em sistema de bombeamento de longa distância de polpa de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. 102p., 2008.
- BURDUKOVA, E.; VAN LEERDAM, G.C.; PRINS, F.E.; SMEINK, R.G.; BRADSHAW, D.J.; LASKOWSKI, J.S. Effet of calcium ions on the adsorption of CMC onto the basal planes of New York talc – A ToF-SIMS study. *Minerals Engineering*, vol. 21, 1020-1025, 2008.
- CAPES, C.E. Particle size enlargement. *Handbook of powder technology*, vol.1. Elsevier, p. 1-73, 1980.
- CARVALHO, M.R. Interferência de cátions  $Ca^{2+}$  nas etapas de deslamagem e flotação de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 57p., 2003.
- CHAPLIN, M. *Water structure and science*. Disponível na Internet via URL: <http://www1.lsbu.ac.uk/water/hycmc.html#sou>. Arquivo capturado em 25 de Abril de 2014.
- COTA, M.F. Influência da distribuição granulométrica do *pellet feed* no processo de aglomeração e na qualidade da pelota de minério de ferro para redução direta. Dissertação de Mestrado, REDEMAT – Ouro Preto, 142p., 2004.
- DANA, J. D. Manual de mineralogia. Rio de Janeiro : Livros técnicos e científicos. 1983. 642 p.
- DARLEY, H.C.H.; GRAY, G.R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Fifth Edition, Gulf Publishing Company, 643 p, 1988.
- DOELLINGER, T.M. Testes novos aglomerantes da Akzo Nobel. Relatório interno da Samarco Mineração S.A., 40p., 2011.

- FUERSTENAU, M.C., PALMER, B.R. Anionic flotation of oxides and silicates. In: FUERSTENAU, M.C. Flotation A.M. Gaudin Memorial Volume, v.1, AIME, New York, p. 148-196, 1976.
- IWASAKI, I., SMITH, K.A., LIPP, R.J., SATO, H. Effect of calcium and magnesium ions on selective desliming and cationic flotation of quartz from iron ores. In: SOMASUNDARAN, P. Fine particles processing. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, v.II, c.54, 1057-1082, 1980.
- JONES, R.L., MARWOOD, T.M., HORSLEY, R.R.. Red mud rheology; the behaviour of iron(III) oxide suspensions in strongly alkaline solutions. In: Progress and Trends in Rheology, 4, 1994, Sevilla. Proceedings of the Fourth European Rheology Conference. Darmstadt: Steinkopff, 1994. p.660-662.
- KIM, Y.H. Coagulants and flocculants: theory and practice, 1<sup>a</sup> ed. Littleton: Tall Oaks Publishing, 85p., 1995.
- LINS, F.A.F. Minerais coloidais, teoria alvo estendida e forças estruturais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. Série Tecnologia Mineral, n.78, 29p., 2000.
- MEYER, K. Pelletizing of iron ores. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg and Verlag Stahleissen MBH, Düsseldorf, Germany, 21-205, 1980.
- NUNES, S.F. Influência da carga circulante do pelotamento na qualidade física das pelotas cruas e queimadas da Samarco Mineração. Dissertação de Mestrado, REDEMAT – Ouro Preto, 133p., 2007.
- PARKS, G.A. Adsorption in the marine environment. In: RILEY, J.P.; SKIRROW, G., Eds. Chemical Oceanography, Academic Press, London, p. 241-308., 1975.
- PEREIRA, E. Química dos polímeros e aplicações. Disponível Internet via URL: <http://www.systemmud.com.br/index.php?PG=literatura>. Arquivo capturado em 17 de outubro de 2006.
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Manual Integrado da Gerência de Produção de Ubu. Gerência Geral de Operações – Pelotização. Revisão 01. 2013. Manual técnico da Samarco Mineração S/A.
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Relatório anual de sustentabilidade Samarco. Gerência Geral de Comunicação e Relações Institucionais. 2009.
- SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Relatório anual de sustentabilidade Samarco. Gerência Geral de Comunicação e Relações Institucionais. 2010.

- SAMPAIO, D.A. Estudo das propriedades de concentrados de minério de ferro da Samarco Mineração S.A. e sua influência no potencial de entupimento do mineroduto. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 158p., 2002.
- SILVA, A.M. Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 112p., 2006.
- SHAW, D.J. Introduction to colloid and surface chemistry (Colloid and Surface Engineering). 4<sup>a</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
- STUMM, W. Chemistry of the Solid-Water Interface. John Wiley & Sons, Inc., 428p, 1992.
- TURRER, H.D.G.; ARAUJO JUNIOR, A.M; DOELLINGER, T.M.; ZUCHI, M.A.; PERES, A.E.C. Efeito da adição de coagulantes/floculantes na filtração. IN: 40<sup>o</sup> Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e 11<sup>o</sup> Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 9p. 2010.
- YOPPS, J.A., FUERSTENAU, D.W., In: FUERSTENAU, M.C., Oxide and silicate flotation, In: MATIS, K.A., Flotation Science and Engineering, cap. 4, New York, Dekker, 1995.
- ZHONGHUA, P.; SOMASUNDARAN, P.; TURRO, N.J.; JOCKUSCH, S. Interactions of cationic dendrimers with hematite mineral. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, v. 238, p. 123–126, 2004.