

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

**Controle de um Processo de  
Pelotização: Realimentação por Imagem**

Aluno: José Eduardo Fernandes Nunes  
Orientador: Prof. Walmir Matos Caminhas

## AGRADECIMENTOS

A determinação nos guia na jornada inabalável de realizar algo novo em nossas vidas, mesmo que com grandes dificuldades, mas sempre rica em experiência.

Se hoje posso me orgulhar de um sonho realizado, é porque pude contar com o apoio de pessoas que sempre estiveram ao meu lado, minha esposa, Dalgisa e meus filhos, Caio, Victor e Bruna.

Aos professores Walmir Matos Caminhas e Benjamim Rodrigues de Menezes, os meus sinceros agradecimentos pelo apoio, estímulo e disponibilidade que tiveram na orientação deste trabalho. Vocês são merecedores de minha admiração pela competência técnica e ética profissional que demonstraram durante os trabalhos desta dissertação.

Aos colegas de trabalho, engenheiros, técnicos, operadores, é impossível citar nominalmente todos que colaboraram, meu grande obrigado.

Aos meus irmãos, meus agradecimentos pelo estímulo que recebi.

Em especial gostaria de agradecer aos colaboradores Leandro Carísio, Renato Maia, Célio Oliveira Filho e Marcos Vinicius L. Pereira, que me deram todo apoio e dedicaram seus valorosos esforços, acreditando na idéia desta dissertação.

Á minha esposa Dalgisa Motta, minha mãe Elce Fernandes, e a meu pai José Geraldo Rabello Nunes, em memória, dedico este sonho.

## **Resumo**

Pelotas são bolas produzidas de concentrados de minérios de ferro de diferentes composições químicas e mineralógicas, com propriedades específicas e de grande aplicação na siderurgia.

As instalações industriais de pelotamento no mundo não possuem o controle automático do processo, sendo a experiência do operador responsável pela qualidade da pelota formada.

Esta dissertação descreve a aplicação de controle nebuloso em uma instalação industrial de pelotização de minério de ferro, com realimentação através de sistema de análise de imagens.

O objetivo foi desenvolver um modelo para detectar padrões de qualidade de dimensão de pelota, no processo, e a partir da identificação deste padrão, efetuar o controle da rotação do tambor de formação de pelotas. O modelo desenvolvido visou otimizar o rendimento da formação de pelotas, melhorando a eficiência da produção e garantindo a qualidade.

Esta dissertação está composta da descrição do processo, do equipamento de formação de pelotas e da planta industrial onde é aplicado o controle. São descritos os conceitos e estudos realizados no trabalho de definição da estratégia do processamento digital de imagens e da validação dos resultados das análises feitas.

Na modelagem matemática do processo de formação de pelotas, é utilizado o método de identificação por resposta ao degrau para determinação do tempo de resposta do tambor.

O projeto do sistema nebuloso de controle considerou os resultados de testes com o grau de interação entre as variáveis que influenciam a formação de pelotas.

Os resultados obtidos com a implementação do controle são apresentados e discutidos.

## **Abstract**

Pellets are bolls produced with iron ore concentrates of different chemical and mineralogical, with specific properties and great application on steel manufactures.

The palletizing plants around world do not have an automatic process control, being the visual operator experience responsible for the pellet quality.

This thesis describes the practical application of a Nebulous control system to an industrial iron ore palletizing plant, with feedback by a digital image process. It is composed with the process and the equipment description and the information about the area where the control is applied.

The objective was to develop a model to detect quality pellet size standard on the process, and with the identification of the standard, execute the pellet drum rotation control. The model developed aimed to improve the pellet formation yield, making better the production with quality.

This thesis is composed of the process, pellet equipment and industrial plant description. The concepts and studies made on the work for definition of the strategy of the digital process image and the validation of the results are shown.

On the mathematical modeling of the pellets formation process is utilized the method of identification through the step response to determine the response of time of the drum.

The fuzzy control system design considered the tests results to define the interactions between the variables that causes changes on the pellets formation.

The results obtained with the application of the control system is shown and discussed.

## ÍNDICE

### Capítulo 1

Introdução .....	1
1.1 O Processo de Pelotização .....	1
1.1.1 Desenvolvimento Histórico .....	1
1.2 Produção de Pelotas de Minério de Ferro .....	3
1.2.1 Definição de Pelotas .....	4
1.2.2 Formação da Pelota .....	6
1.3 Motivação para o Desenvolvimento do Trabalho .....	6
1.4 Objetivos .....	9
1.5 Metodologia .....	9

### Capítulo 2

2.1 O Processo de Pelotização .....	10
2.1.1 Britagem e Concentração .....	10
2.1.2 Planta de Mistura .....	11
2.1.3 Planta de Pelotamento .....	12
2.1.4 Planta de Endurecimento de Pelotas .....	15
2.2 Mecanismo da Formação de Pelotas .....	16
2.3 Fatores que Influenciam a Formação de Pelotas .....	20
2.3.1 Propriedades Granulométricas dos Minérios .....	21
2.3.2 Influência da Adição de água na Formação de Pelotas .....	21
2.3.3 Influência de Aditivos na Formação de Pelotas .....	22
2.4 Equipamentos de Formação de Pelotas .....	22
2.4.1 Tambor de Formação de Pelotas .....	23
2.4.1.1 Componentes do Tambor de Formação de Pelotas .....	24
2.5 Caracterização do tambor de formação de pelotas e definição da estratégia de controle .....	26

2.5.1	Considerações Sobre Modelos Matemáticos .....	26
2.6	Estratégia de Controle .....	27
2.6.1	Variáveis não Controladas do Processo de Formação de Pelotas	28
2.6.2	Características Físicas do Tambor de Pelotamento .....	28
2.6.3	A Peneira de Classificação de Pelotas .....	29
2.6.4	Variáveis Manipuladas do Processo de Formação de Pelotas ....	29
2.6.5	Controle Atual do Tambor de Formação de Pelotas .....	29
2.7	Caracterização da formação de pelotas .....	31
2.7.1	Efeito da Injeção de Água no Tamanho da Pelota Formada .....	31
2.7.1.1	Metodologia .....	31
2.7.1.2	Resultados de Testes no Processo de Formação de Pelotas .....	32
2.7.2	Efeito da Variação da Rotação do Tambor no Processo de Formação de Pelotas .....	32
2.7.2.1	Metodologia .....	34
2.7.2.2	Resultados de Testes com a Rotação do Tambor .....	35
2.7.3	Conclusão sobre os testes .....	36
2.7.4	Efeito da Variação da Rotação do Tambor na Produtividade na Formação de Pelotas .....	37
2.7.5	Caracterização do Tempo de Resposta da Granulometria .....	38
2.7.6	Validação do Modelo Matemático .....	40
2.8	Conclusão sobre a validação do modelo matemático .....	42

### Capítulo 3

3.1	Estratégia do processamento de imagens e classificação de pelotas	43
3.1.1	Objetivo da Estratégia de Análise de Imagens .....	44
3.1.2	Aquisição das Imagens .....	44
3.1.3	Tratamento das Imagens .....	45
3.1.4	Filtragem Inicial .....	46
3.1.5	Obtenção das Imagens Binárias .....	49

3.1.5.1	Detecção de Bordas .....	49
3.1.5.2	Binarização por Limiar Simples .....	52
3.2	Classificação das Pelotas .....	53
3.2.1	Medida do Objeto Padrão e da Relação Milímetros/Pixel .....	56
3.3	Conclusão sobre o processamento de imagens .....	56
3.4	Validação dos Dados de Medições dos Diâmetros das Pelotas .....	57
3.5	Conclusão sobre os resultados do programa de análise de imagens .....	64

## Capítulo 4

4.1	Projeto do sistema de controle .....	65
<b>4.1.2</b>	<b>Controle da Granulometria .....</b>	<b>68</b>
4.1.2.1	Definição das Regras Básicas .....	68
4.1.2.2	Conclusão sobre aplicação do controlador nebuloso .....	70
4.2	Implementação prática do sistema de controle .....	70
<b>4.2.1</b>	<b>Descrição do Hardware Utilizado no Controle .....</b>	<b>71</b>
4.2.1.1	Transdutor de Sinal .....	71
4.2.1.2	Módulo 1771-IFE Conversor Analógico/Digital .....	71
4.2.1.3	Arquitetura do Sistema de Aquisição de Imagens .....	73
4.2.1.3.1	Câmera de Vídeo .....	74
4.2.1.3.2	Placa de Captura de Vídeo .....	74
4.2.1.3.3	Computador .....	75

## Capítulo 5

5.1	Análise dos resultados obtidos .....	77
<b>5.2</b>	<b>Resultados Obtidos .....</b>	<b>78</b>

5.2.1	Medições das Pelotas em Tempo Real .....	78
5.2.2	Sistema de Controle .....	82
5.3	Conclusão Final .....	85



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Grupos de classificação de pelotas .....	43
Tabela 4.1 – Dados de testes de fotografias de pelotas selecionadas .....	58
Tabela 4.2 – Resultados das fotografias do processo, primeiro teste .....	60
Tabela 4.3 – Resultados não normalizados e normalizados do laboratório (excluídas as pelotas dos grupos 1,2 e 5), primeiro teste.....	61
Tabela 4.4 – Comparação de resultados .....	61
Tabela 4.5 – Comparação de resultados de teste e laboratório .....	62
Tabela 4.6 – Resultados das fotografias do processo, segundo teste .....	63
Tabela 4.7 – Resultados não normalizados e normalizados do laboratório, segundo teste .....	63
Tabela 7.1 – Características técnicas do conversor de sinais .....	71
Tabela 7.2 – Características técnicas do módulo 1771-IFE .....	72
Tabela 8.1 – Resultados do programa de análise de granulometria .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Foto de pelotas formadas .....	4
Figura 1.2 – Gráfico com histórico do processo apresentando o rendimento (%) da formação de pelotas, em todas as faixas .....	7
Figura 1.3. Os dados referentes à linha A de pelotamento, com a alimentação nova, DW-GTA, e a alimentação total, BW-TB02A .....	8
Figura 2.1 – Fluxograma da produção de concentrado .....	10
Figura 2.2 – Planta de mistura dos aditivos e aglomerantes ao concentrado.	11
Figura 2.3 - Planta de pelotamento .....	12
Figura 2.4 – Linha de pelotamento .....	13
Figura 2.5 – Dados de processo mostrando quantidade de material maior que 16,0 mm e finos .....	14
Figura 2.6 – Visualização do forno de endurecimento de pelotas .....	16
Figura 2.7 - Partículas secas de minério em contato com a água .....	17
Figura 2.8 - Ligações formadas devido às tensões superficiais do líquido .....	17
Figura 2.9 - Aglomerações iniciadas .....	18
Figura 2.10 - Aglomeração não formada .....	18
Figura 2.11 - Aglomeração mais densa .....	19
Figura 2.12 – Forças atuantes na formação da pelota .....	19
Figura 2.13 – Estágio final da formação da pelota .....	20
Figura 2.14 – Foto de um tambor de formação de pelotas .....	24
Figura 2.15 – Dados de um tambor de formação de pelotas .....	25
Figura 2.16 – Diagrama do sistema alimentação do tambor de formação de pelotas .....	30
Figura 2.17 – Efeito da injeção de água na granulometria da pelota .....	32
Figura 2.18 – Efeito da baixa rotação no tambor de formação de pelotas ....	33
Figura 2.19 - Efeito da alta rotação no tambor de formação de pelotas .....	33
Figura 2.20 - Efeito da adequada rotação no tambor de formação de pelotas	34

Figura 2.21 – Aumento do percentual de pelotas formadas, na faixa de 9,5 a 12,5 mm, em relação ao aumento da rotação de tambor de formação de pelotas .....	36
Figura 2.22– Efeito da rotação na quantidade do recirculado .....	37
Figura 2.23 – Curva de resposta do tambor .....	39
Figura 2.24 – Curva de resposta ao degrau da equação de simulação, com tempo de resposta, $\tau$ , de 75 segundos .....	41
Figura 3.1 – Imagem do transportador de pelotas .....	45
Figura 3.2 – Aplicação do operador <b>T</b> de média em um pixel .....	46
Figura 3.3 – Imagem em níveis de cinza .....	47
Figura 3.4 – Imagem em níveis de cinza após filtragem por média (1 iteração) .....	48
Figura 3.5 – Imagem em níveis de cinza após filtragem por média (3 iterações) .....	48
Figura 3.6 – Detecção de Bordas com o método de Prewitt .....	49
Figura 3.7 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 90), sem filtragem por média .....	50
Figura 3.8 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 114) sem filtragem por média .....	51
Figura 3.9 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 114) com filtragem por média (2 iterações) .....	51
Figura 3.10 – Imagem binarizada sem filtragem, limiar de binarização de valor 114 .....	52
Figura 3.11 – Imagem binarizada com filtragem (2 iterações), limiar de binarização de valor 114 .....	52
Figura 3.12 – Metodologia de classificação das pelotas .....	53
Figura 3.13 – Visualização da metodologia para classificação das pelotas ....	54
Figura 3.14 - Fotografia de pelotas classificadas na faixa de 9,5 a 12,5 mm	57
Figura 3.15 – Objeto padrão para obtenção da relação pixel/mm, calibração	59
Figura 3.16 – Gráfico dos resultados das fotografias do primeiro teste .....	62
Figura 3.17 – Gráfico dos resultados das fotografias do segundo teste .....	64
Figura 4.1 - Diagramas dos controladores propostos .....	66

Figura 4.2 – Diagrama do processo e instrumentação de controle .....	67
Figura 4.3 – Sistema nebuloso para controle da granulometria .....	68
Figura 4.4 – Funções de pertinência do erro do controlador nebuloso da granulometria .....	69
Figura 4.5 – Funções de pertinência da ação do CF da granulometria .....	70
Figura 4.6 – Sistema de aquisição de imagens .....	73
Figura 5.1 – Sistema de aquisição de imagens sobre o transportador GB-01	79
Figura 5.2 – Leito de pelotas no transportador GB-01 .....	80
Figura 5.3 – Sistema de aquisição e análise de imagens .....	80
Figura 5.4 – Imagem adquirida no transportador GB-01 .....	81
Figura 5.5 – Gráfico dos resultados das medições de pelotas em tempo Real .....	82
Figura 5.6 – Sistema de controle de velocidade do tambor de formação de pelotas .....	83
Figura 5.7 – Gráfico dos dados de processo de formação de pelotas .....	84
Figura 5.8 – Gráfico dos dados de processo das linhas de formação de pelotas .....	85

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

##### 1.1.1 Desenvolvimento histórico

As aglomerações de minério de ferro tais como pelotas, blocos, ou *sinter*, não são os produtos finais. As aglomerações são formadas por finos de minério que não podem ser utilizados nos fornos ou nas plantas de redução direta, devido aos efeitos de redução da permeabilidade dos fornos, causando distúrbios na operação dos mesmos.

Até a década de cinquenta, os finos de minério formavam grandes pilhas nas minas, sem uso econômico, e, em vários países industrializados, testes de aglomeração eram realizados, embora com diferentes intensidades, pois países com importantes reservas de minério de ferro tinham menor interesse. Em países com pequenas reservas a situação era diferente. Estes apresentavam desenvolvimento contínuo no processo de sinterização, não apenas com o fino do minério, mas também com produtos secundários do próprio minério bruto, e finos, gerados dos processos de moagem, e da lama dos processos de limpeza (Meyer, 1980).

Países como Suécia e Alemanha foram impulsionados a dar especial atenção ao processo de sinterização e por conseqüência ao problema da concentração de finos. Na Suécia os finos passaram a não ser adicionados ao *sinter*, mas passaram a ser formados em bolas. Com a adição de água e depois endurecidas. Com uso de pasta ou via processo térmico, com patente de 1912 em nome de Swede A. G. Andersson. Em 1913 a patente sobre o processo de formação de pelotas de finos de minério foi dada a C. A. Brackelsberg na Alemanha (Meyer, 1980).

Resultados de testes de Brackelsberg mostraram que as pelotas eram mais rapidamente reduzidas que os granulados de minério ou *sinter*. Em 1926 a *Krupp* construiu uma planta piloto de capacidade de 120 toneladas por dia, a *Rheinhausen Stell Plant*, que funcionou até 1937. A partir desta data houve uma paralisação no processo de pelotização.

Em 1943, intensivo desenvolvimento sobre o processo de pelotização foi iniciado com orientação da Universidade de *Minnesota* com o objetivo de manter o suprimento de minério de ferro proveniente da mina de *Lake Superior*, especialmente de *Mesabi Range*, nos Estados Unidos.

Em 1946 na Suécia foi fundado o *Jernkontoret*, o Instituto de Ferro e Aço da Suécia, em Estocolmo para aplicar finos, o que propiciou o surgimento de várias pequenas plantas industriais e foi o impulso decisivo para futuros desenvolvimentos no processo de redução direta.

Como resultado de intensiva cooperação entre grandes companhias de mineração americanas, a *Reserve Mining Co.*, a *Erie Mining Co.* e a Universidade de *Minnesota*, em 1955, foram inauguradas duas grandes plantas industriais de pelotização com capacidade anual de 12 milhões de toneladas.

Neste tempo, nem os Estados Unidos e nem a Suécia estavam interessados em outros processos de pelotização que não os processos utilizando concentrados de minério de ferro, mas nova situação estava surgindo no mundo, com o melhoramento de várias etapas do processo de *sinter*, desenvolvendo nova variante para formar a base de novo processo de pelotização com minério de ferro e misturas. Este novo processo teve início no final da Primeira Grande Guerra, com importância de acordo com a viabilidade das reservas existentes em vários países.

O processo de sinterização foi modificado de forma que somente os finos de minério eram transformados em bolas de 3 a 6 mm de diâmetro,

misturados com coque de carvão. A COMINCO em Trail, Canadá, e *Cleveland Cliffs Iron Co.* operaram plantas industriais deste tipo por muitos anos. F. Cappel e H.B. Wendeborn descrevem os desenvolvimentos dos processos de sinterização (F. Cappel, 1973) e (H.B. Wendeborn, 1978).

Em vários países, a partir de 1948 até 1980, o processo de sinterização foi desenvolvido para se adaptar à variação do suprimento de minérios de granulometria diferentes. Como resultado foi aplicado o processo de pelotização, para não somente com uso de concentrados, mas também outros minérios finos (Meyer, 1980).

## **1.2 PRODUÇÃO DE PELOTAS DE MINÉRIO DE FERRO**

Atualmente a pelotização de minério de ferro é um processo importante na fabricação do aço. As pelotas constituem uma das matérias primas básicas dos alto-fornos. Dados de 2001 indicam que em torno de 280 milhões de toneladas são produzidas anualmente, sendo que o Brasil contribui com aproximadamente 38 milhões de toneladas (Borim, 2000).

Existe uma tendência mundial de aumento do consumo de pelotas devido a fatores tais como redução da oferta de minério de ferro granulado de alto teor, maior produtividade dos alto-fornos com pelotas e o aumento da produção de ferro primário por redução direta.

Uma síntese das melhorias implementadas no processo de minério de ferro, em uma instalação industrial pode ser encontrada em Heep H. (Heep, 1999).

Na última década, as exigências de qualidade e baixo custo imposto aos produtores de pelotas têm aumentado, exigindo esquemas de controle e

automação, visando redução de custos de produção, melhoria de rendimentos e garantia de qualidade do processo.

### **1.2.1 Definição de Pelotas**

Pelotas, *pellets*, figura 1.1, são bolas produzidas de concentrados e minérios de ferro de diferentes composições químicas e mineralógicas, com propriedades tais como: distribuição uniforme de tamanho (na faixa de 9 a 15 mm de diâmetro), grande concentração de ferro (maior que 63%), alta porosidade (de 25 a 30 %), praticamente sem perdas ao fogo, com uniformidade mineralógica, com alta e uniforme característica mecânica e baixa tendência à abrasão.



Figura 1.1 – Foto de pelotas formadas

Para obter estas propriedades com grande variedade de minérios, adequados métodos de produção são utilizados. Três estágios de processo são envolvidos para produzir as pelotas:



- preparação do minério natural;
- formação das pelotas verdes ou pelotas não endurecidas;
- endurecimento das pelotas.

O sucesso na produção de pelotas depende do sucesso em cada uma das etapas citadas. Um erro na etapa precedente não é completamente corrigido nas etapas posteriores. Mesmo na etapa de endurecimento, uma boa qualidade não é obtida com pelotas de formação ruim.

O objetivo da formação de pelotas é tê-las com o tamanho dentro da faixa desejada e com características mecânicas que permitam o transporte seguro do equipamento de formação até o equipamento de endurecimento.

Os fatores decisivos para a formação e propriedades de pelotas verdes são:

- forças físicas tais como as de "Van der Waals", magnéticas ou eletrostáticas;
- área superficial tais como tamanho das partículas, distribuição das mesmas, forma e estrutura cristalina;
- forças capilares e tensões de superfície com a adição de aderentes como água.

Alguns destes fatores, principalmente os dependentes de minério natural, não são variáveis, entretanto influenciam a formação da pelota.

Os fatores variáveis são:

- quantidade de água adicionada;
- granulometria e forma das partículas;
- equipamento utilizado e as forças conjugadas aos movimentos deste equipamento.

### **1.2.2 Formação de Pelotas**

Além da parte sólida, a parte líquida é requerida para a formação das pelotas. As forças de interface têm um efeito coercivo nas partículas sólidas, no líquido e no ar. Estas forças consistem na tensão de superfície da substância usada na mistura, usualmente água, e das forças capilares desenvolvidas nas ligações dos líquidos que encobrem cada partícula. Sob estas condições uma certa força elástica ocorre. As forças resultantes da tensão de superfície formam uma superfície côncava no líquido, onde forças de compressão tornam-se ativas.

Para a formação das pelotas há duas possibilidades:

- as partículas sólidas são agregadas no misturador. As partículas são unidas de acordo com a posição mais favorável, uma em relação às outras, e são compactadas pelo movimento do misturador;
- no segundo caso, a formação de pelotas é obtida rolando a mistura minério/água em tambores ou discos. A superfície líquida tem movimento livre o que possibilita a formação de ligações capilares entre partículas.

### **1.3 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO**

O tambor de pelotamento apresenta várias possibilidades para se obter um ótimo controle da eficiência. Como todo o processo de pelotamento é influenciado pelas condições naturais do minério e estas podem variar em função da mineralogia e da homogeneização, o desafio de controle do processo consiste na definição de uma estratégia adequada que proporcione operação otimizada, estável e eficiente, em atendimento às especificações da qualidade.

O processo hoje adotado apresenta variações no rendimento da formação de pelotas da faixa de 9,5 mm a 12,5 mm e de 12,5 mm a 16 mm, de forma complementar, com valores que variam de 55 % a 75 %, para a faixa de 9,3 a 12,5 mm, e de 40 % a 20 % para a faixa acima de 12,5 mm, conforme mostra o gráfico da figura 1.2.

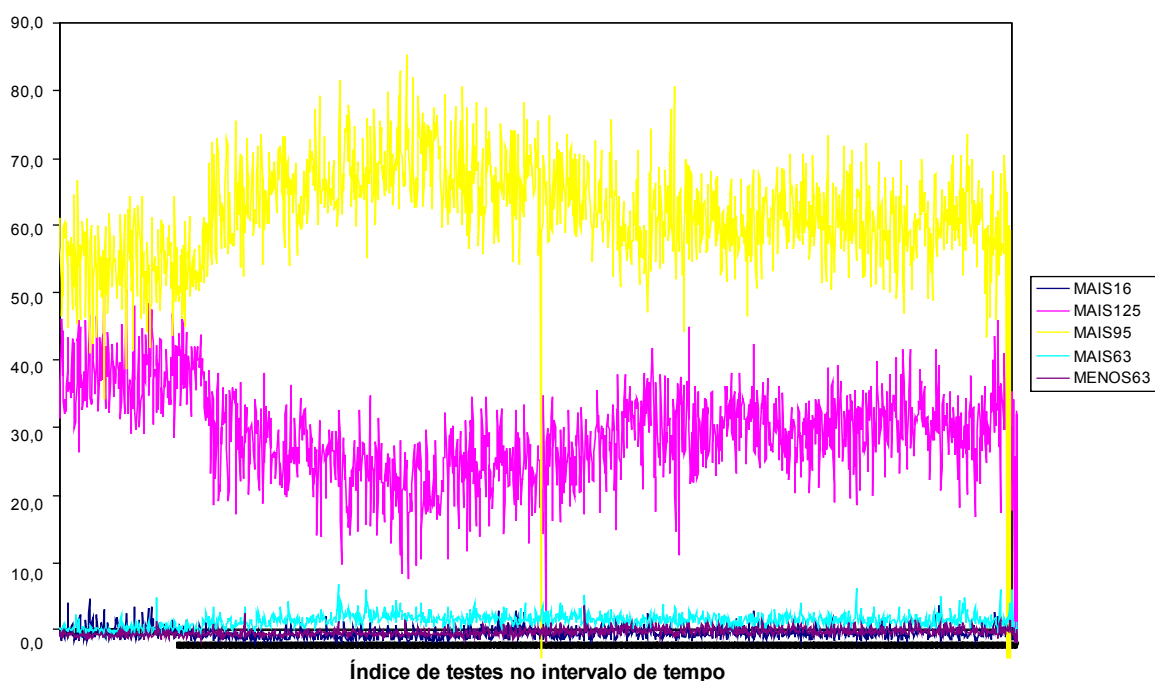


Figura 1.2 – Gráfico com histórico do processo apresentando o rendimento (%) da formação de pelotas, em todas as faixas

Esta evidência de variação de resultados mostra que é possível o desenvolvimento de um controle que eleve o percentual de pelotas da faixa de 9,3 mm a 12,5 mm para 70 %, aumentando o rendimento do tambor e conseqüentemente a produção horária, reduzindo o consumo de energia na queima e melhorando a qualidade da pelota queimada, devido ao melhor fluxo dos gases.

Os dados de processo do balanço de massa dos tambores de pelotamento foram armazenados em arquivos e analisados conforme é

apresentado no gráfico da figura 1.3. Os dados referem-se à balança dosadora de alimentação nova, DW-GT-A, referente à linha A de pelotamento, e a balança integradora da alimentação total do tambor, BW-TB-02-A.

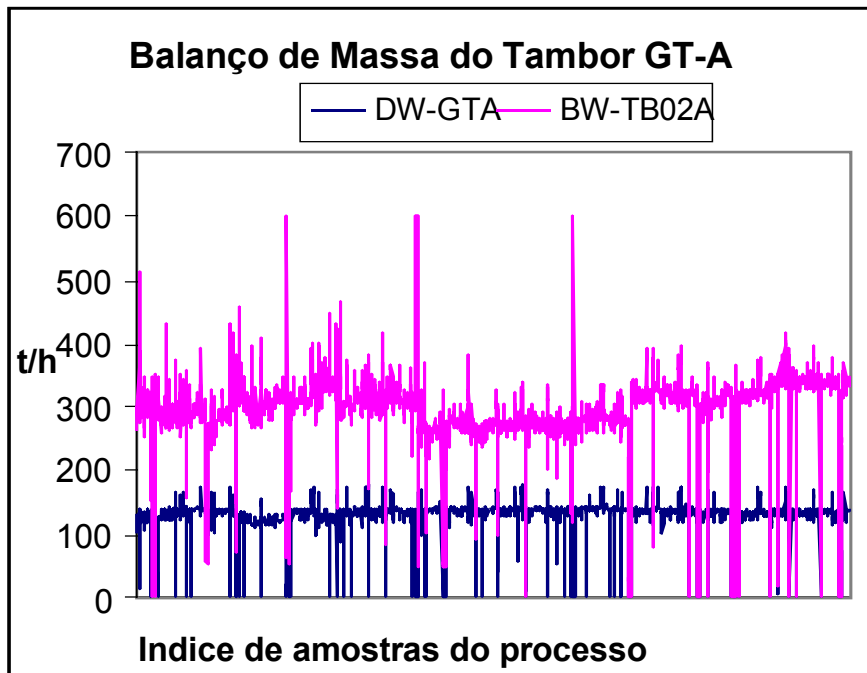


Figura 1.3. Os dados referentes à linha A de pelotamento, com a alimentação nova, DW-GTA, e a alimentação total, BW-TB02A

Os dados mostram que a quantidade de material da massa circulante varia de 2 a 3 para 1, em relação à alimentação nova, o que demonstra um desajuste nos parâmetros de operação do tambor, ocasionando uma variação na quantidade de pelotas bem formadas e conseqüentemente na produtividade do equipamento.

## **1.4 OBJETIVOS**

Esta dissertação tem por objetivo desenvolver um sistema de controle da granulometria, através de realimentação por imagem digital, de um tambor formação de pelotas abrangendo:

- a qualidade do produto formado através do controle da granulometria via processamento digital de imagens e
- a produtividade do equipamento.

## **1.5 METODOLOGIA**

As etapas deste trabalho consistiram das seguintes etapas:

- investigação detalhada do processo.
- investigação das grandezas que influenciam a formação das pelotas.
- levantamento de dados e modelagem matemática das grandezas do tambor, que influenciam a formação das pelotas.
- implementação do sistema de controle da qualidade do tambor de formação de pelotas com realimentação por análise de imagens.
- comprovação prática dos resultados pelo balanço de massa do sistema de pelotamento.
- comprovação prática dos resultados pela análise das dimensões das pelotas formadas e pelo balanço de massa do sistema de pelotamento.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 O PROCESSO DE PELOTIZAÇÃO

#### 2.1.1 Britagem e Concentração

O minério de ferro é geralmente lavrado a céu aberto, ocorrendo principalmente, na forma de hematita -  $Fe_2O_3$  e de magnetita -  $Fe_3O_4$ . Em função de diversos fatores econômicos, técnicos e metalúrgicos, deve-se realizar um tratamento apropriado do minério de ferro para sua utilização em alto-forno e planta de redução direta.

Com um processo básico de britagem e classificação, as frações de 0,1 a 6,3 mm e 6,3 a 30 mm já estão prontas para comercialização, na forma de *sinterfeed*, matéria prima para o processo de sinterização e bitolados, *lump ore*, para aplicação nos autofornos.

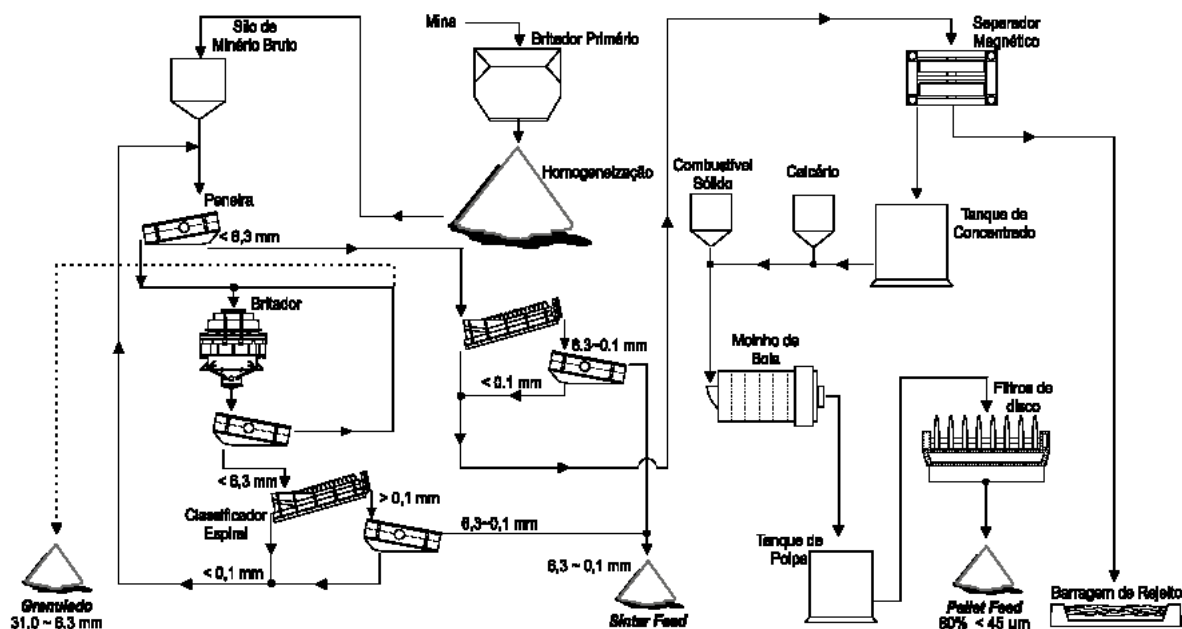


Figura 2.1 – Fluxograma da Produção de concentrado

A figura 2.1 apresenta um fluxograma que representa o processo de beneficiamento do minério de ferro até a obtenção da matéria-prima para a produção de pelotas.

### 2.1.2 Planta de Mistura

Na CVRD MINERAÇÃO S.A., antiga Ferteco, a fração fina resultante do processo de britagem e classificação, figura 2.1, é tratada para aumento do teor de ferro, com redução de sílica,  $\text{SiO}_2$ , e alumina,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , utilizando-se de separadores magnéticos. Em seguida o concentrado, com granulometria de 85% menor que  $45 \mu\text{m}$ , é moído e filtrado. Este produto é a matéria prima para o processo de pelotamento.

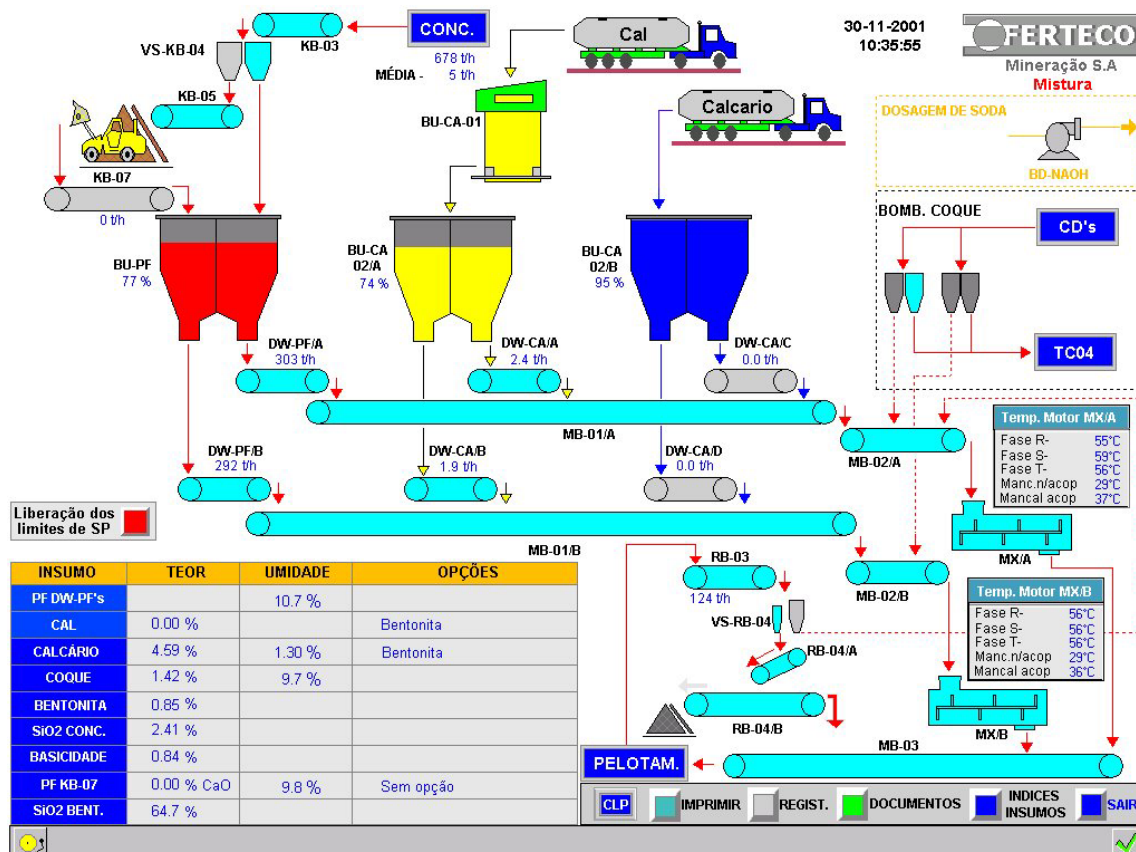


Figura 2.2 – Planta de mistura dos aditivos e aglomerantes ao concentrado.

Ao concentrado de minério de ferro são adicionados aglomerantes e aditivos, tais como bentonita, dolomita, cal e calcário. Os aglomerantes são utilizados para a formação das pelotas e os aditivos para a correção das propriedades químicas das mesmas. Nesta fase do processo são adicionados os combustíveis sólidos como coque de petróleo e antracito, para reduzir o consumo de combustível requerido para combustão interna da pelota. A figura 2.2 representa de forma esquemática o processo de mistura dos aditivos e aglomerantes ao concentrado.

### 2.1.3 Planta de Pelotamento

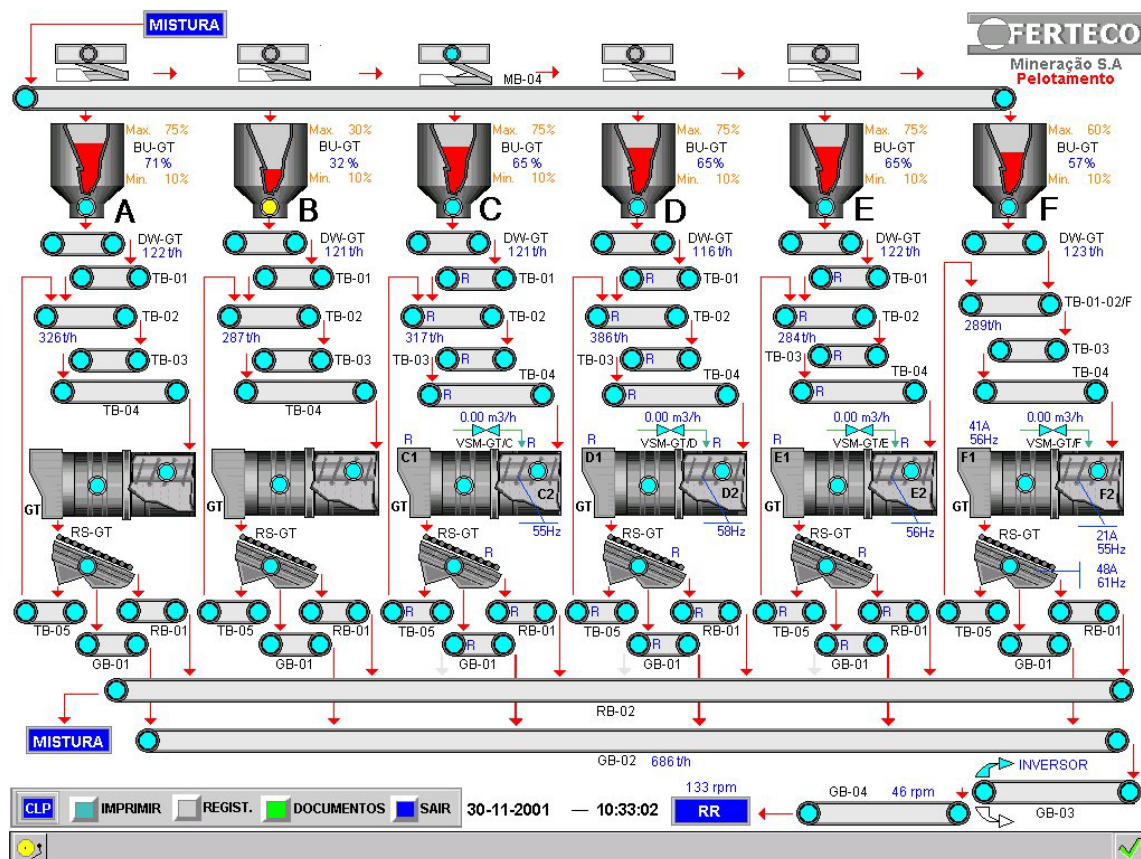


Figura 2.3 - Planta de pelotamento



A figura 2.3 mostra de forma esquemática a planta de pelotamento, da CVRD MINERAÇÃO S.A., antiga Ferteco, com as seis linhas existentes de tambores de formação de pelotas.

BU-GT	Silo de concentrado
DW-GT	Balança dosadora
TB-01	Transportador de correia
TB-02	Transportador com balança
TB-03	Transportador de correia
TB-04	Transportador de correia
GT	Tambor
RS-GT	Peneira de rolos
TB-05	Transportador de finos
RB-01	Transportador de aglomerados
GB-01	Transportador de produtos
GB-02	Transportador de correia
RB-02	Transportador de correia
Mistura	Área de mistura de concentrado

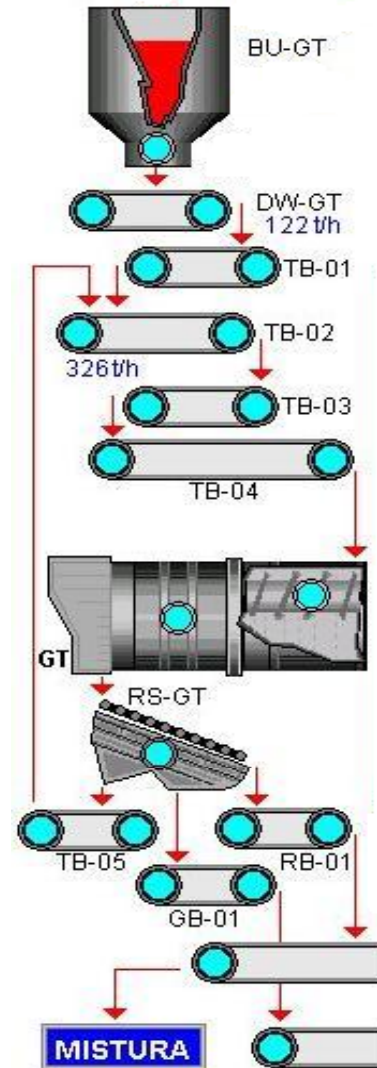


Figura 2.4 – Linha de pelotamento

Em uma linha de pelotamento, figura 2.4, o material pronto para a formação de pelotas é armazenado no silo BU-GT.

As pelotas formadas no tambor passam pela peneira RS-GT, com o objetivo de seleção, e aquelas que são menores que 9,3 mm, caem no

transportador TB-05, as pelotas na faixa granulométrica de 9,3 a 16,0 mm caem no transportador GB-01 e os aglomerados maiores que 16,0 mm caem no transportador RB-01.

Todo o material do transportador GB-01 é levado para a etapa final de peneiramento e endurecimento no forno.

O material do transportador RB-01, maior que 16,0 mm, é esmagado e retorna para os misturadores. O gráfico da figura 2.5 mostra que esta quantidade é menor que 10 t/h, para cada uma das seis linhas, e não fará parte de nosso estudo.

As pelotas menores que 9,3 mm retornam para o transportador TB-02 onde se juntam com o material novo, extraído do silo pela balança dosadora, DW-GT, e formam a alimentação do tambor.

O controle da alimentação do tambor, GT, é de até 550 t/h e é formado pela soma das pelotas menores que 9,3 mm, provenientes do retorno, através do transportador TB-05, e pelo material novo, dosado pela balança DW-GT.

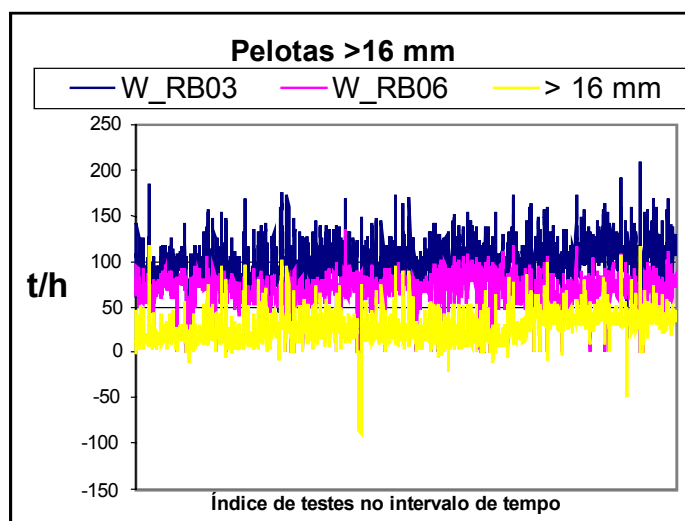


Figura 2.5 – Dados de processo mostrando quantidade de material maior que 16,0 mm e finos

A figura 2.5 mostra o gráfico com os dados do resultado do processo onde a balança integradora BW-RB-06 pesa todos os finos, provenientes de quebras e atritos no transportador que alimenta a entrada do forno de queima. Estes finos são adicionados às pelotas maiores que 16,0 mm provenientes dos transportadores RB-01 de cada linha de pelotamento e são pesados pela balança integradora BW-RB-03. Este material retorna aos misturadores.

#### **2.1.4 Planta de Endurecimento das Pelotas**

De maneira geral, as pelotas devem possuir uma resistência mecânica que permita o seu transporte e os esforços que ocorrem durante os processos metalúrgicos. O aumento da resistência mecânica pode ser obtido por tratamento térmico em uma atmosfera controlada. O endurecimento das pelotas em escala industrial é feito em dois estágios: secagem das pelotas, seguida de aquecimento e queima, a uma temperatura de 1250 °C. Nesta temperatura, ocorre a fusão de alguns componentes, tais como sílica, alumina e calcário, cal, dolomita, formando uma escória vitrificada entre as partículas de minério de ferro e, por consequência, aumentando a resistência à compressão das pelotas.

Na CVRD Mineração S.A., antiga Ferteco, utiliza-se o forno de grelha móvel, que pode ser visto de forma esquemática na figura 2.6. As pelotas alimentam uma grelha móvel que percorre as diversas zonas que compõem o forno. Gases quentes impulsionados por ventiladores atravessam a camada de pelotas, em um perfil crescente de temperatura, secando, aquecendo e queimando as pelotas em uma temperatura de 1300 °C. Finalmente, na última etapa do processo, as pelotas são novamente resfriadas por ar ambiente forçado que está, em contrapartida, sendo pré-aquecido para a combustão nos queimadores. Ao final deste processo, as pelotas queimadas devem ter resistência à força de compressão da ordem de 300 kgf (Borim, 2000).

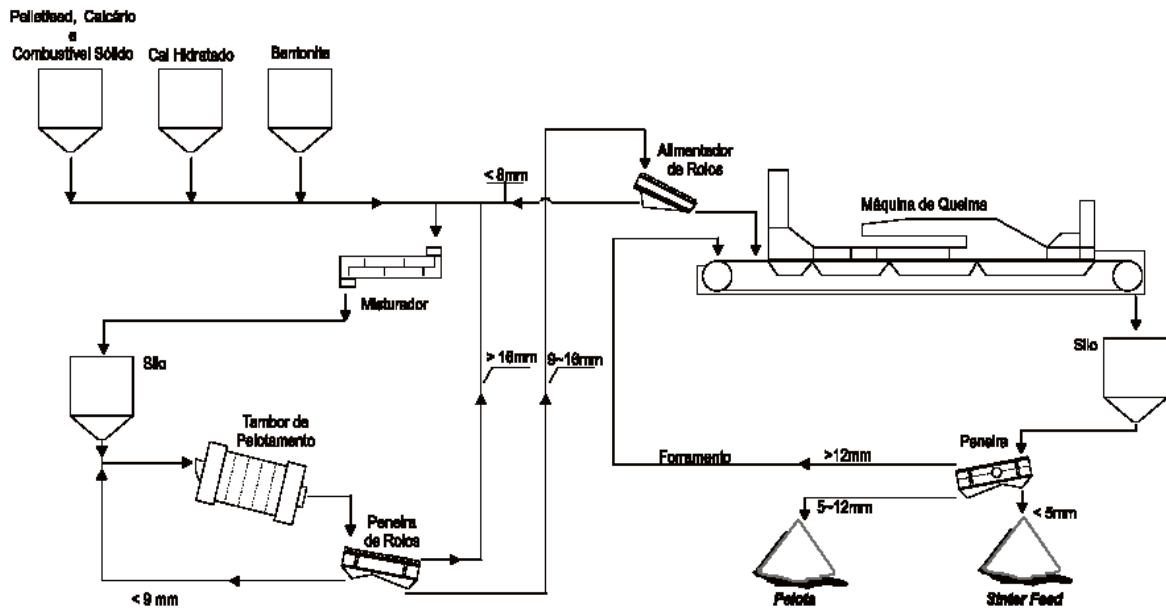


Figura 2.6 – Visualização do forno de endurecimento de pelotas

## 2.2 Mecanismo da Formação de Pelotas

O material para pelotamento consiste, na maioria dos casos, de material úmido proveniente da planta de filtragem.

Quando partículas secas de minério têm contato com a água, as mesmas ficam cobertas com uma fina película de água, figura 2.7 e quando duas partículas se tocam, devido às tensões superficiais do líquido, ligações são formadas como ilustrado na figura 2.8.

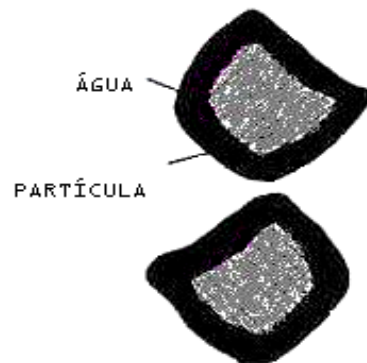


Figura 2.7 - Partículas secas de minério em contato com a água



Figura 2.8 - Ligações formadas devido às tensões superficiais do líquido

Como resultado do movimento rotativo dos tambores e da combinação de várias partículas, as primeiras aglomerações são formadas, figura 2.9, com a combinação de ligações de água e intervalos de ar.

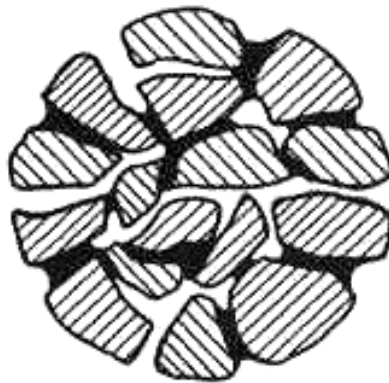


Figura 2.9 - Aglomerações iniciadas

Com a adição de água no processo, mais e mais água se junta à aglomeração, reduzindo os espaços de ar no interior da mesma e tornando-a mais densa, figura 2.10 e 2.11. Neste estágio as forças capilares estão essencialmente ativas. O efeito das forças capilares é claramente apresentado por Ilmoni e Tigerschiöld (Ilmoni e Tigerschiöld, 1973).



Figura 2.10 - Aglomeração não formada

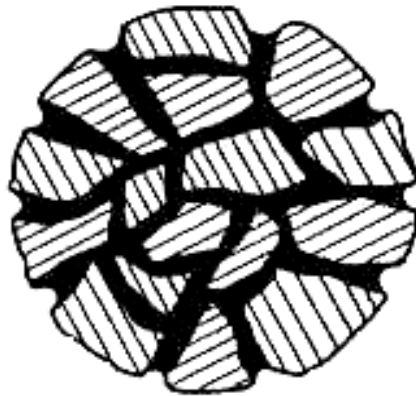


Figura 2.11 - Aglomeração mais densa

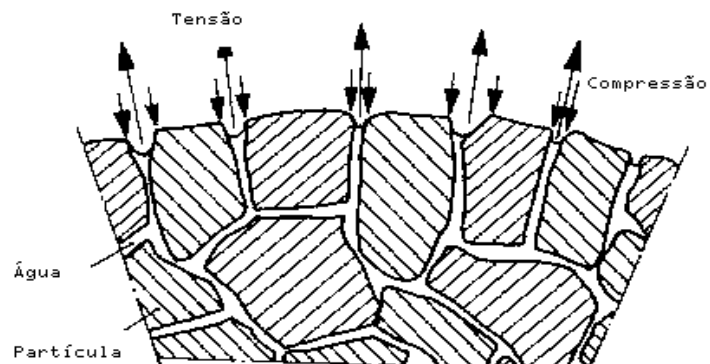


Figura 2.12 – Forças atuantes na formação da pelota

Nas superfícies líquidas e côncavas formam-se nos poros exteriores e forças capilares de sucção mantêm as partículas juntas como mostrado na figura 2.12, acima.

O estágio final é atingido quando todas as partículas do aglomerado estão totalmente cobertas de água, figura 2.13.



Figura 2.13 – Estágio final da formação da pelota

Além destes efeitos, o movimento de rolagem das partículas e o movimento de agregação de uma em relação a outras é importante. Com mais detalhes Sastry e Fuerstenau explicam o método de formação das pelotas (Sastry e Fuerstenau, 1973).

### **2.3 Fatores que Influenciam a Formação de Pelotas**

A menor granulometria do minério e as propriedades da superfície além da quantidade de água são os principais fatores da formação de pelotas. Para muitos tipos de minérios, a adição de aglomerantes é necessária para assegurar a formação.

Nestes casos, três fatores são importantes:

- propriedades granulométricas;



- conteúdo da mistura;
- eficiência dos aglomerantes.

### **2.3.1 Propriedades Granulométricas dos Minérios**

As propriedades granulométricas das partículas de minério como forma, tamanho, área superficial, rugosidade, porosidade e capacidade de absorção de água são importantes para a formação das pelotas.

Um outro fator importante é a superfície específica de área das partículas, que dá informações sobre a porção de finos na faixa menor que 5  $\mu\text{m}$  e também sobre a rugosidade e porosidade da superfície das partículas. A superfície específica é definida pela razão da superfície pelo peso ou volume em  $\text{cm}^2/\text{g}$  ou  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$  (Meyer, 1980).

Alguns minérios extraídos são tão finos que não necessitam de nenhum beneficiamento, outros necessitam de serem moídos, pois devido ao resultado de inúmeros testes e de dados de plantas industriais, é sabido que a alta quantidade de partículas finas é fator decisivo para alcançar ótimo efeito das forças capilares de adesão (Meyer, 1980).

### **2.3.2 Influência da Adição de Água na Formação de Pelotas**

Durante a formação da pelota, o efeito da adição de água é muito importante, pois a influência da granulometria somente é efetiva com a devida quantidade de água contida na mistura, porém uma mistura ótima não é claramente definida.

A quantidade de água adicionada afeta duas das propriedades da pelota além de compressão, que é maior quanto menor for a quantidade de água

adicionada, e a resistência a quedas, que é maior quanto maior for a quantidade de água adicionada.

### **2.3.3 Influência de Aditivos na Formação de Pelotas**

Os aditivos são utilizados para aprimorar a formação das pelotas e, também melhorar a qualidade das pelotas queimadas ou endurecidas. A quantidade de aditivos é limitada a este propósito e é independente da estrutura química do minério beneficiado.

Um dos aditivos mais utilizados, a bentonita, envolve as partículas de minério e quando combina com a água forma um gel com alta capacidade de união. Assim, a influência das propriedades granulométricas dos minérios, em combinação com água, na formação das pelotas é quase sempre insuficiente desde que poucos minérios podem formar pelotas sem a adição de aditivos aglomerantes.

A mistura de aditivos melhora as seguintes propriedades na formação das pelotas:

- melhora a formação das pelotas devido à força de coesão;
- causa aumento da resistência a quedas;
- melhora das qualidades de redução da pelota queimada ou endurecida.

## **2.4 EQUIPAMENTO DE FORMAÇÃO DE PELOTAS**

A preparação do minério, a formação da pelota e o endurecimento da mesma são fatores decisivos para a produção com as características requeridas para o manuseio e a redução no alto forno. Com o objetivo de se obter pelotas de tamanho uniforme e de qualidade, o equipamento utilizado no pelotamento

deve ser flexível o suficiente para compensar as variações das propriedades relacionadas com o minério bruto.

#### **2.4.1 Tambor de Formação de Pelotas**

Nestes equipamentos, figura 2.14, todas as condições para a obtenção de uma pelota de qualidade devem ser atingidas, ou seja, todos os movimentos e todas as forças de compressão devem interagir de forma harmoniosa. Para tanto, o equipamento deve possibilitar uma boa condição de mistura, permitindo uma distribuição uniforme de aditivos, minério e água. Os movimentos devem ser contínuos e uniformes, permitindo que toda a massa de minério seja movimentada e conseqüentemente promovendo o movimento de todas as partículas, possibilitando o maior número de contatos possíveis de forma a criar grande número de ligações capilares. O movimento deve produzir, também, uma pequena pressão de forma a reduzir as cavidades entre partículas e, por fim, devem produzir movimentos de forma que os aglomerados rolem livremente, permitindo assim que os mesmos formem bolas.

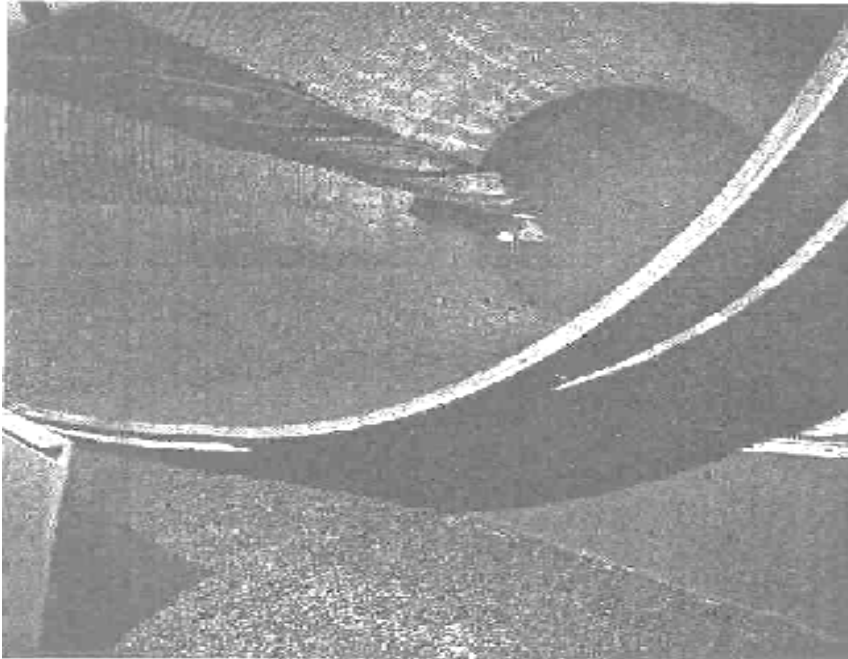


Figura 2.14 – Foto de um tambor de formação de pelotas

#### **2.4.1.1 Componentes do Tambor de Formação de Pelotas**

O tambor, figura 1.15, consiste de um cilindro de movimento rotativo, ligeiramente inclinado e aberto em ambas extremidades. Dentro do tambor, existe um rolo raspador rotativo, de posição fixa, em paralelo ao tambor, cuja função é limitar a altura da camada interna de material.

De forma a promover uma operação correta, as seguintes funções do tambor devem ser variáveis:

- Ângulo de inclinação do eixo horizontal (fixo neste estudo);
- Número de voltas por unidade de tempo.

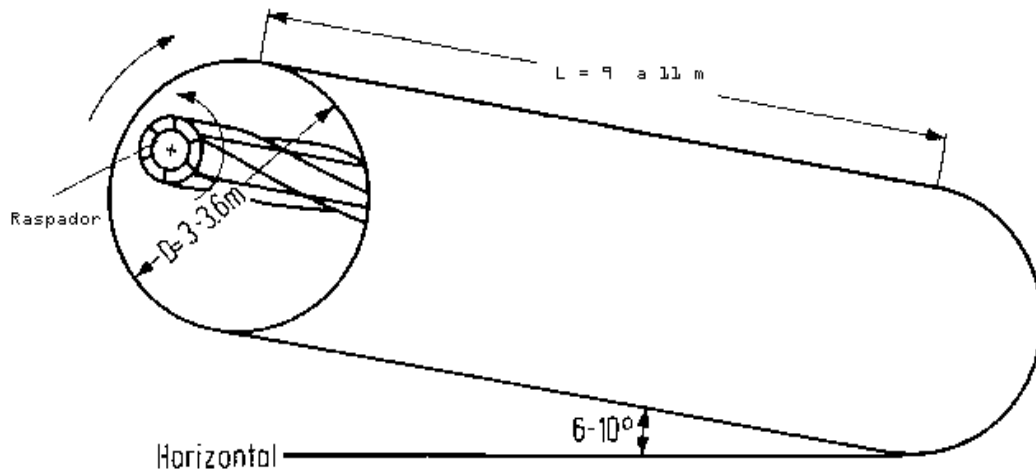


Figura 2.15 – Dados de um tambor de formação de pelotas

O minério preparado é descarregado na parte superior do tambor e água é borrifada no interior do mesmo, de forma a possibilitar melhor formação das pelotas. O minério rola em espirais em direção à saída. De acordo com o comprimento, a inclinação, a velocidade angular e do grau de alimentação, pelotas de determinado tamanho são produzidas. As pelotas descarregadas pelo tambor são peneiradas e aquelas de dimensões desejadas são separadas. As parcelas de pelotas, acima do limite desejado e abaixo do mesmo, são misturadas ao minério de alimentação do tambor. Assim, sempre existirá material residente no sistema de recirculação, ou seja, pelotas não formadas, e a quantidade deste material têm a proporção percentual que varia de 100% a 400% da quantidade de material novo que alimenta o tambor (Meyer, 1980).

## **2.5 CARACTERIZAÇÃO DO TAMBOR DE FORMAÇÃO DE PELOTAS E DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE CONTROLE**

### **2.5.1 Considerações Sobre Modelos Matemáticos**

Um modelo é uma representação abstrata ou concreta, gráfica ou matemática de observações feitas na aplicação real de acordo com um certo padrão.

Os modelos matemáticos descrevem relações entre variáveis em termos de equações e são ferramentas poderosas no projeto, análise e otimização de sistemas de controle de processos industriais. Na realidade, eles formam a base da engenharia (Aguirre, 2000).

Dois pontos devem ser considerados no modelo matemático de um sistema. O primeiro é que o modelo desenvolvido é apenas uma representação aproximada, deste modo não há um modelo único, geral, do sistema, mas um conjunto de modelos. O segundo é que o modelo é uma aproximação de algumas características do sistema. Assim, ao final da definição do modelo, se o teste for considerado inadequado, deve-se avaliar a pertinência das considerações feitas.

No modelo, duas considerações são comumente feitas, a primeira é que o sistema comporta-se de forma linear e isto é normalmente verificado em uma faixa estreita de operação. A segunda é a consideração de invariância no tempo, ou seja, os parâmetros não variam no tempo. Entretanto o que ocorre na realidade é que os parâmetros do sistema variam com o tempo de acordo com a dinâmica do sistema, mas a dinâmica não altera significativamente no período de tempo em que é feita a modelagem.

Na otimização de parâmetros do modelo há dois métodos que podem ser utilizados, o método determinístico, que não dá nenhum tratamento especial ao ruído presente nos dados, ou seja, considera a relação sinal/ruído muito

alta e o método estocástico que utiliza recursos estatísticos para levar em consideração o ruído e assim reduzir seus efeitos sobre o modelo.

Os modelos matemáticos de sistemas reais podem ser obtidos com base nos princípios da física do processo, denominado de modelagem caixa branca, que demanda tempo e conhecimento dos fenômenos envolvidos, ou em dados de entrada e saída obtidos diretamente do processo, denominado modelagem caixa preta ou empírica (Aguirre, 2001).

A complexidade do processo de formação de pelotas e a faixa de resultados considerados dentro do padrão tornam praticamente impossível a obtenção de modelos do tipo com base nos princípios da física do processo. Por isto optou-se pelo trabalho de obtenção do modelo através de testes na planta industrial, com dados obtidos diretamente do processo.

## **2.6 ESTRATÉGIA DE CONTROLE**

O objetivo de um sistema de controle de um processo industrial é proporcionar:

- qualidade adequada ao produto, com baixa dispersão;
- maximizar produtividade do equipamento.

Estes dois itens definem que o tambor de formação de pelotas deve possuir pelo menos dois tipos de controles, um para atender a qualidade do produto, ou seja, a granulometria da pelota formada dentro da faixa requerida e de forma uniforme, e outro para atender a melhor produtividade, ou seja, otimizar a operacionabilidade do equipamento.

### **2.6.1 Variáveis não Controladas do Processo de Formação de Pelotas**

As variáveis não controladas do processo de formação de pelotas constituem-se de tudo que compõe o equipamento, mas são imutáveis após os ajustes preliminares de instalação. Estas variáveis são o próprio tambor de formação de pelotas e a peneira de seleção de produtos.

### **2.6.2 Características Físicas do Tambor de Pelotamento**

O tambor de pelotamento possui características físicas, ângulo da inclinação,  $\alpha$ , diâmetro,  $\phi$  e comprimento,  $l$ , que influenciam o processo de formação de pelotas. Entretanto são características fixas e estão relacionadas principalmente com o tempo de retenção do material dentro do tambor. Este tempo tem relação direta com o tamanho das pelotas e quantidade de material do recirculado. Outros fatores que afetam a formação de pelotas e conseqüentemente a quantidade de material recirculado, ou seja, material retido no circuito do tambor, são as características físicas e químicas do minério e a peneira de seleção das pelotas formadas.

Empiricamente a relação entre comprimento e diâmetro do tambor varia de 2 ½ a 3 e quanto maior o comprimento do tambor, maior será a quantidade de pelotas formadas para uma dada quantidade de material alimentado e menor será a quantidade do material recirculado, ou seja, o concentrado novo e o material das faixas de 6,3 mm a 9,5 mm e menor que 6,3 mm.



### **2.6.3 A Peneira de Classificação de Pelotas**

A peneira de classificação das pelotas formadas define a faixa de produtos prontos, pelotas prontas, as que ainda estão fora das especificações do tamanho desejado e os aglomerados maiores que 16 mm. No presente estudo não abrangeremos os detalhes das variações na peneira, considerando-a de abertura fixa e com desgaste irrelevante nos períodos de testes.

### **2.6.4 Variáveis Manipuladas do Processo de Formação de Pelotas**

No tambor de formação de pelotas as variáveis controladas do processo, ou seja, variáveis que podem ser manipuladas de forma a melhorar a qualidade e a produtividade são:

- água inserida;
- rotação do tambor;
- quantidade de minério da alimentação.

Outros parâmetros tais como as características do minério que está sendo processado, as características físico/químicas, a '*superfície específica*', a granulometria, as características químicas e umidade afetam o processo, mas não estão no objetivo de controle desta dissertação. Obviamente durante os testes serão vistos os efeitos que causam no processo e serão considerados dentro do sistema de controle proposto.

### **2.6.5 Controle Atual do Tambor de Formação de Pelotas**

O diagrama operacional do tambor de formação de pelotas é entendido através do diagrama da figura 2.16.

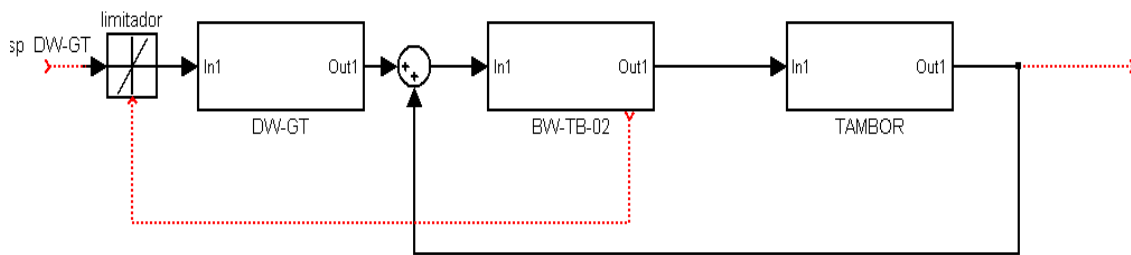


Figura 2.16 – Diagrama do sistema alimentação do tambor de formação de pelotas

Atualmente não há um controle completo do sistema de alimentação do tambor de formação de pelotas. A descrição do que existe é apresentada a seguir.

No diagrama acima, a balança BW-TB-02, ou simplesmente BW-TB, mede a alimentação total do tambor de formação de pelotas, que é composta do minério que passa pela balança dosadora DW-GT, alimentação nova, e do recirculado, ou seja, minério que já passou pelo tambor e não atingiu tamanho suficiente para ser classificado como pelota. Esta balança, BW-TB-02, tem um limite de carga máxima em 550 toneladas por hora e quando a soma de DW-GT e do recirculado ultrapassa este limite, a referência da dosadora DW-GT é reduzida automaticamente. Quando a soma das quantidades citadas fica abaixo do limite, a referência da dosadora DW-GT é livre para controle do operador. O objetivo desta estratégia de controle é proteger o equipamento contra sobrecargas.

Como conclusão, o controle atual limita a produtividade do equipamento, mas fornece o dado de que a oscilação gerada por este processo, no limite de 550 t/h, tem a duração do tempo de resposta de um ciclo da resposta do tambor de formação de pelotas a um estímulo da variação da alimentação.

**No controle da granulometria, atualmente existem apenas testes de laboratórios para confirmação e caracterização do processo. Todo controle das pelotas formadas é feito pelo operador de área com ação apenas na injeção de água e na variação da alimentação do tambor de formação de pelotas. Esta atuação possui um objetivo que é melhorar a formação de pelotas e permitir apenas uma ação que é reduzir a produtividade para controlar a granulometria.**

## **2.7 CARACTERIZAÇÃO DA FORMAÇÃO DE PELOTAS**

### **2.7.1 Efeito da Injeção de Água no Tamanho da Pelota Formada**

#### **2.7.1.1 Metodologia**

Para caracterização do efeito da injeção de água no tamanho da pelota formada, vários testes foram feitos, obedecendo o seguinte procedimento:

- mantida a alimentação do tambor constante e estável;
- medida a umidade do concentrado antes na dosadora DW-GT, ou seja, antes do material entrar no tambor;
- feita a injeção de água de forma controlada, com valores de 0,2 m<sup>3</sup>/h, 0,4 m<sup>3</sup>/h, 0,6 m<sup>3</sup>/h e 0,8 m<sup>3</sup>/h;
- observado o tempo de estabilização do processo;
- medida a umidade da pelota formada para caracterizar a variação da umidade adquirida;
- medida quantidade de pelotas formadas nas faixas normais do processo, para cada condição de injeção de água.

### 2.7.1.2 Resultados de Testes no Processo de Formação de Pelotas

A quantidade de pelotas formadas, obtida com as medições do item seis do procedimento, mostra que o percentual de pelotas formadas na faixa de 9,5 mm a 12,5 mm aumenta com o aumento da umidade adquirida pelo material processado. O gráfico da figura 2.17 mostra este resultado, em três testes, I, II e III, feitos.

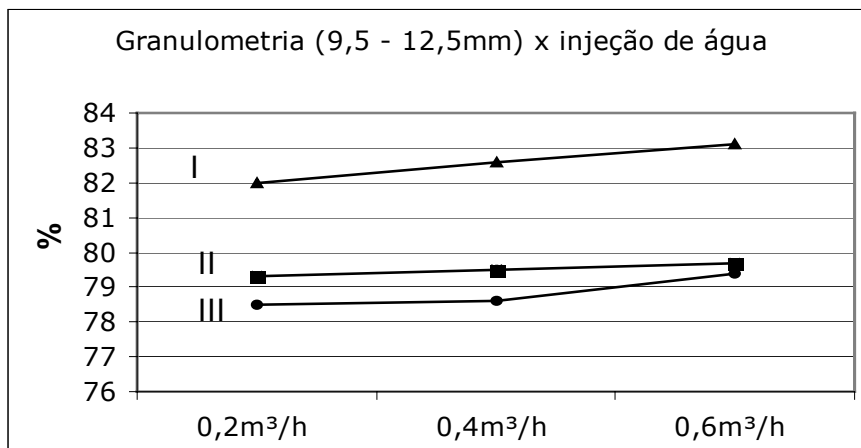


Figura 2.17 – Efeito da injeção de água na granulometria da pelota

### 2.7.2 Efeito da Variação da Rotação do Tambor no Processo de Formação de Pelotas

Uma velocidade de rotação angular específica do tambor é necessária para a formação da pelota, figura 2.18, pois uma velocidade muito lenta, figura 2.19, ou muito rápida, figura 2.20, deve ser evitada. Se o tambor movimentar-se lentamente, o minério não rola sobre si mesmo, mas simplesmente escorrega, não formando pelotas.

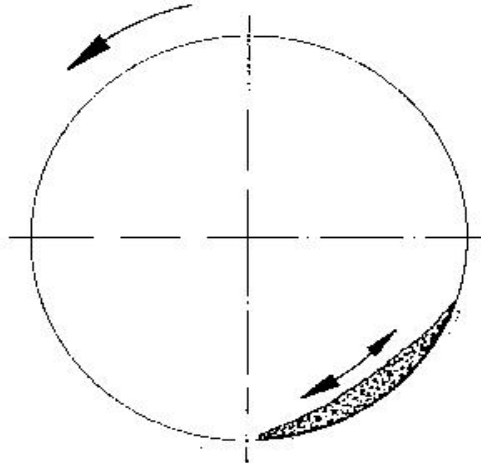


Figura 2.18 – Efeito da baixa rotação no tambor de formação de pelotas.

Se o tambor movimentado de forma muito rápida, a força centrífuga gerada eleva a massa de minério até o ângulo limite permitido pela gravidade e neste ponto ocorrerá a queda da massa, não permitindo a formação de pelotas.

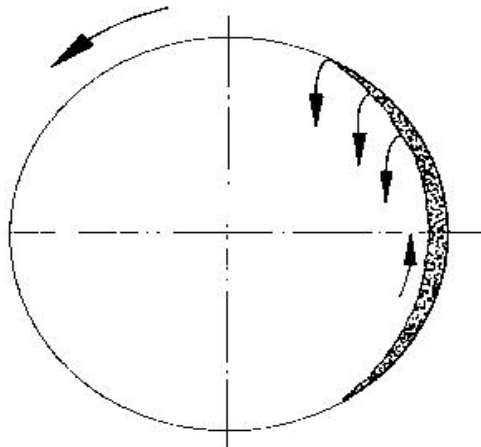


Figura 2.19 - Efeito da alta rotação no tambor de formação de pelotas

Quando o tambor movimentado a uma velocidade tal que a força centrífuga é superada pela força de fricção, o material é elevado até certo ângulo e então rola sobre si mesmo, formando as pelotas por aglomeração.

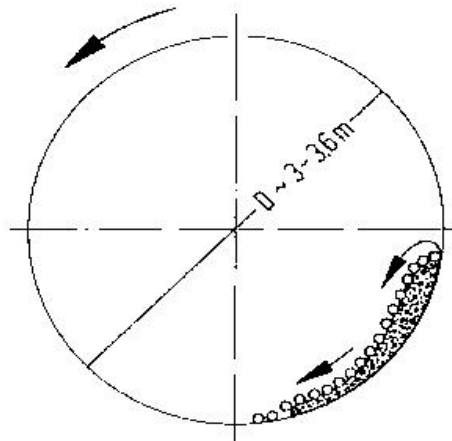


Figura 2.20 - Efeito da adequada rotação no tambor de formação de pelotas

A pelota, antes de ser completamente formada, é necessário que role por uma certa distância dentro do tambor, o que é definido pelo ângulo da inclinação do mesmo.

### 2.7.2.1 Metodologia

A caracterização do efeito da variação da rotação do tambor no processo de formação de pelotas teve como objetivo mostrar os resultados que se obtém tanto na distribuição granulométrica da pelota formada como na produtividade do tambor, ou seja, na redução do material recirculado. Para tal, vários testes foram feitos, obedecendo ao seguinte procedimento:

- a alimentação do tambor já mantida estável e constante;

- obtido, via histórico do processo, a quantidade de material recirculado;
- feita a variação da rotação do tambor de formação de pelotas, com referência de 9 rpm, 10 rpm, 11 rpm e 12 rpm;
- o tempo de estabilização do processo para cada *referência* adotado foi observado;
- análise da quantidade de pelotas formadas nas faixas do processo foi medida.

### **2.7.2.2 Resultados de Testes com a Rotação do Tambor**

Quando o tambor de formação de pelotas gira com maior velocidade, o tempo de retenção da massa circulante é menor, se comparado com o tempo de retenção quando o tambor é acionado com menor velocidade de giro. Assim as pelotas formadas passam pela peneira de classificação em intervalo de tempo menor, não possuindo tempo de aumentar de tamanho com a agregação de maior quantidade de material. Se estiverem na faixa de tamanho de 9,5 a 12,5 mm de diâmetro, serão classificadas como produtos. Como não há tempo de maior agregação, as pelotas formadas possuem tamanho dentro da faixa, mas com tamanho menor, ou seja, diâmetro mais próximo a 9,5 mm que 12,5 mm.

Os três gráficos, I, II e III na figura 2.21 mostram o gradativo aumento do percentual de pelotas formadas na faixa de 9,5 a 12,2 mm de diâmetro, com o aumento da rotação do tambor de 9 rpm a 12 rpm.

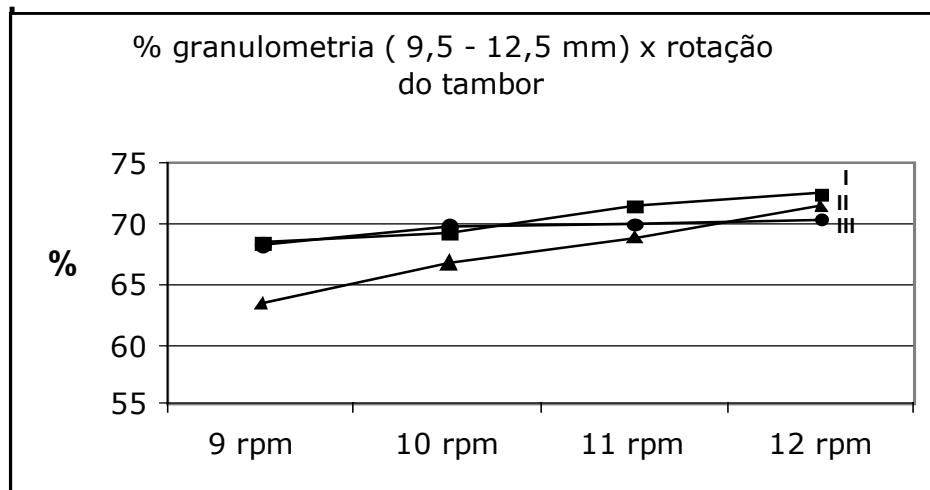


Figura 2.21 – Aumento do percentual de pelotas formadas, na faixa de 9,5 a 12,5 mm, em relação ao aumento da rotação de tambor de formação de pelotas.

### 2.7.3 Conclusão sobre os testes

Com o aumento da água inserida, a variação do percentual de pelotas formadas, na faixa de 9,5 mm a 12,5 mm, foi de aumento, com valor de aproximadamente 1 %, conforme mostrado no gráfico acima. Esta variação, entretanto, é bem menor que o efeito causado pela variação da rotação do tambor, conforme será visto a seguir e não será considerada como prioritária no processo de melhoria de granulometria. Este parâmetro de controle de injeção de água deve ser utilizado para melhorar a produtividade do equipamento.

A quantidade de pelotas formadas, obtida com as medições do quinto item do procedimento, mostrou que o percentual na faixa de 9,5 mm a 12,5



mm aumenta entre 5 e 7 %, com o aumento da rotação aplicada ao tambor de formação de pelotas. O gráfico acima mostra este resultado.

Este efeito é bem maior que aquele causado pela variação da injeção de água no tambor, conforme foi visto anteriormente e será considerado como prioritário no processo de melhoria de granulometria.

#### 2.7.4 Efeito da Variação da Rotação do Tambor na Produtividade na Formação de Pelotas

O aumento da rotação do tambor de formação de pelotas tem efeito direto na distribuição do tamanho das pelotas, mas não causa melhoria na produtividade do equipamento, conforme descrito a seguir. O gráfico da figura 2.22 mostra a variação da rotação de 12 rpm para 9 rpm, e retorno a 12 rpm, com alimentação nova constante de 200 t/h. Nota-se que a variação da quantidade do recirculado, mostrando que não há redução, a não ser o próprio aumento da produtividade em função da produção de pelotas menores.

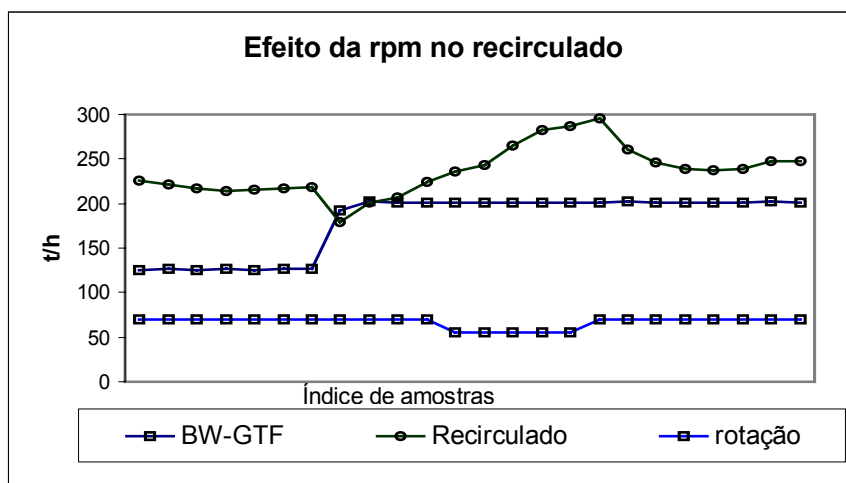


Figura 2.22- Efeito da rotação na quantidade do recirculado

### **2.7.5 Caracterização do Tempo de Resposta da Granulometria**

Em plantas industriais é bastante difícil se obter uma condição ideal de estabilidade das variáveis de controle. Vários testes foram necessários para caracterizar a resposta ao estímulo aplicado à rotação do tambor de formação de pelotas.

Um aspecto importante na obtenção da curva de resposta do sistema em análise é o emprego de técnica adequada para a aquisição dos dados de processo. O intervalo de amostragem deve ser criteriosamente definido. Para a análise em questão partiu-se dos dados da curva de resposta ao degrau na alimentação do tambor.

Pode-se dizer que, sob certas condições de amostragem, um sinal contínuo no tempo pode ser completamente reconstituído a partir de seus valores amostrados com intervalos fixos de tempo. A frequência de amostragem, conforme a teoria de Nyquist (Oppenheim, 1997), deve ser maior que duas vezes a maior frequência contida no sinal amostrado. Outro aspecto importante relativo à frequência de amostragem é a possibilidade de ocorrência do fenômeno de *aliasing* (Lee, 1997), onde se o intervalo de aquisição de dados não atender ao especificado pelo teorema da amostragem, o espectro de frequências do sinal recuperado não será igual ao do sinal original.

Ao inversor que aciona o tambor de formação de pelotas foi aplicado um degrau de 4 rpm, fazendo com que o mesmo saísse de 9 rpm e passasse a operar com 12 rpm.

A partir do instante em que foi aplicado o degrau, e em intervalos de 42 segundos, amostras das pelotas formadas foram obtidas no transportador GB-01, e levadas para serem analisadas, por meio de peneiras, do laboratório de análise granulométrica.

Os dados foram levantados e o gráfico da figura 2.23 mostra a curva de resposta da formação de pelotas, percentual na faixa de 9,5 a 12,5 mm de diâmetro, com constante de tempo,  $\tau$ , de 75 segundos.

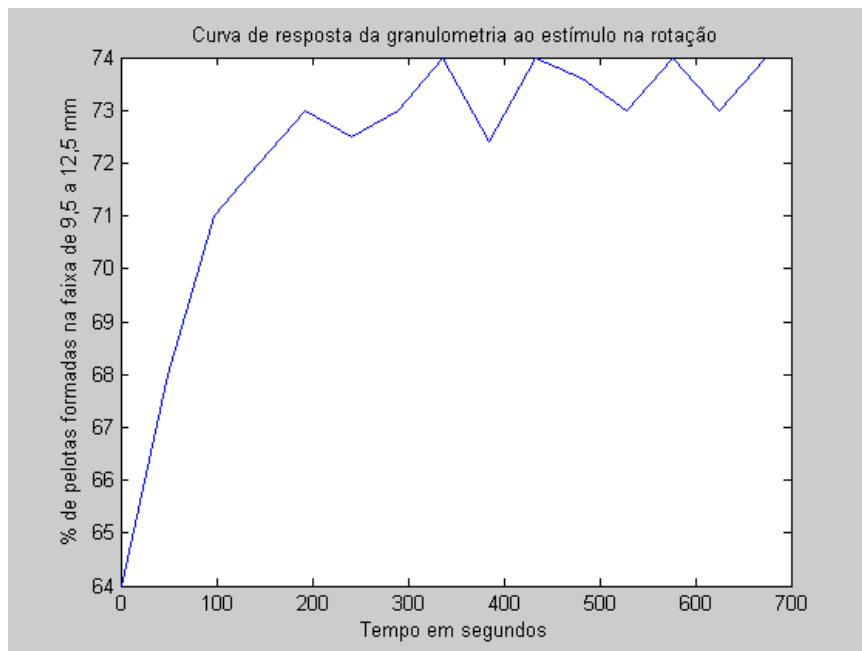


Figura 2.23 – Curva de resposta do tambor

A função de transferência é uma expressão algébrica no domínio de Laplace (Ogata, 1997), da relação dinâmica existente entre a entrada e a saída de um processo. Se a função de transferência é escrita de uma forma padrão, então as propriedades dinâmicas do processo a que se refere podem ser facilmente identificadas.

Um modelo empírico é representado por uma função de transferência simples, com ou sem tempo morto, e com poucos parâmetros para serem determinados a partir de dados experimentais.

No presente estudo, optou-se pela representação do modelo matemático da granulometria do tambor de formação de pelotas, por função de transferência de primeira ordem. Trata-se de uma aproximação razoavelmente precisa para fins de controle. As equações abaixo são formas padronizadas de representação de processos de primeira ordem.

A equação de transferência do sistema primeira ordem é:

$$G(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (5.1)$$

Sendo que K é o ganho estático, e  $\tau$  a constante de tempo. E a transformada de Laplace para este sistema, com um sinal de entrada de um degrau unitário é:

$$Y(s) = \frac{1}{s} \frac{k}{\tau s + 1} \quad (5.2)$$

No domínio do tempo:

$$y(t) = k(1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.3)$$

O valor de  $\tau$  é obtido do registro da resposta ao degrau onde  $\tau$  é o tempo para  $y(t)$  sair do valor inicial e atingir 63,2% da variação total devida ao degrau aplicado.

$$\tau = 0,623[y(\infty) - y(0)] + y(0) \quad (5.4)$$

### 2.7.6 Validação do Modelo Matemático

Uma das técnicas mais usuais de validação de modelos matemáticos consiste na comparação da resposta transitória do modelo em relação à obtida na planta industrial, para uma mesma excitação de entrada, no caso, um degrau.

Para a simulação da resposta ao degrau do modelo matemático, foi utilizada a função degrau do programa MATLAB (Cavallo,1996). Esta função faz a simulação de sistemas lineares invariantes no tempo, apresentando a resposta do sistema em uma série temporal, para um degrau aplicado à entrada.

A título de ilustração, é apresentada abaixo a figura 2.24 com a comparação da resposta do modelo em relação ao sistema real.

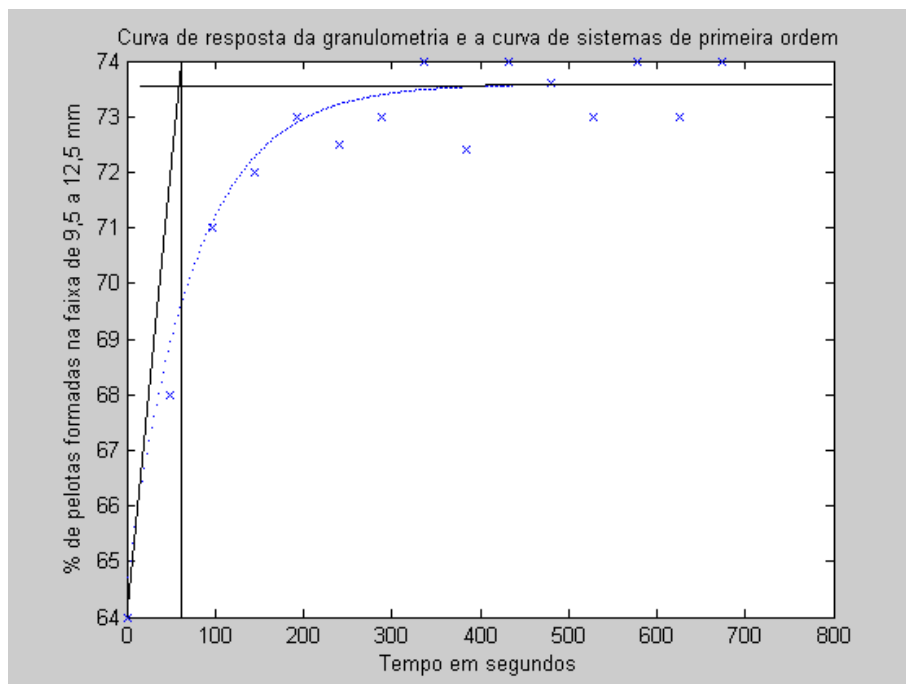


Figura 2.24 – Curva de resposta ao degrau da equação de simulação, com tempo de resposta,  $\tau$ , de 75 segundos

## **2.8 Conclusão sobre a validação do modelo matemático**

Neste capítulo foi visto que a resposta da granulometria do tambor de formação de pelotas tem uma função de transferência de primeira ordem e que a constante de tempo é de 72 segundos. Desta forma a amostragem da granulometria pode ser feita a cada 3 segundos, pois não será contrário à teoria de Niquist.

## CAPÍTULO 3

### 3.1 ESTRATÉGIA DO PROCESSAMENTO DE IMAGENS E CLASSIFICAÇÃO DE PELOTAS

Atualmente os tambores das seis linhas de pelotamento operam em malha aberta. A operação é baseada essencialmente na quantidade de material do recirculado. O acompanhamento da qualidade das pelotas é feito através de testes de granulometria das mesmas. Esses testes são realizados em laboratório, de duas em duas horas, por meio de amostras representativas, para o conjunto dos seis tambores de pelotamento. O teste classifica as pelotas em cinco grupos, indicando o percentual para cada um deles, conforme mostrado na tabela abaixo,

Tabela 3.1 – Grupos de classificação de pelotas

Diâmetro menor do que 6.3 mm (grupo 1)	finos agregados	
Diâmetro entre 6.3 e 9.4 mm (grupo 2)	sementes de pelotas	
Diâmetro entre 9.4 e 12.4 mm (grupo 3)	pelotas de produto	70%
Diâmetro entre 12.4 e 16 mm (grupo 4)	pelotas de forramento	24%
Diâmetro maior do que 16 mm (grupo 4)	aglomerações	

A situação ideal corresponde a ter 70% da produção dentro do grupo 3 e 24% dentro do grupo 4 e 6% nos grupos restantes. Essa distribuição garante um bom processo de queima das pelotas e o correto perfil granulométrico (Borim, 2000).

### **3.1.1 Objetivo da Estratégia de Análise de Imagens**

O objetivo é definir uma estratégia baseada em processamento digital de imagens para classificar as pelotas formadas. O resultado do processamento é utilizado na implementação do sistema de controle de cada tambor de formação de pelotas, agindo como referência de velocidade de rotação.

A estratégia definida considera como universo apenas as pelotas dos grupos 3 e 4, informando o percentual desse universo, representado por cada grupo, e, em conjunto, o tamanho médio, também para cada um dos grupos.

O sistema de controle desta tese, com objetivo primordial de manter a granulometria da pelota formada dentro das faixas de valores, atende a qualidade do processo de formação de pelotas, ou seja, os grupos 3 e 4, que correspondem a estas faixas. Os percentuais das outras faixas são monitorados pelo balanço de massa de todo o sistema do pelotamento, como a balança BW-RB06 que mede a quantidade de produto nas faixas menores que 9,5 mm ou finos agregados e BW-RB03 que mede a quantidade de produto na faixa acima de 16,0 mm.

Variações de processo, como grande quantidade de finos agregados, ou grande quantidade de aglomerados, informadas por balanças, deverão fazer parte de um estudo futuro.

### **3.1.2 Aquisição das Imagens**

Para o desenvolvimento do programa, a aquisição das imagens foi realizada por meio de uma câmera fotográfica digital, gerando arquivos de formato JPG de 24 bits (formato RGB) e resolução de 2272 x 1704 pixels. O procedimento de aquisição foi sempre realizado utilizando apenas o próprio *flash* da máquina, com o objetivo de obter variações no procedimento e



analisa-los. A figura 3.1 apresenta um exemplo de uma imagem de um leito de pelotas, obtida no transportador GB-01, transportador de pelotas formadas.



Figura 3.1 – Imagem do transportador de pelotas

### **3.1.3 Tratamento das Imagens**

A imagem para a classificação de pelotas utiliza níveis de cinza, com oito *bits* por pixel. Como a câmera utilizada gerou arquivos RGB, foi necessária uma conversão para Bitmap, em ambiente MATLAB (ref. 8), onde toda a estratégia de tratamento das imagens foi modelada. Esta conversão foi feita através de um comando disponível no pacote de processamento de imagens.

### **3.1.4 Filtragem Inicial**

A literatura deste estudo tem definidas as funções de processamento de imagens no domínio espacial da seguinte maneira:

$$\mathbf{G}(x,y) = \mathbf{T} [\mathbf{p}(x,y)] \quad (3.1)$$

Nesta notação,  $\mathbf{T}$  é um operador que atua sobre cada pixel  $\mathbf{p}$ , da imagem original, gerando uma imagem modificada  $\mathbf{G}$  (Gerald,1994).

Com o objetivo de diminuir efeitos de ruído, forçando pontos com intensidades distintas a assemelharem a seus vizinhos, foi feita utilização de um operador  $\mathbf{T}$  equivalente a um filtro por média. Esse operador consiste em substituir o nível de cinza de cada pixel pela média de seu próprio nível de cinza e dos níveis de cinza nas vizinhanças de quatro e diagonal ( $N_4(p)$  e  $N_D(p)$ ), respectivamente, ou seja, uma vizinhança de 8.

A figura 3.2 apresenta exemplo de resultado da aplicação do operador  $\mathbf{T}$  de média para um pixel.

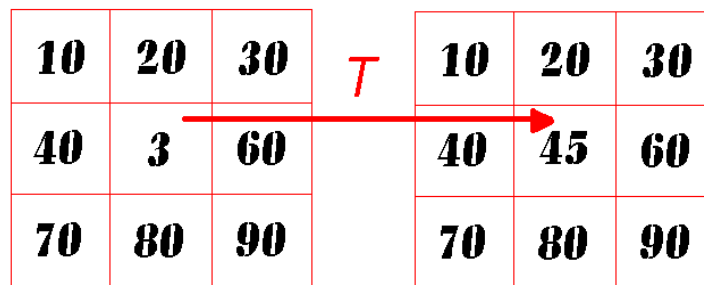


Figura 3.2 – Aplicação do operador  $\mathbf{T}$  de média em um pixel

O algoritmo definido para realização dessa operação permite que a filtragem seja realizada recursivamente, recebendo como parâmetro o número de filtragens sucessivas a serem realizadas.

As figuras 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam uma imagem em níveis de cinza, uma imagem filtrada com uma iteração e uma imagem filtrada com três iterações, respectivamente. Para uma melhor visualização do efeito da filtragem, as figuras serão apresentadas em zoom.

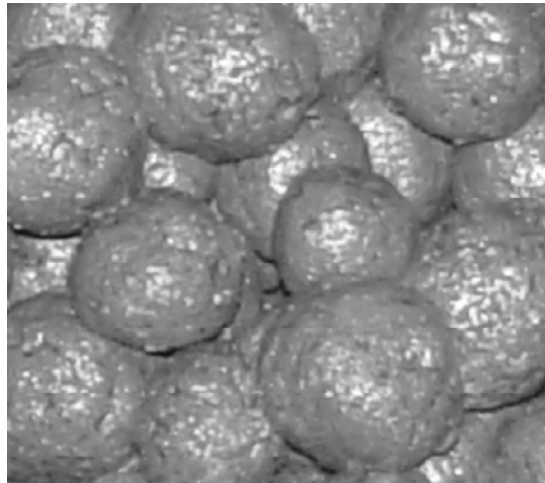


Figura 3.3 – Imagem em níveis de cinza

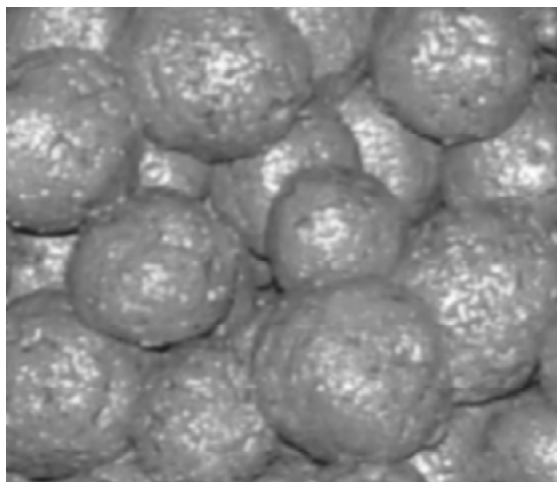


Figura 3.4 – Imagem em níveis de cinza após filtragem por média  
(1 iteração)

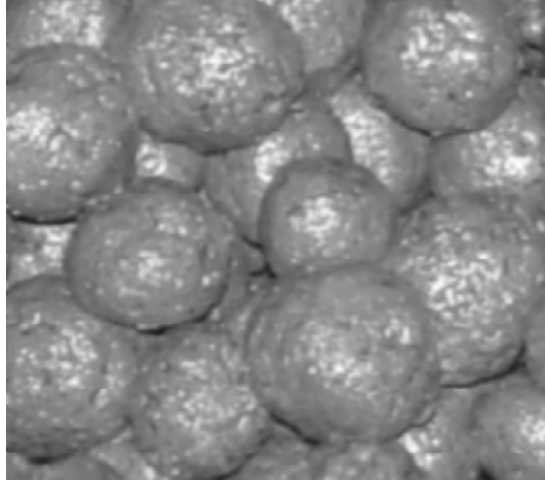


Figura 3.5 – Imagem em níveis de cinza após filtragem por média (3 iterações)

As pelotas são bastante úmidas, uma vez que há acréscimo de água em seu processo de formação, como visto no capítulo 1. Essa umidade faz com que haja uma reflexibilidade nas pelotas, originando pontos de brilho intenso na imagem que pode ser visualizado por meio da figura 3.3.

### **3.1.5 Obtenção das Imagens Binárias**

Para a obtenção das imagens binárias, visando reduzir o tempo de processamento das imagens, duas metodologias foram inicialmente propostas:

- detecção de bordas;
- binarização por limiar simples.

### 3.1.5.1 Detecção de Bordas

Inicialmente, foram experimentadas as rotinas de detecção de bordas disponíveis no pacote de processamento de imagens do MATLAB (Site ref. 8), utilizando os métodos de Sobel, de Prewitt, de Roberts, de Zero-Cross, de Canny e o método Laplaciano, todos sem filtragem por média, e com filtragem por média (2 iterações), mas nenhum resultado foi satisfatório, conforme mostra a figura 3.6, abaixo.

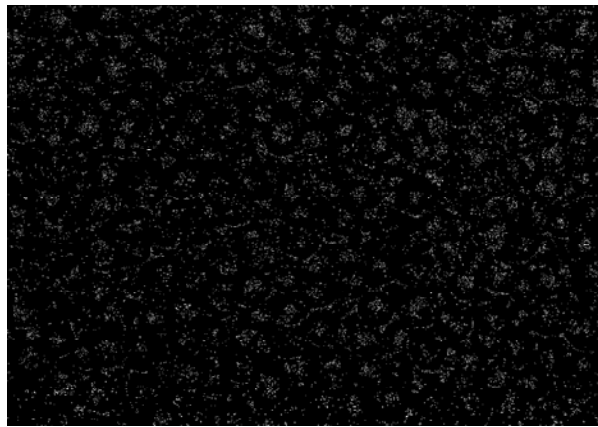


Figura 3.6 – Detecção de Bordas com o método de Prewitt

Diante disso foi adotada outra metodologia para detecção de bordas, considerando que as bordas das pelotas possuem níveis de cinza dentro de um intervalo bastante particular. Foi implementada uma rotina para detecção de bordas que se resume a um filtro passa-faixa (Davies, 1986), com limiar definido: os pixels que possuem nível de cinza pertencente à faixa assumida como representativa das bordas recebem o valor correspondente à cor branca, e os demais pixels recebem o valor correspondente à cor preta.

Desta maneira, a imagem resultante apresentou as bordas das pelotas em cor branca, dentro de um fundo preto, ou seja, uma imagem binária. As figuras abaixo apresentam os resultados da aplicação do filtro passa-faixa para detecção de bordas na imagem em níveis de cinza.

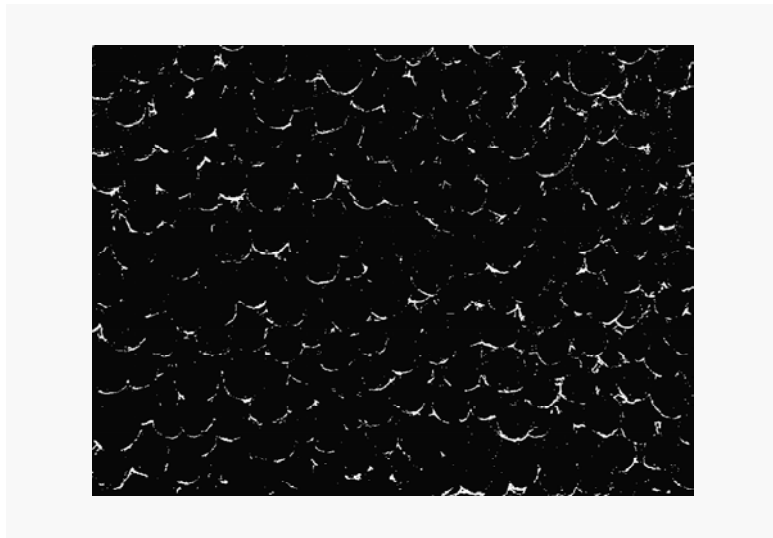


Figura 3.7 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 90), sem filtragem por média.

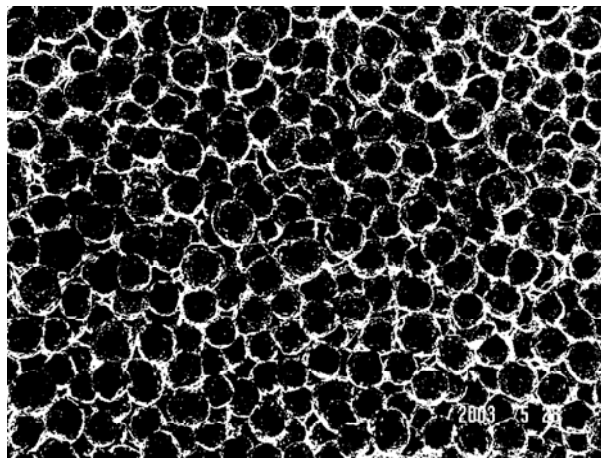


Figura 3.8 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 114) sem filtragem por média.

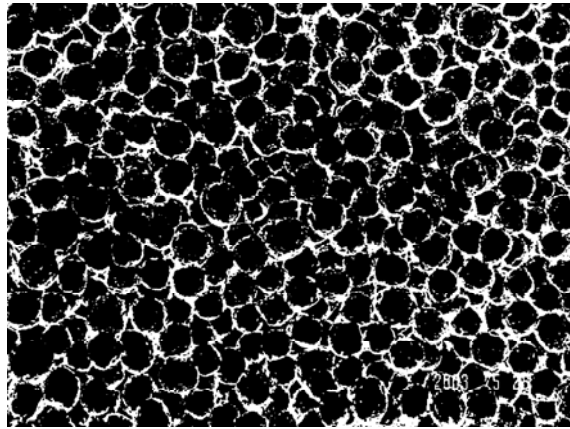


Figura 3.9 – Filtro passa-faixa (faixa de nível de cinza entre 10 e 114) com filtragem por média (2 iterações)

A observação das figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostra que o filtro passa-faixas para detecção de bordas apresentou um desempenho bastante satisfatório em relação à figura 3.6.

### **3.1.5.2 Binarização por Limiar Simples**

O procedimento de binarização por limiar simples (Cavallo, 1996) ou seja, um valor limite para definir imagem branca e imagem preta, foi aplicado e as figuras 3.10 e 3.11 apresentam os resultados da binarização utilizando-se um limiar de 114 sem e com filtragem, respectivamente.

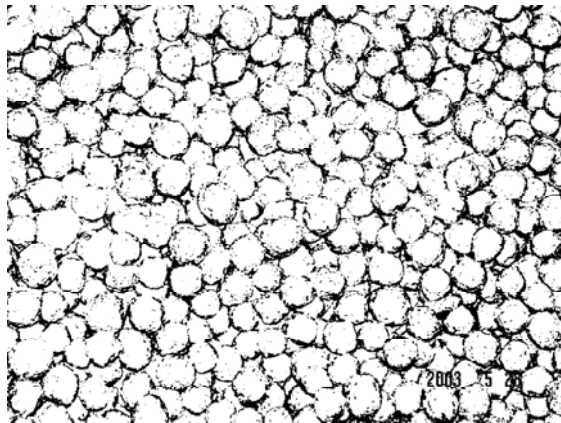


Figura 3.10 – Imagem binarizada sem filtragem, limiar de binarização de valor 114.

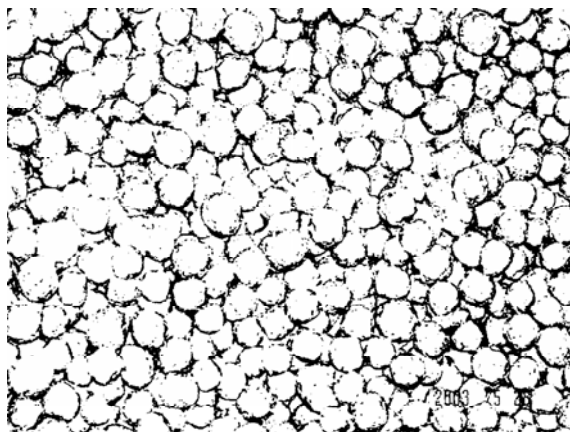


Figura 3.11 – Imagem binarizada com filtragem (2 iterações), limiar de binarização de valor 114.

A observação das figuras 3.10 e 3.11 mostra o papel da filtragem por média: a imagem binarizada com filtragem prévia, figura 3.11, possui menos pontos brancos em regiões pretas, tal como menos pontos pretos em regiões brancas.



### 3.2 Classificação das Pelotas

A metodologia de classificação das pelotas é baseada na propriedade geométrica de que em uma circunferência, um segmento de reta que cruza perpendicularmente o ponto médio de uma corda qualquer, é o diâmetro. Essa propriedade pode ser visualizada na figura 3.12.

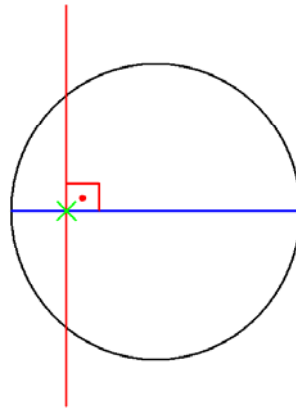


Figura 3.12 – Metodologia de classificação das pelotas.

Foi elaborada a seguinte metodologia para classificação das pelotas: na imagem já tratada com filtro por média, binarizada e corrigida, é feita uma varredura em colunas espaçadas, através da relação pixel/mm, de 16,1mm, pois a maior pelota tem 16,0 mm, permitindo a identificação de cordas nas pelotas e a determinação dos diâmetros. O espaçamento de 16,1 mm entre colunas evita que uma mesma pelota seja medida duas vezes, pois é o maior tamanho de pelotas do processo.

A figura 3.13 apresenta uma visualização da metodologia para classificação das pelotas. Em vermelho estão indicadas as colunas varridas e, em azul, os diâmetros obtidos para cada pelota, a partir dos pontos médios das cordas identificadas.

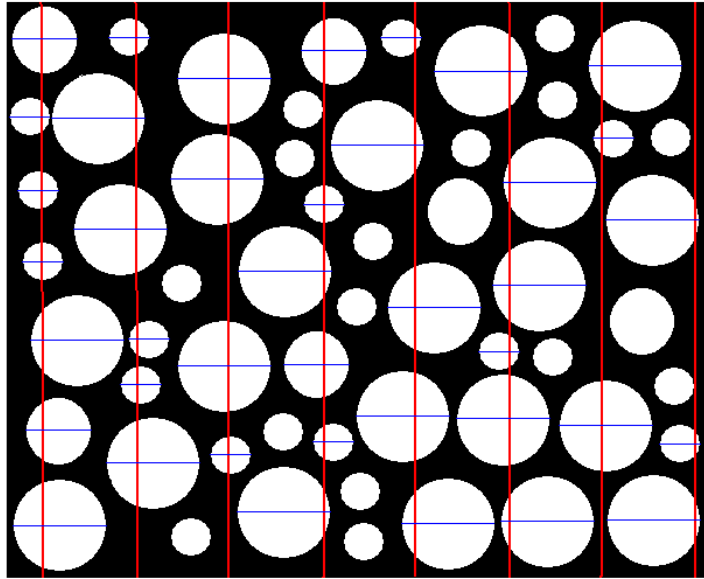


Figura 3.13 – Visualização da metodologia para classificação das pelotas

A identificação das cordas e dos diâmetros segue a seguinte lógica:

- a mudança da cor preta para a cor branca indica que se entrou em uma pelota;
- a mudança da cor branca para a cor preta indica que se saiu de uma pelota.

Sendo assim, para cada coluna selecionada, varre-se a linha, fazendo o seguinte:

- ao entrar numa pelota, armazena-se a posição do pixel da linha, que representa o início da corda;
- ao sair de uma pelota, armazena-se a posição do pixel da linha, que representa o fim da corda.

Feito isso, as linhas de início e fim das cordas são identificadas na coluna varrida. De posse desses dados, para cada corda, determina-se a linha correspondente ao ponto médio da corda da seguinte maneira:

$$\text{Linha ponto médio} = \frac{(\text{linha início} + \text{linha fim})}{2} \quad (3.2)$$

Tem, então, para a coluna varrida, as linhas que correspondem aos pontos médios de todas as cordas (pelotas) identificadas. Então, para cada uma dessas linhas, é feito o seguinte:

- partindo da coluna varrida, é percorrida a linha, seguindo para a direita, até o final da pelota (mudança da cor branca para a cor preta), armazenando-se o número de colunas percorridas;
- em seguida, partindo novamente da coluna varrida, é percorrida a linha, seguindo para a esquerda, até o final da pelota (mudança da cor branca para a cor preta), armazenando-se, novamente, o número de colunas percorridas.

A soma dos números de colunas percorridas para a esquerda e para a direita corresponde ao diâmetro da pelota, em pixels. Através de um fator de conversão (milímetros por pixel), cuja determinação é obtida com o padrão conhecido, é obtido o diâmetro, em milímetros.

Findada a varredura para todas as colunas selecionadas, têm-se armazenados os diâmetros de todas as pelotas identificadas como