BIANCA FOGGIATTO

PREVISÃO DE DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE CARAJÁS

São Paulo

2009

BIANCA FOGGIATTO

PREVISÃO DE DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE CARAJÁS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

São Paulo

2009

BIANCA FOGGIATTO

PREVISÃO DE DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE CARAJÁS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em engenharia.

São Paulo

2009

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de abril de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Foggiatto, Bianca

Previsão de desempenho do circuito de moagem de Carajás /

B. Foggiatto. – ed. rev. -- São Paulo, 2009.

230 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1.Cominuição 2.Modelagem de dados 3.Minerais metálicos
4.Ferro I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Homero Delboni Jr., pela orientação e pela determinação em superar os desafios durante todo o trabalho.

À FAPESP, pela concessão da bolsa e da reserva técnica.

À Vale, pelo apoio técnico e financeiro que se configurou em pessoas como Marco Túlio S. Ferreira, José Antonio R. Oliveira, Francisco R. Patto, Vânia D. Azevedo, Eduardo W. Veríssimo, Ercílio R. Almeida, Rogério Patente, além da equipe do Laboratório Físico de Carajás.

À equipe do Laboratório de Tratamento de Minérios da EPUSP, principalmente ao professor Eldon Masini e ao técnico Alfredo dos Santos Freitas, que tanto ajudaram na etapa de caracterização.

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio durante estes anos.

RESUMO

O circuito de moagem de Carajás foi originalmente projetado para moagem de *sinter feed*, obtendo-se como produto final *pellet feed*. O processo consiste em etapas de moagem e deslamagem para que se atinjam as especificações de granulometria e área específica. No processo, como um todo, há geração significativa de finos, que são então descartados, acarretando em perdas de material que poderia ser incorporado como produto. O melhor entendimento das características dos vários tipos de minérios, bem como a previsão do desempenho do circuito de moagem em função de tais características permite estabelecer cenários para promover aumentos na recuperação em massa e na produtividade do circuito. O presente trabalho tem por base a caracterização tecnológica dos principais tipos de minério de Carajás e o desenvolvimento de um método para previsão de desempenho do circuito de moagem, em função de tais características. Para o desenvolvimento do método foram realizados ensaios de moagem em bancada e amostragens no circuito industrial. Os resultados dos ensaios de moagem em bancada serviram para definição das condições operacionais em que o ensaio em bancada melhor representou o circuito industrial, denominado ensaio padrão. Os dados obtidos nas amostragens e na caracterização tecnológica serviram de base para a calibração dos modelos matemáticos dos equipamentos de processo. O modelo calibrado constituiu num excelente recurso para previsão de desempenho. O desempenho do circuito de moagem foi avaliado no que se refere à granulometria e área específica dos produtos obtidos. Ainda foram conduzidas simulações pelo ensaio padrão e pelo modelo calibrado integrado do circuito de moagem, que apontam potenciais dos minérios cujo comportamento na moagem era até então desconhecido. Os dois produtos aqui desenvolvidos são, portanto, de aplicação imediata como recursos para previsão de desempenho e melhoria operacional.

Palavras chave: moagem, modelagem, minério de ferro.

ABSTRACT

Originally designed for sinter feed grinding, the Carajas grinding circuit includes two ball mills in parallel lines in a closed configuration with cyclones. The ground product is further deslimed in hydrocyclone for achieving the final specifications regarding size distribution and surface area. In this process, there is a significant amount of high grade material, not recovered due to overgrind. Ore characterization was here selected for predicting the grinding circuit performance, which in turn was the basis for optimization. The aim of this work is the characterization of the main Carajas ore types as well as the development of a method that includes these characteristics for predicting the grinding circuit performance. Laboratory grinding tests and samplings in the industrial circuit were carried out to predict the grinding circuit performance. The grinding test results were used to set operational conditions in which the laboratory better represented the industrial circuit. Results from industrial sampling and characterization were the basis for fitting the mathematical models. The fitted model was an excellent resource for the prediction of the grinding circuit performance as well as for the grinding test. To assess the grinding performance, products size distribution and surface area were evaluated. Moreover, simulations of the grinding circuit indicated the potential of some ore types. The derived methods were validated as tools for predicting the grinding circuit performance and for operational optimization.

Keywords: grinding, modeling, iron ore.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1. Circuitos típicos de cominuição.	19
Figura 3.2. Mecanismos de fragmentação.	20
Figura 3.3. Movimento da carga no interior do moinho.	22
Figura 3.4. Aplicabilidade das leis da cominuição.	25
Figura 3.5. Modelos <i>Black Box</i>	27
Figura 3.6. Distribuição do parâmetro r/d^*	32
Figura 3.7. Distribuição das velocidades tangencial, radial e vertical.	34
Figura 3.8. Esquema dos fluxos de um ciclone.	35
Figura 3.9. Curvas de partição real e corrigida.	37
Figura 3.10. Fluxograma de trabalhos realizados em exercícios de simulação.	44
Figura 3.11. Cortador de fluxo de polpa.	48
Figura 3.12. Moinho de Bond da Escola Politécnica.	53
Figura 3.13. <i>Drop Weight Tester</i> do LSC-EPUSP.	55
Figura 3.14. Representação da relação energia/fragmentação.	56
Figura 3.15. Curvas t_n (% passante) x t_{10}	58
Figura 5.1. Circuito de moagem de Carajás.	69
Figura 5.2. Fluxograma do circuito de moagem e deslamagem de Carajás.	71
Figura 6.1. Pontos de amostragem no circuito de moagem e deslamagem de Carajás.	75
Figura 6.2. Amostragem no circuito de moagem.	76
Figura 7.1. Amostras de minério de ferro no pátio do LSC-EPUSP.	86
Figura 7.2. Acompanhamento, pela autora, da densidade de polpa durante a amostragem.	88
Figura 7.3. Gráficos do balanço de massa da amostragem 1.	91
Figura 7.4. Gráficos do balanço de massa da amostragem de 2.	92
Figura 7.5. Gráficos do balanço de massa da amostragem 3.	93
Figura 7.6. Gráficos do ajuste de modelos da amostragem 2.	98
Figura 7.7. Gráficos do ajuste de modelos da amostragem 3.	99
Figura 7.8. Gráficos das funções de quebra obtidas no ajuste dos moinhos.	100
Figura 7.9. Gráficos das funções de quebra obtidas no ajuste <i>master/slave</i> dos moinhos.	101
Figura 7.10. Curvas padrão de partição dos ciclones classificadores.	105
Figura 7.11. Curva padrão de partição dos ciclones de deslamagem.	107

Figura 7.12. Curva paramétrica da relação entre energia e fragmentação.	110
Figura 7.13. Curvas obtidas para diferentes tempos de moagem.	117
Figura 7.14. Variação dos parâmetros P_{80} e P_{50} obtidos nos ensaios de confirmação do tempo de moagem.	119
Figura 7.15. Curvas de moagem x porcentagem de sólidos.	122
Figura 7.16. Gráfico da área específica x porcentagem de sólidos.	123
Figura 7.17. Gráfico do tamanho de partícula x porcentagem de NP2.	125
Figura 7.18. Gráfico de parâmetros da granulometria x tamanho máximo de bolas.	128
Figura 7.19. Gráfico da porcentagem passante em 0,007 mm x rotação.	130
Figura 7.20. Distribuição granulométrica dos produtos moídos a 32, 35 e 38% de enchimento.	131
Figura 7.21. Gráficos de distribuição granulométrica dos <i>overflows</i> dos ciclones de classificação obtido no Caso Base e nas simulações.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Critério para avaliação da qualidade de operação de ciclones.	43
Tabela 3.2. Erros que contribuem com o erro total de amostragem.	46
Tabela 3.3. Distribuição de tamanhos das bolas da carga moedora.....	53
Tabela 3.4. Classificação de resistência ao impacto de amostras conforme o Índice de Quebra.	57
Tabela 3.5. Classificação de resistência à abrasão de amostras conforme t_d	59
Tabela 4.1. Métodos de concentração/tipos de equipamentos.	65
Tabela 4.2. Classificação típicas dos produtos de minério de ferro.....	66
Tabela 5.1. Especificações para o teor de impurezas do <i>pellet feed</i> de Carajás.....	70
Tabela 5.2. Equipamentos do circuito de moagem de Carajás.	70
Tabela 6.1. Dimensões dos ciclones medidas em campo.	79
Tabela 6.2. Critério de avaliação da qualidade do ajuste de modelos.....	80
Tabela 6.3. Características padronizadas do moinho laboratorial.....	81
Tabela 6.4. Características padronizadas da carga moedora.....	82
Tabela 6.5. Distribuição de tamanhos da carga moedora padrão dos ensaios de bancada....	82
Tabela 7.1. Amostras ensaiadas no LSC-EPUSP.....	85
Tabela 7.2. Amostragens realizadas no circuito industrial de moagem.	87
Tabela 7.3. Porcentagens de sólidos (em peso) obtidas através de balança Marcy.....	88
Tabela 7.4. Dados de campo e dados obtidos no programa supervisorio da usina.	89
Tabela 7.5. WSSQ obtidos no balanço de massa.....	90
Tabela 7.6. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 1.....	94
Tabela 7.7. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 2.....	95
Tabela 7.8. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 3.....	95
Tabela 7.9. Soma total dos erros dos ajustes de modelos.	97
Tabela 7.10. Comparação dos valores de r/d^* obtidos nos ajustes dos moinhos.	101
Tabela 7.11. Dados obtidos no ajuste de modelos para cálculo da eficiência energética operacional.	102
Tabela 7.12. Cálculo da eficiência energética segundo das obtidos no ajuste de modelos. .	102
Tabela 7.13. Cálculo da eficiência energética obtidos no ajuste de modelos.	103

Tabela 7.14. Parâmetros das equações de Nageswararao para os ciclones de classificação.	104
Tabela 7.15. Parâmetros operacionais e de desempenho calculados para os ciclones de classificação.	104
Tabela 7.16. Parâmetros das equações de Nageswararao para os ciclones de deslamagem.	106
Tabela 7.17. Parâmetros operacionais calculados para os ciclones de deslamagem.	106
Tabela 7.18. Sumário de dados balanceados e ajustados – Amostragem 2.	108
Tabela 7.19. Sumário de dados balanceados e ajustados – Amostragem 3.	108
Tabela 7.20. Resultados dos ensaios de moabilidade de Bond.	109
Tabela 7.21. Estatística dos ensaios de moabilidade de Bond.	110
Tabela 7.22. Parâmetros obtidos através do ensaio de DWT completo.	111
Tabela 7.23. Densidades das amostras submetidas ao ensaio de DWT simplificado.	112
Tabela 7.24. Estatística dos ensaios de determinação do peso específico.	112
Tabela 7.25. Resultados obtidos nos ensaios de DWT.	113
Tabela 7.26. Funções de quebra.	114
Tabela 7.27. Funções de quebra corrigidas.	115
Tabela 7.28. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Tempo de moagem.	117
Tabela 7.29. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto dos ensaios de moagem – Confirmação do tempo de moagem.	120
Tabela 7.30. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Porcentagem de sólidos.	122
Tabela 7.31. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto dos ensaios de moagem – Porcentagem de NP2.	124
Tabela 7.32. Sumário dos resultados de análise química do produto dos ensaios de moagem – Porcentagem.	125
Tabela 7.33. Distribuição de tamanhos das cargas de bolas.	126
Tabela 7.34. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – <i>Top size</i> das bolas.	127
Tabela 7.35. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Rotação.	129

Tabela 7.36. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Grau de enchimento.....	131
Tabela 7.37. Análise estatística dos ensaios de moagem.	133
Tabela 7.38. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto obtidos na simulação pelo Ensaio Padrão.....	135
Tabela 7.39. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e <i>overflow</i> obtidos na simulação pelo <i>JKSimMet</i>	138
Tabela 7.40. Sumário dos parâmetros operacionais das simulações pelo <i>JKSimMet</i>	139

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Autógeno
BBM	<i>Black Box Model</i>
BCB	Banco Central do Brasil
BIF	<i>Banded Iron Formation</i>
CB	Caso Base
DWT	<i>Drop Weight Test</i>
EP	Escola Politécnica
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
JKMRC	<i>Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre</i>
HPGR	<i>High Pressure Grinding Rolls</i>
LSC	Laboratório de Simulação e Controle
LTM	Laboratório de Tratamento de Minérios
NP2	Produto granulado
PIB	Produto Interno Bruto
PBM	<i>Population Balance Model</i>
PMI	Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
PMM	<i>Perfect Mixing Model</i>
ROM	<i>Run of mine</i>
SAG	Semiautógeno
USP	Universidade de São Paulo
USBM	<i>United States Bureau of Mines</i>
SFCK	<i>Sinter feed</i> Carajás
SPD	Soma Ponderada das Diferenças
WI	<i>Work Index</i>
WSSQ	<i>Weighted Sum of Squares</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	COMINUIÇÃO	17
3.2	MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO	19
3.3	MOAGEM	21
3.3.1	LEIS DA COMINUIÇÃO	23
3.3.2	MODELOS DE PROCESSOS DE COMINUIÇÃO	26
3.3.2.1	MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL	28
3.3.2.2	MODELO DE MISTURADOR PERFEITO	30
3.4	CLASSIFICAÇÃO	32
3.4.1	CICLONES	33
3.4.2	VARÁVEIS GEOMÉTRICAS	35
3.4.3	PARÂMETROS RELATIVOS ÀS CONDIÇÕES OPERACIONAIS	36
3.4.4	CURVAS DE PARTIÇÃO	37
3.4.5	MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO EM CICLONES	40
3.4.5.1	MODELO DE NAGESWARARAO	40
3.5	MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO	43
3.5.1	AMOSTRAGEM	44
3.5.2	TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM	46
3.5.2.1	TRANSPORTADORES DE CORREIA	47
3.5.2.2	POLPAS	47
3.5.3	BALANÇO DE MASSA	48
3.5.4	CALIBRAÇÃO DE MODELOS E SIMULAÇÃO	49
3.6	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	49
3.6.1	ENSAIO DE MOABILIDADE DE BOND	50
3.6.1.1	PROCEDIMENTO DO ENSAIO EM MOINHOS DE BOLAS	52
3.6.2	<i>DROP WEIGHT TEST</i> – DWT	54
3.6.2.1	PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE DWT	55
3.6.2.2	ENSAIO DE DWT SIMPLIFICADO	57
3.6.2.3	DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO QUEBRA	57
3.6.2.4	ENSAIO DE TAMBORAMENTO	59
3.6.2.5	DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO	60
4	MINÉRIO DE FERRO	61
4.1	MINERAIS DE FERRO	61
4.2	PRINCIPAIS TIPOS DE MINÉRIOS	62
4.3	ROTAS DE BENEFICIAMENTO	63
4.4	ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTOS	65
4.4.1	A IMPORTÂNCIA DA ÁREA ESPECÍFICA	66
5	CIRCUITO DE MOAGEM DO MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS	67
5.1	GEOLOGIA	67
5.2	DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE CARAJÁS	69

6	PREVISÃO DO DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM	73
6.1	AMOSTRAGENS	73
6.1.1	MINA	73
6.1.2	CIRCUITO DE MOAGEM	74
6.1.2.1	AMOSTRAGENS PARA ENSAIOS DE BANCADA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	74
6.1.2.2	AMOSTRAGENS PARA MODELAGEM DO CIRCUITO DE MOAGEM	74
6.2	BALANÇO DE MASSAS	77
6.3	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	78
6.3.1	PARÂMETROS DO MODELO DE MISTURADOR PERFEITO	78
6.3.2	PARÂMETROS DO MODELO DE NAGESWARARA	79
6.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	80
6.5	ENSAIOS DE MOAGEM EM BANCADA	81
6.5.1	ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS EM BANCADA	83
6.6	SIMULAÇÕES	83
6.6.1	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO DO ENSAIO PADRÃO	84
6.6.2	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO <i>JKSIMMET</i>	84
7	RESULTADOS	85
7.1	AMOSTRAGENS	85
7.1.1	AMOSTRAGEM NA MINA	85
7.1.2	AMOSTRAGEM NO CIRCUITO DE MOAGEM	86
7.1.2.1	AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE BANCADA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	86
7.1.2.2	AMOSTRAS PARA MODELAGEM DO CIRCUITO DE MOAGEM	87
7.2	BALANÇO DE MASSAS	90
7.2.1	SUMÁRIO DOS DADOS EXPERIMENTAIS E BALANCEADOS	94
7.3	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	96
7.3.1	PARÂMETROS DOS MODELOS DE MOAGEM	100
7.3.1.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	102
7.3.2	PARÂMETROS DO MODELO DE CICLONES	103
7.3.2.1	CICLONES DE CLASSIFICAÇÃO	103
7.3.2.2	CICLONES DE DESLAMAGEM	106
7.3.3	SUMÁRIO DE DADOS BALANCEADOS E DADOS AJUSTADOS	107
7.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	109
7.4.1	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOND	109
7.4.2	RESULTADOS DE ENSAIOS DE DWT	110
7.4.2.1	DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO	111
7.4.2.2	FUNÇÃO QUEBRA	113
7.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOAGEM EM BANCADA	116
7.5.1	TEMPO DE MOAGEM	116
7.5.2	PORCENTAGEM DE SÓLIDOS	121
7.5.3	PORCENTAGEM DE GRANULADO (NP2)	123
7.5.4	TAMANHO DE BOLAS	126
7.5.5	ROTAÇÃO	128
7.5.6	GRAU DE ENCHIMENTO	130
7.5.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CONSOLIDAÇÃO DO ENSAIO PADRÃO	132
7.6	SIMULAÇÕES	134
7.6.1	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO DO ENSAIO PADRÃO	134
7.6.2	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO <i>JKSIMMET</i>	137

8 CONCLUSÕES	142
REFERÊNCIAS	143
REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	148
ANEXO 1 – DADOS EXPERIMENTAIS DE AMOSTRAGENS NO CIRCUITO DE MOAGEM	149
ANEXO 2 – RESULTADOS DOS BALANÇOS DE MASSA	161
ANEXO 3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE MODELOS	172
ANEXO 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOABILIDADE DE BOND	178
ANEXO 5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE DWT	186
ANEXO 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOAGEM	187
ANEXO 7 – ANÁLISE DOS ENSAIOS DE MOAGEM	215
ANEXO 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PELO ENSAIO DE PADRÃO	220

1 INTRODUÇÃO

A indústria mineral brasileira apresenta posição de destaque no mercado internacional e, segundo dados do Banco Central do Brasil (BRASIL, 2009), sua participação no Produto Interno Bruto (PIB) do país atingiu 6,2% no ano de 2007. Esse cenário decorre da combinação de fatores como disponibilidade de recursos minerais e domínio de técnicas para transformar tais recursos em produtos comerciais que atendam às exigências de qualidade e preço dos mercados nacional e estrangeiro, dentre outros.

Os minérios brasileiros apresentam características próprias, razão pela qual o desenvolvimento de tecnologias diferenciadas de tratamento para aproveitá-los se faz necessário. Nesse contexto, o aperfeiçoamento tecnológico de processos existentes, aliado à pesquisas sobre novas abordagens técnicas deve ser privilegiado.

A cominuição, etapa determinante no desempenho técnico e econômico da maioria dos processos de tratamento de minerais, é uma extraordinária consumidora de energia elétrica. Assim sendo, índices marginais de aumento de eficiência em processos industriais não só resultam em economia expressiva de custos, mas também diminuem a escalada de investimentos no setor de geração de energia.

Aperfeiçoamentos tecnológicos recentes na área de cominuição são encontrados em usinas brasileiras já instaladas e em projetos de novas usinas no Brasil. As inovações nesse segmento incluem desde o estabelecimento de circuitos constituídos por equipamentos sofisticados e modernos à aplicação de técnicas avançadas de simulação matemática de processos. Ainda assim, em virtude das peculiaridades de muitos dos minérios brasileiros, oriundos de ambientes geológicos muito antigos e submetidos a elevados níveis de intemperismo, os desafios são contínuos.

2 OBJETIVOS

Originalmente projetado para a moagem de *sinter feed*, o circuito de moagem de Carajás é composto por dois moinhos de bolas em circuito fechado com ciclones. Os *overflows* destes ciclones são reunidos e então alimentam uma etapa de deslamagem que ajusta a granulação e a área específica do produto para adequação às especificações de *pellet feed*. Esse processo implica em geração significativa de finos, que são descartados e acarretam perda de um material que, embora fino para ser incorporado como produto, contém teores que atendem às especificações de teor de ferro e de impurezas, como alumina, sílica, fósforo e manganês.

Além da perda de material com altos teores de ferro, desde o ano de 2006 esse circuito de moagem vem sendo alimentado não apenas com *sinter feed*, mas também com ROM de qualidade adequada para *pellet feed*, selecionado nas frentes de lavra de Carajás. Esta flexibilidade é decorrente das variações na demanda e nos preços dos produtos de minério de ferro.

Nesse cenário, um melhor entendimento das características dos vários tipos de minérios, bem como a previsão de desempenho do circuito de moagem em função de tais características, permite ajustar a operação deste, bem como desenvolver uma ferramenta que permita estabelecer misturas de minérios ótimas, de forma a aumentar a recuperação em massa e a produtividade do circuito.

Os objetivos do presente trabalho foram: (1) caracterizar os principais tipos de minério de Carajás e (2) desenvolver um método para a previsão de desempenho do circuito em função das características tecnológicas desses minérios. O método desenvolvido deve ser de fácil execução e visa obter resultados que representem com fidelidade o desempenho do circuito em função das características dos minérios.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre os processos de cominuição, em especial a moagem, com enfoque nas propriedades de quebra do material. Também são descritos os processos de classificação e a rotina de um trabalho de simulação.

3.1 COMINUIÇÃO

O texto a seguir tem por referência os seguintes autores: Beraldo (1987), Chaves (2006), Galery et al. (2007), Kelly e Spottiswood (1982), Napier-Munn (1996), Prasher (1987), Pryor (1965) e Viana (2007).

No beneficiamento de minérios, a cominuição - ou redução controlada do tamanho das partículas - é um processo industrial que pode ter como objetivos: (1) obter um produto com granulometria determinada; (2) liberar o(s) mineral(is) de interesse da ganga, de maneira que possa(m) ser concentrado(s); (3) adequar a área específica para reações químicas subsequentes; e/ou (4) permitir o manuseio e o transporte contínuo do material.

De acordo com a granulometria do minério e os mecanismos de fragmentação envolvidos, os métodos de cominuição podem ser classificados em britagem ou moagem. A britagem é utilizada nos estágios em que o minério é mais grosseiro e, por meio de forças de compressão e de impacto, reduz as partículas a tamanhos centimétricos. Na britagem, a aplicação de energia ocorre de maneira praticamente individualizada, o que resulta em energia elevada para cada partícula, embora a energia total por unidade de massa seja relativamente baixa.

A moagem é comumente executada em estágios, e produz partículas que atingem tamanhos da ordem de centenas ou até dezenas de micrômetros. A principal força envolvida nesse processo é a abrasão, que favorece a quebra de arestas e o arredondamento das partículas. A energia aplicada se distribui sobre um grande número de partículas, portanto a energia aplicada por partícula é pequena, ainda que a energia total por unidade de massa seja alta.

A distribuição granulométrica dos produtos resultantes das etapas de cominuição é de grande importância, uma vez que modula o desempenho de etapas subsequentes de concentração. Em particular, a presença de finos ou grossos em excesso é igualmente deletéria, pois ambos podem causar diminuição na recuperação metalúrgica do mineral de interesse em processos como flotação, concentração gravítica e lixiviação, entre outros.

Os circuitos de cominuição podem ser configurados de forma aberta ou fechada. Nos circuitos abertos, após a cominuição o material passa direto para a próxima etapa do processo. Em um circuito fechado, o material cominuído passa por uma etapa de classificação, de forma que a fração grossa seja recirculada para o equipamento de cominuição. Tal fluxo é denominado carga circulante. A Figura 3.1 ilustra circuitos típicos de cominuição.

Os circuitos abertos são geralmente utilizados em etapas intermediárias do processo, enquanto os circuitos fechados são adotados quando é necessário controlar a granulometria do produto. Segundo Napier-Munn (1996), os circuitos fechados são mais eficientes na obtenção da granulometria desejada, o que evita a sobremagem e, consequentemente, diminui o consumo de energia.

O grau de cominuição deve ser determinado em função de parâmetros técnicos e da influência destes sobre os índices econômicos do processo. Assim, o consumo energético, o consumo de corpos moedores e as recuperações mássicas e metalúrgicas dos equipamentos são parâmetros que exercem influência em custos de operação e investimentos.

Os processos de cominuição apresentam baixa eficiência mecânica e são grandes consumidores de energia, por isso representam um desafio para a indústria e a ciência. A eficiência energética da moagem foi estimada por Beraldo (1987) como sendo da ordem de 2 a 3%.

(a) circuito clássico

(b) circuito autógeno

(c) circuito autógeno com moagem de bolas/seixos

Fonte: Adaptado de Kelly e Spottiswood (1982)

Figura 3.1. Circuitos típicos de cominuição.

3.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO

Materiais produzidos pelo homem, como os materiais metálicos ou cerâmicos, são geralmente bastante homogêneos e têm características químicas e microestruturais definidas, além de características quanto à fragmentação previsíveis.

Já os materiais naturais e as rochas são muito menos homogêneos, visto que os depósitos apresentam variações de mineralogia macro e microestruturais. O minério pode ser intemperizado ou oxidado em diferentes níveis, ou ainda conter um número variável de juntas e falhas pré-existent, estas últimas devidas à sua gênese, paragênese, ou ainda desmonte e manuseio. Por isso, o minério a ser alimentado a uma usina varia consideravelmente em curtos períodos de tempo.

Devido a tais fatores, a forma como a fragmentação ocorre, bem como a energia envolvida, dependem da natureza das partículas e das forças aplicadas. Existem três mecanismos principais de fragmentação envolvidos na cominuição (Figura 3.2):

- Impacto: a força é aplicada de forma rápida e com intensidade bastante superior à resistência da partícula. Como resultado, obtêm-se distribuições granulométricas finas;
- Abrasão/Atrição: ocorre quando partículas se encontram entre superfícies que se movimentam em sentido contrário. A força é insuficiente para gerar fratura em toda a partícula e a concentração local de esforços provoca pequenas fraturas superficiais, gerando partículas finas e pequena diminuição de tamanho da partícula original;
- Compressão: a força é aplicada de forma lenta, o que resulta na propagação de fraturas, que assim aliviam os esforços. Embora a força seja superior à resistência da partícula, poucas fraturas ocorrem, gerando poucos fragmentos de grande diâmetro relativo.

Fonte: Adaptado de Chieregati (2001)

Figura 3.2. Mecanismos de fragmentação.

A fragmentação de uma partícula ocorre ao longo de pontos ou planos de fraqueza, em escalas reduzidas, na estrutura atômica do material. A maioria das rochas de grande tamanho relativo apresenta fraturas e, quanto maior for o tamanho da rocha, maior número de pontos disponíveis para início da ruptura, portanto as fraturas são intergranulares. Já em partículas menores, a fratura se dá preferencialmente nos próprios grãos minerais, transgranulares portanto.

3.3 MOAGEM

O termo moagem é definido pela granulometria do produto, e não pela forma de aplicação de energia, pelo equipamento utilizado ou pela granulometria de alimentação (informação verbal)¹.

Taggart (1951) classifica a moagem da seguinte maneira: moagem grossa - produto com tamanho máximo entre 3,360 e 0,841 mm -, moagem intermediária - produto com tamanho máximo de 0,600 mm e com no máximo 75% passante em 0,074 mm -, e moagem fina - produto com tamanho máximo de 0,074 mm.

De forma simplificada, os moinhos tubulares consistem de uma carcaça cilíndrica que gira em torno do eixo horizontal, e cuja câmara de moagem é parcialmente preenchida por corpos moedores e polpa de minério. Embora seja conduzida a seco ou a úmido, esta última apresenta vantagens, pois a água é um excelente meio de transporte e dissipação de calor (CHAVES, 2001). Existem diversos tipos de moinhos, quais sejam, moinhos de bolas, moinhos de barras, moinhos multicâmaras, moinhos AG/SAG e moinhos de seixos. Este capítulo restringe-se a descrever a dinâmica interna de moinhos de bolas.

As principais características de um moinho são suas dimensões - diâmetro e comprimento - e a potência instalada. A potência efetiva de operação é afetada por variáveis operacionais do equipamento, tais como grau de enchimento, velocidade de rotação do moinho e porcentagem de sólidos da polpa alimentada.

A porcentagem de sólidos deve ser cuidadosamente avaliada, pois a quantidade de água adicionada causa mudanças no tempo de residência das partículas no interior do

¹ Informação fornecida pelo Prof. Dr. Homero Delboni Jr. em sala de aula, em 19 de novembro de 2007.

moinho, na viscosidade e na densidade da polpa, que levam a variações no desempenho do processo de moagem.

A velocidade de rotação influencia o movimento da carga dentro do moinho. Sob baixas rotações, a carga do moinho rola sobre ela mesma, fenômeno a que Taggart (1951) denominou movimento de “cascateamento”. Com o aumento progressivo da rotação, os corpos moedores são lançados em trajetórias parabólicas, movimento denominado “catarata”. A Figura 3.3 ilustra ambos os movimentos.

Fonte: Adaptado de Austin e Klimpel (1964)

Figura 3.3. Movimento da carga no interior do moinho.

A velocidade em que ocorre a centrifugação completa de um único corpo moedor é denominada velocidade crítica, cuja expressão é a que segue.

$$V_c = \frac{42,305}{\sqrt{D}}$$

onde:

V_c é a velocidade crítica (m/s);

D é o diâmetro do moinho (m).

A rotação do moinho é geralmente referida como uma porcentagem da velocidade crítica.

3.3.1 LEIS DA COMINUIÇÃO

Durante muitos anos, os estudos relacionados aos processos de cominuição tinham como foco a energia consumida, que representa uma importante parcela nos custos do processamento mineral. Tais estudos associavam a energia consumida ao grau de redução, expresso como um parâmetro referente à curva granulométrica. Esse parâmetro é geralmente a malha na qual passa determinada porcentagem (50, 80 ou 90%) da população de partículas considerada.

Nos experimentos realizados sempre foi evidente que, quanto mais fino o produto, maior é a energia requerida. Também foi observado que a relação entre a fragmentação e a energia consumida é inversamente proporcional a uma função-potência do tamanho de partícula, de acordo com a equação diferencial geral abaixo (BERALDO, 1987; CHAVES, 2001; LYNCH, 1977):

$$dE = -K \frac{dx}{x^n}$$

onde:

dE é o incremento de energia aplicada a uma massa unitária de minério;

dx é o incremento na diminuição de tamanho das partículas;

x é o tamanho das partículas;

K e n são constantes do minério.

Foram propostas diferentes teorias relacionadas à energia de fragmentação, que resultaram em diferentes interpretações dessa relação. Diferentes pesquisadores propuseram hipóteses baseadas na física para estimar a constante n do minério. Algumas destas hipóteses são descritas a seguir.

- Lei de Rittinger ($n = 2$)

A teoria mais antiga foi publicada por Rittinger em 1867, e sugere que a energia consumida é diretamente proporcional a área superficial gerada pela britagem ou moagem. Como a área específica é inversamente proporcional ao diâmetro das partículas, a expressão do consumo de energia proposta por Rittinger foi:

$$E = K \left[\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right]$$

onde:

x_1 e x_2 são o tamanho das partículas da alimentação e do produto, respectivamente.

À primeira vista parece ser uma teoria razoável, mas uma análise rápida revela grandes simplificações, uma vez que Rittinger assumiu que toda energia consumida é transferida à carga a ser moída e não considerou a deformação que ocorre antes da quebra das partículas (BOND, 1985).

- Lei de Kick ($n = 1$)

Em 1885, Kick demonstrou matematicamente que a energia necessária para deformar e quebrar partículas homogêneas é proporcional ao volume destas. Portanto, a relação de redução dependeria apenas da energia consumida. A expressão da energia consumida desenvolvida por Kick foi a seguinte:

$$E = K \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right)$$

Embora a teoria de Kick seja aceitável para materiais homogêneos, a energia calculada não corresponde àquela requerida na prática, devido à influência de fraturas e outras zonas de fraquezas no processo de fragmentação.

- Lei de Bond ($n = 3/2$)

Como resultado de um extenso trabalho experimental e da análise de processos industriais, em 1952, Bond sugeriu que a energia requerida por tonelada de minério é proporcional à raiz quadrada da área nova produzida e inversamente proporcional ao diâmetro das partículas. Bond (1952) derivou a equação a seguir, conhecida como Terceira Lei da Cominuição:

$$E = K \left[\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right]$$

A variável K , chamada de *Work Index* (WI), é determinada laboratorialmente através de um procedimento padronizado que será descrito mais adiante. A relação de Bond (1952) é utilizada até hoje, embora em muitos casos sua aplicação seja restrita.

Charles (1957) e Holmes (1957) apresentaram, independentemente, uma equação na qual o expoente do tamanho deixa de ser 1 e passa ser uma variável cujo valor deve estar entre 0 a 1. A expressão simplificada proposta por esses autores foi:

$$E = K \left[\frac{1}{x_2^{(n-1)}} - \frac{1}{x_1^{(n-1)}} \right]$$

Entretanto, uma vez que o trabalho envolvido na determinação da variável n para os diferentes materiais sob condições de operação diferentes é muito grande, as idéias de Charles (1957) e Holmes (1957) não foram utilizadas na prática.

Segundo Prasher (1987), todas essas expressões, propostas para a relação entre energia consumida e fragmentação, requerem correções para aplicações.

Em 1961, Hukki apontou regiões de aplicabilidade para tais expressões (Figura 3.4). Para o autor, a relação de Kick é mais apropriada para britagem, a lei de Bond para moagem de bolas e barras, e a hipótese de Rittinger para frações ultrafinas.

Fonte: Adaptado de Hukki (1961)

Figura 3.4. Aplicabilidade das leis da cominuição.

A aplicabilidade da lei de Bond e da lei de Rittinger para moagens ultrafinas foi analisada por Donda (1998). Embora o método de Bond tenha apresentado estimativas de consumo específico de energia dentro de limites aceitáveis, os ensaios laboratoriais são muito demorados devido à dificuldade de executar o peneiramento em malhas mais finas. O autor considerou a aplicação da lei de Rittinger para moagens ultrafinas mais atrativa, pois:

- 1) Permite a redução do tempo de trabalho em laboratório;
- 2) Permite a determinação do consumo específico de energia em função da área específica.

3.3.2 MODELOS DE PROCESSOS DE COMINUIÇÃO

Ainda que a teoria energética consolidada por Bond (1952) apresente ampla aplicação, ela não é suficiente para explicar os fenômenos envolvidos nos processos de cominuição. Na tentativa de entender mais profundamente tais fenômenos, modernamente surgiu uma abordagem diferente, denominada modelagem de processos de cominuição. Os modelos incluem parâmetros relacionados às variáveis operacionais dos processos.

As duas vertentes de modelagem cuja aplicação prática na indústria mineral foi bem sucedida dividem os modelos de cominuição em duas classes principais:

- Modelos fundamentais: consideram todos os elementos inerentes ao processo e os detalhes envolvidos no processo de fragmentação.
- Modelos fenomenológicos: consideram o equipamento de cominuição como um elemento de transformação da distribuição granulométrica da alimentação.

Os modelos fundamentais são solidamente baseados na mecânica newtoniana, e consideram diretamente as interações entre as partículas minerais e os elementos do equipamento. Tais modelos descrevem detalhadamente as relações entre as condições físicas dentro do equipamento e o produto obtido no processo.

Modelos fundamentais permitem, assim, avaliar a interação detalhada do moinho com o minério e os corpos moedores e, ainda, prever o consumo energético, contudo tornam-se muito complexos. Na prática, isso significa considerar inúmeras variáveis internas ao moinho, o que implica na necessidade de alta capacidade computacional.

Os modelos fenomenológicos, conhecidos como *Black Box Models* (BBM), ajudam a prever a distribuição granulométrica do produto a partir da distribuição granulométrica da alimentação, da caracterização da fragmentação e de experiências anteriores com equipamentos similares. Esses modelos buscam representar o fenômeno de quebra por meio de variáveis artificiais (Figura 3.5), e não dos princípios físicos envolvidos. A notação vetorial é utilizada para representar as vazões de entrada e saída de cada fração de tamanho presente no fluxo.

Fonte: Adaptado de Napier-Munn (1996)

Figura 3.5. Modelos *Black Box*.

Esses modelos permitem estimar a distribuição granulométrica do produto a partir da distribuição granulométrica e dureza da alimentação e das condições operacionais:

$$P = F(f, b, m, s)$$

onde:

f e P são a distribuição da alimentação e do produto, respectivamente;

b é a matriz ou vetor normalizado de quebra;

m é um fator relacionado ao equipamento;

s representa as condições de operação, incluindo vazão de alimentação.

Com o desenvolvimento computacional, a utilização de tais modelos se tornou viável e prática. Dependendo da abordagem, as partículas no equipamento podem ser consideradas perfeitamente misturadas ou com movimentos diferenciais, que assim determinam diferentes tempos de residência para os diferentes tamanhos de partícula. O primeiro grupo é denominado Modelo do Misturador Perfeito (*Perfect Mixing Model* – PBM), enquanto o segundo é denominado Modelo Cinético.

Os conceitos da cinética do processo de cominuição desses modelos são similares. Tais conceitos são descritos a seguir.

- Função seleção: é a probabilidade de uma partícula ser cominuída, e representa a velocidade de desaparecimento das partículas para cada faixa granulométrica. É expressa pela relação entre a massa que foi cominuída e a massa inicial de material em uma dada faixa de tamanhos, e depende principalmente das condições operacionais da moagem.
- Função quebra (*appearance function*): é a lei que descreve a distribuição granulométrica das partículas resultante da quebra primária de uma partícula maior. A função quebra é uma característica do minério.
- Função classificação: após uma sucessão de eventos de quebra, cada fração é submetida a uma classificação antes de sofrer o próximo estágio de quebra. Assim, partículas mais grossas são retidas e sua passagem para o próximo evento de quebra é impedida. Essa função, pouco importante para moinhos de bolas, é essencial em moinhos de barras (SILVA et al., 2007).

3.3.2.1 MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL

Os modelos cinéticos e os misturadores perfeitos têm em comum o arcabouço do Modelo de Balanço Populacional (*Population Balance Model – PBM*), criado por Epstein em 1947 (apud NAPIER-MUNN, 1996). Esse modelo tem sido amplamente aplicado desde sua criação, tanto na otimização e controle de processos, quanto no dimensionamento de instalações.

O PBM é um modelo de taxa de primeira ordem, pois assume que a produção de material cominuído por intervalo de tempo depende unicamente da massa da fração granulométrica considerada. Para tanto, cada fração granulométrica corresponde a uma constante que caracteriza a taxa de desaparecimento, chamada taxa de quebra, expressa da maneira que segue:

$$Massa\ moída = k_i s_i$$

onde:

k_i é a taxa de quebra da i-ésima fração granulométrica da carga do moinho (min^{-1});

s_i é a massa da i-ésima fração granulométrica da carga do moinho (kg).

A premissa de quebra de primeira ordem, cuja grande vantagem é a simplificação do modelo, torna-se um fator limitante na aplicação do modelo em faixas de operação muito amplas. Assume-se, assim, que o número de choques em cada intervalo de energia se mantém aproximadamente constante. Se a quantidade de partículas for muito superior ou inferior ao número de impactos, a premissa de primeira ordem não é válida.

A taxa de quebra pode ser determinada a partir de ensaios de laboratório, mas também pode ser retrocalculada através da equação básica do PBM. A dedução dessa equação tem por referência o balanço de massas para uma faixa granulométrica individual, através da seguinte equação:

$$Alimentação + \frac{Material\ fragmentado}{de\ faixas\ superiores} = Produto + \frac{Material\ fragmentado\ que}{sai\ da\ faixa\ considerada}$$

Outro parâmetro importante é a função quebra (b_{ij}), que é uma característica do material cominuído. Trata-se da fração de uma faixa granulométrica superior (j-ésima) que, após a quebra, se reporta à faixa granulométrica considerada (i-ésima). A equação do balanço de massa fica então definida:

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i$$

onde:

f_i é a vazão de sólidos da alimentação do equipamento correspondente à i-ésima faixa granulométrica (t/h);

p_i é a vazão de sólidos do produto do equipamento correspondente à i-ésima faixa granulométrica (t/h);

b_{ij} é a função quebra;

k_i é a taxa de quebra correspondente à i-ésima faixa granulométrica (h^{-1});

s_i é a massa da carga do moinho correspondente à i-ésima faixa granulométrica (t).

Para estimar o produto de um moinho, a equação acima pode ser re-escrita da seguinte maneira:

$$p_i = f_i - k_i s_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j$$

Uma vez determinados os parâmetros p_i , f_i e s_i , e com base em uma função (matriz) representativa do minério para b_{ij} , pode-se calcular diretamente um conjunto de valores k_i a partir da faixa granulométrica mais grossa (NAPIER-MUNN, 1996).

3.3.2.2 MODELO DE MISTURADOR PERFEITO

As complexidades do PBM derivam das considerações sobre a mistura e da dificuldade de estabelecer o tempo de residência para cada fração granulométrica no interior do moinho. Com o modelo proposto por Whiten em 1976 (apud NAPIER-MUNN, 1996), no qual o moinho é considerado um misturador perfeito, essas dificuldades foram superadas.

Como no Modelo de Misturador Perfeito (*Perfect Mixing Model* – PMM) o conteúdo do moinho está perfeitamente misturado, sua carga está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga (d_i) para cada faixa granulométrica.

$$p_i = d_i s_i$$

O modelo também se baseia no balanço de massas para as faixas granulométricas. No modelo de Whiten (1976, apud NAPIER-MUNN, 1996), a taxa de quebra é representada pela variável r_i e a função quebra, por sua vez, é representada pela variável a_{ij} - ou fração proveniente da malha j retida na malha i após um evento de fragmentação. A equação que descreve o balanço para cada faixa granulométrica é:

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j = p_i + r_i s_i$$

Os vetores f_i , p_i e s_i representam, respectivamente, a vazão de alimentação do moinho, a vazão de descarga do moinho e o conteúdo interno do moinho (carga) em cada

intervalo granulométrico i . Quando as equações básicas do PMM são combinadas, é possível normalizar os parâmetros taxa de quebra e descarga, obtendo-se a equação a seguir:

$$f_i + \sum_{j=1}^i \left[\frac{a_{ij} r_j p_j}{d_j} \right] = p_i + \frac{r_i p_i}{d_i}$$

Fica assim definido o parâmetro principal do modelo, que é a razão r/d . Esse parâmetro pode ser retrocalculado diretamente por meio de amostragens e estimativas das distribuições granulométricas da alimentação e do produto do moinho, bem como de uma função quebra que represente com fidelidade as características do minério processado.

A normalização do parâmetro r/d é feita para corrigir as variações no tempo de residência médio das partículas no interior do moinho, que é considerado independentemente das dimensões ou mesmo das condições operacionais do moinho estudado. A equação abaixo representa a normalização do parâmetro r/d .

$$\frac{r_i}{d_i} = \frac{r_i}{d_i^*} \left(\frac{D^2 L}{4Q} \right)$$

onde:

D é o diâmetro interno do moinho (m);

L é o comprimento interno do moinho (m);

Q é a vazão volumétrica de alimentação do moinho (m³/h).

Dessa forma, o parâmetro r/d^* , que representa as características do equipamento e da interação entre este e o minério, é representado por uma curva quadrática definida por 3 ou, no máximo, 4 pontos. Para cobrir toda a faixa granulométrica estudada utiliza-se o método *spline function*, conforme ilustra a Figura 3.6.

Figura 3.6. Distribuição do parâmetro r/d^* .

3.4 CLASSIFICAÇÃO

Em um circuito de cominuição, a seleção de partículas a serem cominuídas é executada por equipamentos como ciclones e peneiras, entre outros. As peneiras separam o material, em função de sua dimensão média, em duas classes de tamanho: o *oversize* e o *undersize*. Já a classificação separa o material em duas classes granulométricas de acordo com o diâmetro hidráulico das partículas, obtendo-se dois fluxos: o *overflow* e o *underflow*, o último apresenta maior proporção de partículas grossas.

Esses equipamentos influenciam de maneira determinada o desempenho de circuitos industriais, uma vez que definem as cargas circulantes, a capacidade do próprio circuito e a distribuição granulométrica do produto. Por outro lado, as principais variáveis de operação de moinhos tubulares são: vazão de alimentação, densidade de polpa e carga de corpos moedores, que assim podem resultar em maior geração de finos, influenciando também o ritmo de produção do circuito.

3.4.1 CICLONES

No passado, o classificador espiral foi muito utilizado em circuitos fechados de moagem. Atualmente, o ciclone é o equipamento mais utilizado pela indústria mineral para a classificação de partículas finas (entre 0,5 e 0,001mm), devido a características como alta capacidade, fácil controle operacional e ausência de partes móveis. Sua aplicação se dá em circuitos fechados de moagem, em deslamagens e em operações de desaguoamento.

O equipamento consiste de um vaso com uma parte cilíndrica e outra parte cônica. Na parte cilíndrica há uma abertura de entrada denominada *inlet*, pela qual a alimentação é introduzida tangencialmente. São duas as aberturas de saída, a saber:

- *Vortex*: tubo coaxial localizado na parte superior do ciclone, por onde flui o produto relativamente fino;
- *Apex*: orifício localizado na parte inferior do ciclone, pelo qual flui o produto grosso.

Ao entrar no ciclone, em função da geometria da parte cilíndrica, a polpa adquire um movimento rotacional. O movimento rotacional confinado e a geometria do ciclone determinam, a partir de certa vazão de alimentação, o aparecimento de um fluxo de ar ascensional, que arrasta certa porção do líquido e de partículas para a saída superior, através do *vortex*. Segundo Kelly e Spottiswood (1982), a velocidade da polpa em qualquer ponto do ciclone pode ser dividida em três componentes, quais sejam:

- Tangencial;
- Radial;
- Vertical.

A Figura 3.7 mostra a distribuição de tais velocidades dentro do ciclone.

Fonte: Adaptado de Kelly e Spottiswood (1982)

Figura 3.7. Distribuição das velocidades tangencial, radial e vertical.

A componente tangencial da velocidade, que confere o movimento de rotação à polpa, é mínima no centro do ciclone e aumenta proporcionalmente ao raio.

Já a componente vertical determina se a partícula será encaminhada ao *vortex* ou ao *apex*. No primeiro caso a partícula segue o fluxo ascendente, mais diluído, formado por uma maioria de finos, enquanto que no segundo caso, a partícula segue o fluxo descendente, com maioria de grossos. A componente vertical determina portanto a partição de sólidos do ciclone.

A componente radial (força centrífuga) faz com que as partículas se direcionem às paredes dos ciclones. Como as partículas relativamente grossas apresentam maior massa, estas se encaminham rapidamente a região mais próxima às paredes do ciclone, onde perdem a velocidade e fluem em movimento espiral para baixo, portanto em direção ao *apex*. Como as partículas relativamente finas não possuem massa suficiente para se encaminhar às paredes do ciclone, estas seguem o fluxo vertical ascendente.

Dessa forma, a região próxima à parede do ciclone é ocupada predominantemente por partículas grossas, e a região central, preferencialmente por partículas finas (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982).

Como a classificação é realizada em populações de partículas, é comum utilizar o diâmetro de corte como parâmetro para quantificar a separação. Para Plitt (1976), o diâmetro de corte (*cut size*) refere-se ao diâmetro mediano de partição (d_{50}), ou seja, tamanho no qual há igual probabilidade de a partícula sair pelo *overflow* e pelo *underflow*. Já segundo Chaves (2001), o diâmetro de corte refere-se ao P_{95} , ou seja, ao tamanho em que passa 95% da massa do *overflow*.

O diâmetro de corte é influenciado por variáveis geométricas do equipamento ou pelas condições de operação deste. A Figura 3.8 mostra um esquema dos fluxos dentro do ciclone e cada uma das variáveis são comentadas nas próximas seções.

Fonte: Adaptado de Kelly e Spottiswood (1982)

Figura 3.8. Esquema dos fluxos de um ciclone.

3.4.2 VARÁVEIS GEOMÉTRICAS

Este subitem descreve detalhadamente os parâmetros geométricos dos ciclones.

- Diâmetro do ciclone: principal parâmetro geométrico do equipamento, geralmente expresso em polegadas, exerce grande influência sobre o diâmetro de corte e

determina a capacidade deste. Classificações em granulometrias mais finas requerem ciclones menores;

- Área do *inlet*: parâmetro que determina a velocidade de entrada da polpa e a capacidade volumétrica do equipamento;
- Comprimento da seção cilíndrica e ângulo de cone: parâmetros que afetam o tempo de residência da polpa no ciclone e, portanto, influenciam diretamente o desempenho do ciclone;
- Diâmetro do *vortex*: o aumento do diâmetro do *vortex* leva a acréscimos na porcentagem de sólidos do *overflow* e aumento do diâmetro de corte;
- Diâmetro do *apex*: embora o aumento do diâmetro do *apex* promova a diminuição do diâmetro de corte a relação inversa é limitada, pois pode ocorrer acúmulo de partículas grossas dentro do ciclone e, conseqüentemente, sobrecarga do *apex*. Em situações extremas há bloqueio parcial ou total do fluxo ascensional de ar (vórtice), ocorrendo o fenômeno de operação em cordão, quando a maior parte das partículas se encaminha para o *apex*.

3.4.3 PARÂMETROS RELATIVOS ÀS CONDIÇÕES OPERACIONAIS

A seguir são apresentados os principais parâmetros utilizados em operações de ciclones.

- Porcentagem de sólidos da polpa de alimentação: geralmente, o aumento dessa variável ocasiona aumento no diâmetro de corte;
- Distribuição granulométrica da alimentação: quanto maior for a presença de finos na alimentação, maior será a viscosidade da polpa, o que acarreta aumento do diâmetro de corte;
- Pressão de alimentação: o aumento da pressão da alimentação resulta em aumento na força centrífuga das partículas, diminuindo o diâmetro de corte.

O fator que contribui para a ineficiência dos processos de classificação é o arraste de partículas finas pelo fluxo de polpa para o *underflow*, principalmente devido à elevada

porcentagem de sólidos da polpa da alimentação. Quando isso ocorre o ciclone opera em cordão. Para evitar tal situação, adiciona-se água à polpa de alimentação, de forma a garantir que o ciclone opere em regime de *spray* no *underflow*.

3.4.4 CURVAS DE PARTIÇÃO

Em uma operação de classificação, a partição é definida como a fração da alimentação que passa para o produto contendo a maioria relativa de grossos. Em se tratando de ciclones, refere-se ao *underflow*.

O desempenho do ciclone, em termos de separação de tamanhos ou recuperação de sólidos, é representado por curvas de partição (Figura 3.9). Portanto, a curva de partição descreve a fração de um determinado tamanho de partículas i que se encaminha para o *underflow*.

Figura 3.9. Curvas de partição real e corrigida.

A curva obtida através de dados experimentais é denominada curva de partição real. A partição real (P_r) para cada faixa de tamanho i é dada pela relação a seguir:

$$P_{ri} = \frac{m_{Ui}M_U}{m_{Ai}M_A}$$

onde:

m_{Ui} e m_{Ai} são as porcentagens retidas simples em massa da i -ésima fração do *underflow* e da alimentação, respectivamente;

M_U e M_A são as vazões de sólidos dos fluxos de *underflow* e de alimentação, respectivamente.

Em processos industriais, a curva de partição real não passa pela origem, característica que se deve à presença de finos no *underflow*. Tal fenômeno, conhecido como *by-pass* ou curto-circuito, ocorre independentemente da ação do campo centrífugo e dos mecanismos de classificação que ocorrem no interior do ciclone, de forma que uma parcela dos sólidos presentes, em todos os tamanhos de partículas, seja arrastada para o *underflow* ou para o *overflow*.

O mecanismo mais utilizado para quantificar tal fenômeno é aquele proposto por Kelsall (1953), que associa o valor de *by-pass* à partição de água para o *underflow*. O autor demonstrou que, se a parcela correspondente ao *by-pass* for subtraída de cada classe granulométrica, a curva de partição real pode ser corrigida, obtendo-se a curva de partição corrigida.

$$P_{ci} = \frac{P_{ri} - R_f}{1 - R_f}$$

onde:

R_f é a partição de água, neste caso igual ao *by-pass*.

Segundo Yoshioka e Hota (1955, apud CHAVES, 2001), deve-se dividir os valores das abscissas (tamanho de partícula) pelo diâmetro mediano de partição (d_{50c}) para normalizar a curva de partição corrigida, e assim obter a curva padrão de partição. Assim, quando $P_{ci} = 0,5$ então $d_i/d_{50c} = 1$.

Devido à similaridade geométrica entre ciclones de diferentes tamanhos, a curva padrão de partição é de extrema importância, pois é invariante dentro de limites de variações das condições operacionais e das dimensões de ciclones semelhantes (LYNCH; RAO, 1975).

Os parâmetros necessários para caracterizar a operação através de curvas de partição são:

- O diâmetro mediano corrigido (d_{50c}), que indica o tamanho de partículas que apresentam as mesmas possibilidades de serem encaminhadas para o *underflow* ou para o *overflow* (parâmetro de posição);
- A inclinação da curva no segmento próximo ao d_{50c} (parâmetro de dispersão);
- A partição de água do *underflow* (R_f), associada à parcela correspondente ao *by-pass*.

Dentre as propostas de parametrização de curvas de partição existentes na literatura, as mais utilizadas são:

- Reid e Plitt (1971, apud NAPIER-MUNN, 1996) - adaptação da equação de distribuição de Rosin-Rammler

$$P_{ci} = 1 - \exp[-\ln 2(x_i)^m]$$

- Whiten (1972, apud NAPIER-MUNN, 1996)

$$P_{ci} = \frac{e^{\alpha x_i} - 1}{e^{\alpha x_i} + e^{\alpha} - 2}$$

onde:

$$x_i = d_i/d_{50c};$$

d_i é o tamanho considerado;

d_{50c} é o diâmetro mediano de partição;

m e α são parâmetros que descrevem a curva de partição.

A parametrização proposta por Reid e Plitt (1971, apud NAPIER-MUNN, 1996) pode ser obtida diretamente utilizando-se papel bilogarítmico. Dessa maneira, o valor da inclinação (m) da curva de partição é calculado diretamente, com uma simples regressão linear. O valor de m pode variar de acordo com a separação. Assim, valores de m maiores que 3 representam classificações eficientes, e valores de m menores que 2 indicam classificações pobres.

Por outro lado, a equação de Whiten (1972, apud NAPIER-MUNN, 1996) requer regressões não-lineares para o cálculo da inclinação (α).

3.4.5 MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO EM CICLONES

Diversos modelos de classificação em ciclones são baseados na mecânica de fluidos e na teoria da sedimentação. Na prática, entretanto, esses modelos – denominados fundamentais - requerem uma grande capacidade computacional e não apresentam a precisão desejada.

Por essa razão, os modelos fenomenológicos de ciclones são muito mais difundidos. O primeiro modelo fenomenológico amplamente difundido foi o modelo de Lynch e Rao (1975). As fórmulas desse modelo refletem a relação observada entre critérios de desempenho como d_{50c} , e fatores como geometria do ciclone, vazão e porcentagem de sólidos da alimentação. Em 1978, o modelo Nageswararao (1995), cujas equações são descritas detalhadamente na próxima subseção, foi originado diretamente do modelo criado por Lynch e Rao (1975).

Existem diferenças conceituais entre esse modelo e o modelo de Plitt (1976), segundo modelo fenomenológico considerado. Enquanto no modelo de Plitt (1976) o coeficiente de inclinação da curva padrão de partição é calculado por meio de uma equação específica, no modelo de Nageswararao esse parâmetro é obtido a partir de dados experimentais. Assim, para determinar a curva padrão de partição do sistema é necessário realizar pelo menos um teste com o minério.

3.4.5.1 MODELO DE NAGESWARARAO

O modelo de Nageswararao tem por base quatro relações referentes ao cálculo do diâmetro mediano da separação, da partição de água, da partição de polpa e da vazão volumétrica de alimentação do ciclone.

Os três primeiros parâmetros são necessários para o estabelecimento dos valores de partição real, que são atribuídos a cada intervalo granulométrico. Os últimos três parâmetros definem as vazões da alimentação e dos produtos gerados (*overflow* e *underflow*).

A relação para cálculo do diâmetro mediano corrigido de separação é a seguinte:

$$d_{50c} = K_{D_o} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,5} (\theta)^{0,15} \left(\frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} (D_c)^{0,35} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{0,52} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{-0,47} (\lambda)^{0,93} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,22}$$

onde:

D_i é o diâmetro equivalente do *inlet* (m);

D_o é o diâmetro do *vortex* (m);

D_u é o diâmetro do *apex* (m);

D_c é o diâmetro do ciclone (m);

L_c é o comprimento da seção cilíndrica do ciclone (m);

θ é o ângulo da parte cônica do ciclone ($^\circ$);

P é a pressão de alimentação da polpa (kPa);

ρ_p é a densidade de polpa na alimentação (t/m^3);

g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$);

K_{D_o} é uma constante a ser estimada a partir dos dados;

λ é um termo relativo à fração volumétrica de sólidos, que obedece à seguinte equação:

$$\lambda = \frac{10^{1,82c_v}}{8,05(1 - c_v)^2}$$

c_v é a fração volumétrica de sólidos na alimentação.

É comum observar a influência da densidade dos minerais sobre o diâmetro de corte (d_{50c}) nos processos de classificação. Valores do peso específico dos minerais individuais são obtidos para o cálculo do diâmetro de corte para o minério, através da aplicação da seguinte relação:

$$d_{50c}(m) = \left(\frac{sg_f - 1}{sg_m - 1} \right) d_{50c}$$

onde:

sg_f e sg_m são a peso específico do fluido e do minério, respectivamente.

A relação para cálculo da vazão volumétrica de alimentação é a seguinte:

$$Q = K_{Q0} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{0,45} (\theta)^{-0,1} \left(\frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} (D_c)^2 \left(\frac{P}{\rho_p} \right)^{0,5} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{0,68}$$

onde:

Q é a vazão volumétrica de polpa de alimentação (m^3/h);

K_{Q0} é uma constante a ser estimada a partir dos dados.

As partições de água (R_f) e polpa (R_v) para o *underflow* são calculadas pelas relações abaixo:

$$R_f = K_{W1} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,5} (\theta)^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{-1,19} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{2,4} (\lambda)^{0,27} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,53}$$

$$R_v = K_{V1} \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,25} (\theta)^{-0,24} \left(\frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \left(\frac{D_o}{D_c} \right)^{-0,94} \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^{1,83} (\lambda)^{0,27} \left(\frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,31}$$

onde:

R_f é a partição de água para o *underflow* (%);

R_v é a partição volumétrica de polpa para o *underflow* (%);

K_{W1} e K_{V1} são constantes a serem estimadas a partir dos dados.

As constantes K_{D0} , K_{Q0} , K_{W1} e K_{V1} permitem a calibração das relações e dependem exclusivamente das características do minério que alimenta o ciclone, principalmente quanto à distribuição granulométrica e ao peso específico (NAGESWARARAO, 1995).

O modelo de Nageswararao tem como premissa fundamental a curva padrão de partição não depender das condições de operação do ciclone. Ademais, essa curva é válida para equipamentos cujos elementos tenham aproximadamente as mesmas relações geométricas entre si. Dessa forma, a partir da realização de pelo menos um teste com o minério obtém-se a curva padrão de partição do sistema e esta servirá para simulações posteriores.

O coeficiente de inclinação da curva padrão de partição é um parâmetro de dispersão dessa curva, muitas vezes associado à qualidade da separação. O *by-pass* representa um bom índice para estimar a qualidade da separação em ciclones instalados em circuitos de classificação, conforme critérios descritos por Napier-Munn (1996) e apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Critério para avaliação da qualidade de operação de ciclones.

Partição de Água para o Underflow (%)	Qualidade da Separação
> 50	Muito pobre
50 – 40	Pobre
40 – 30	Razoável
30 – 20	Boa
20 – 10	Muito boa (sujeita a operação em cordão)
< 10	Raramente alcançada

Fonte: Adaptada de Napier-Munn (1996)

A obtenção direta das partições globais de massa e água é uma característica favorável ao modelo de Nageswararao, que explicita as relações específicas para o cálculo desses parâmetros (R_f e R_v), conforme apresentado anteriormente.

3.5 MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO

Simulação é a previsão da operação de um equipamento ou circuito em regime estacionário (*steady state*). Nos circuitos de cominuição, o desempenho se traduz nas propriedades dos fluxos - como vazão de sólidos, porcentagem de sólidos e distribuição granulométrica - em função das propriedades do minério, das características dos equipamentos e das condições operacionais.

Os exercícios de simulação, que possibilitam a exploração de diversos cenários, são eficientes para avaliar o desempenho dos circuitos de cominuição com rapidez e eficácia, evitando a necessidade de realizar ensaios complexos e dispendiosos.

Mas, para garantir a eficiência dos exercícios de simulação, é necessário percorrer algumas etapas. A partir de dados experimentais obtidos em amostragens ou em ensaios de caracterização, modelos matemáticos são calibrados. Através da caracterização de amostras obtidas na usina são determinadas, em laboratório, as propriedades do minério.

Uma vez calibrados, os modelos podem ser empregados em exercícios de simulação. Quando estabelecida uma condição otimizada, procede-se a sua implementação. Após a

implementação de tais condições, o circuito deve ser acompanhado por amostragens, para validar as conclusões dos modelos matemáticos. A Figura 3.10 mostra um fluxograma típico de trabalhos realizados em circuitos de moagem.

Fonte: Adaptado de Delboni Jr. (2007)

Figura 3.10. Fluxograma de trabalhos realizados em exercícios de simulação.

3.5.1 AMOSTRAGEM

Amostragem é o conjunto de operações destinadas à obtenção de amostras representativas de uma dada população, ou seja, amostras com variância suficientemente pequenas (precisas) e não-enviesadas (exatas). Uma vez que o estado de operação de um

circuito de cominuição é determinado pelos diferentes fluxos que o compõem, as características desses fluxos devem ser examinadas. Para tanto, faz-se necessário tomar frações - denominadas amostras - de cada um desses fluxos. A boa representatividade do fluxo que se pretende descrever deve direcionar a forma de tomada e tratamento da amostra.

A amostragem pode ser probabilística ou não. Na amostragem probabilística, os procedimentos são realizados de forma a que todas as partículas que compõem o fluxo tenham a mesma probabilidade de integrar a amostra. Essa técnica compreende dois processos: obtenção da amostra por incrementos e quarteamento.

Os incrementos de massa definida são tomados de forma pontual e posteriormente reunidos para compor uma amostra representativa que, por sua vez, é dividida em frações denominadas subamostras, que possuem a massa requerida para uma determinada análise.

Assim, o erro total é composto tanto pelos erros provenientes da amostragem propriamente dita quanto pela preparação de subamostras. A Tabela 3.2 apresenta a descrição desses erros.

O erro fundamental é inevitável e sempre estará presente, mas os demais erros podem ser controlados pela boa prática operacional, tornando-se pouco relevantes quando comparados ao erro fundamental (GY, 1976).

Tabela 3.2. Erros que contribuem com o erro total de amostragem.

Erro		Símbolo	Fonte
Amostragem	Preparação		
de ponderação		E_{a_1}	não uniformidade da densidade ou da vazão do material
de integração		E_{a_2}	heterogeneidade de distribuição do material
de periodicidade		E_{a_3}	variações periódicas da qualidade do material
fundamental		E_{a_4}	heterogeneidade de constituição do material
de segregação		E_{a_5}	heterogeneidade de distribuição localizada de material
de delimitação		E_{a_6}	configuração incorreta da delimitação da dimensão dos incrementos
de operação		E_{a_7}	operação incorreta na tomada dos incrementos
	de perda	E_{p_1}	perda de partículas pertencentes à amostra
	de contaminação	E_{p_2}	contaminação da amostra por materiais estranhos
	de alteração	E_{p_3}	alteração do parâmetro de interesse a ser medido na amostra final
	de propagação	E_{p_4}	cálculo de certos parâmetros a partir de dados primários
	não intencional do operador	E_{p_5}	decorrente da falta de capacitação do operador
	intencional do operador	E_{p_6}	decorrente da imperícia do operador
Total da amostragem		E_t	soma dos erros de amostragem e preparação

Fonte: Adaptada de Naschenveng (2003)

3.5.2 TÉCNICAS DE AMOSTRAGEM

A técnica de amostragem manual é a mais utilizada em circuitos de moagem, até porque geralmente os amostradores automáticos estão localizados em pontos isolados do circuito. Assim, na amostragem completa de um circuito de moagem, a amostragem manual é empregada em combinação com a amostragem automática, quando presente.

Já a coleta por incrementos é a principal técnica de amostragem utilizada em circuitos de moagem que se encontrem em regime estacionário.

As duas técnicas descritas são aplicadas tanto na amostragem de fluxos de polpa como na amostragem de transportadores de correia. O instrumento utilizado nessas coletas deve permitir o corte da seção transversal completa do fluxo que se deseja coletar, e o tamanho da abertura da recipiente que receberá o fluxo deve ter, no mínimo, três vezes o tamanho da maior partícula da amostra (NAPIER-MUNN, 1996). Além disso, para garantir a representatividade da amostra coletada, o recipiente deve cortar o fluxo transversalmente por completo sob velocidade constante.

3.5.2.1 TRANSPORTADORES DE CORREIA

A coleta por incrementos é preferencialmente realizada no final da correia, sempre que o acesso a tais pontos seja possível.

Se a amostragem for impraticável no final da correia, existe a alternativa de se coletar a amostra sobre a correia. Esse procedimento, que requer a interrupção do movimento da correia e a utilização de um gabarito constituído por placas que definem o material a ser coletado, apresenta desvantagens, a saber: (1) é uma operação demorada, (2) interrompe a produção temporariamente e (3) envolve aspectos relativos à segurança.

3.5.2.2 POLPAS

À semelhança do que ocorre com os transportadores de correia, a amostragem de fluxos de polpa também é realizada por incrementos. Porém, a coleta deve ser realizada de maneira mais cuidadosa evitando transbordamento do recipiente, uma vez que as partículas finas são mais facilmente carregadas para fora.

A forma do amostrador pode variar de acordo com o tamanho das partículas sólidas presentes no fluxo. Napier-Munn (1996) sugere a adoção de amostradores específicos para materiais finos e para materiais grossos. A Figura 3.11 é o esboço de um cortador de fluxo de polpa contendo partículas predominantemente finas.

Fonte: Bergerman (mensagem pessoal)²

Figura 3.11. Cortador de fluxo de polpa.

3.5.3 BALANÇO DE MASSA

Após a obtenção de dados experimentais através de uma amostragem de um circuito industrial, é necessário conduzir o balanço de massas dos diversos fluxos da operação. O conceito de balanço de massas está baseado no princípio de conservação da massa ao longo do circuito de processamento mineral.

Como anteriormente comentado, amostras apresentam erros de diversas naturezas. Assim, a aplicação de técnicas de ajuste é focada na obtenção de um conjunto de dados consistentes, sejam esses dados de vazões, de distribuições granulométricas e/ou de teores dos diferentes fluxos.

Em geral são atribuídos desvios aos dados experimentais, que devem refletir a experiência do usuário o conhecimento dos procedimentos adotados na amostragem. A condução do balanço consiste em calcular valores consistentes mais próximos dos valores experimentais, dentro da faixa de desvio atribuída.

² BERGERMAN, M. G. **Croqui do amostrador de polpas.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por <bianca.foggiatto@poli.usp.br> em 21 out. 2007.

3.5.4 CALIBRAÇÃO DE MODELOS E SIMULAÇÃO

A calibração - ou ajuste dos dados ao modelo - é uma etapa muito importante, pois influencia diretamente a qualidade e a coerência dos resultados das simulações. O ajuste de modelos é facilitado quando os dados experimentais utilizados são consistentes.

A calibração consiste na estimativa dos parâmetros dos modelos a partir dos dados de operação do equipamento, que incluem os dados experimentais balanceados, as dimensões do equipamento e variáveis operacionais, estas últimas registradas durante a amostragem.

A qualidade dos dados experimentais e sua influência sobre os trabalhos de simulação fazem com que a prática de refinamento dos dados seja constante. Segundo Delboni Jr. (1989), a estratégia de diminuir o desvio atribuído ao ajuste do modelo a qualquer custo pode conduzir a erros grosseiros, que posteriormente são transferidos para as simulações. Para uma boa calibração é necessário conhecer as restrições e limitações do modelo matemático em aplicação, bem como os valores típicos das constantes presentes nas equações (NASCHENVENG, 2003).

Para obter parâmetros que permitam ao modelo o melhor representar os dados experimentais, o ajuste deve ser realizado de maneira a minimizar a soma das diferenças entre os dados experimentais e os dados calculados no balanço de massa.

Uma vez calibrados os modelos, o circuito está preparado para os exercícios de simulação. Esse cenário é considerado o Caso Base (CB), e representa a operação do circuito durante a amostragem. O CB pode ser considerado o ponto de referência e utilizado para observar mudanças nos produtos simulados.

3.6 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A caracterização tecnológica tem por objetivo estimar índices físicos, químicos ou físico-químicos de amostras de minério. Tais índices são selecionados em função de seu objetivo, como por exemplo, prospecção e pesquisa mineral, beneficiamento ou comercialização. Nesta seção são descritas as técnicas de caracterização tecnológica de minérios, com enfoque na fragmentação.

O conhecimento da forma como determinado material se fragmenta é preponderante na área de cominuição. Assim, as características de resistência à fragmentação de rochas e partículas vêm sendo amplamente estudadas.

Propriedade de complexa definição é a resistência à fragmentação, e uma das formas mais frequentes de avaliá-la é através da determinação da distribuição granulométrica do produto resultante da aplicação de um determinado mecanismo de quebra sobre partículas de um determinado tamanho.

Existem diversos ensaios desenvolvidos para caracterizar a fragmentação, que compreendem tanto ensaios que utilizam mecanismos isolados (compressão, impacto e abrasão), quanto aqueles que empregam uma combinação desses mecanismos de fragmentação. O *Drop Weight Test* e o ensaio de tamboramento, pertencem ao primeiro grupo, enquanto que o ensaio de Bond, pertence a este último grupo. Tais ensaios são detalhados nas próximas subseções.

3.6.1 ENSAIO DE MOABILIDADE DE BOND

Através do ensaio de moabilidade desenvolvido para reproduzir um circuito de moagem em equilíbrio, Bond (1952) propôs um método para determinar a energia requerida para um processo de cominuição. Esse método foi padronizado e, no Brasil, a norma utilizada é a MB-3253 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1990).

De acordo com a “Terceira Lei da Cominuição”, a energia consumida na cominuição de F_{80} até P_{80} é proporcional à diferença entre a energia necessária para reduzir um material de tamanho F_{80} teoricamente infinito e a energia necessária para reduzir este mesmo material de tamanho P_{80} (CHAVES, 2001). A expressão utilizada por Bond para calcular a energia aplicada foi:

$$W = WI \left[\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right]$$

onde:

W é a energia aplicada (kWh/st);

WI é o *Work Index* (kWh/st);

P_{80} e F_{80} são os tamanhos, em micrômetros, em que passam 80% da massa do produto e da alimentação do circuito, respectivamente.

O *Work Index* (WI) é a constante do material que representa a resistência à fragmentação. Numericamente, é a energia necessária para cominuir um material de tamanho infinito a um P_{80} de 100 micrômetros.

Bond ainda considerou a seguinte equação para potência consumida:

$$P = T W$$

onde:

P é a potência consumida (kW);

T é a vazão de sólidos de alimentação do circuito (t/h).

A potência de moagem calculada com o WI obtido a partir do ensaio de moabilidade de Bond aplica-se bem a diversas condições de moagem em moinhos de bolas e barras, mas pode gerar discrepâncias se as condições de operação forem distintas daquelas empregadas nos ensaios de laboratório. Bond desenvolveu fatores de correção para sanar essas discrepâncias, que foram posteriormente revisados por Rowland Jr. (1969, apud CHAVES, 2006). Os fatores propostos por estes autores são:

- EF_1 - moagem a seco;
- EF_2 – circuito aberto;
- EF_3 – diâmetro do moinho;
- EF_4 - alimentação com excesso de grossos;
- EF_5 – alimentação com excesso de finos;
- EF_6 e EF_7 - relação de redução para moinhos de barras e bolas, respectivamente.

O método de Bond permite comparar a moabilidade de diferentes tipos de minérios e também pode ser empregado para avaliar o consumo de energia. Para tanto, uma comparação dos diversos WI operacionais obtidos através de dados de campo e à aplicação da equação de Bond deve ser realizada. Isso permite, segundo Rowland Jr. (1998), uma avaliação direta da eficiência da moagem. O WI operacional (WI-O) é válido somente para as

condições padronizadas por Bond e também deve ser corrigido. Rowland Jr. (1998) propôs fatores de eficiência para a correção do WI-O:

- Diâmetro do moinho: fator aplicado a moinhos com diâmetros menores que 12,5 pés, segundo a equação que segue:

$$EF_1 = \left(\frac{8}{D}\right)^{0.2}$$

Caso o diâmetro seja superior a 12,5 pés, então o valor de EF1 é de 0,914.

- Granulometria da alimentação: fator aplicado a granulometrias mais grossas que aquela estabelecida como padrão. A equação para o cálculo de EF2 é a seguinte:

$$EF_2 = \frac{Rr + (Wi - 7) \times \left(\frac{F - Fo}{Fo}\right)}{Rr}$$

onde:

$$Fo = 4000 \sqrt{\frac{13}{Wi}};$$

$$Rr = \frac{F_{80}}{P_{80}} \text{ (relação de redução);}$$

WI é determinado em laboratório (kWh/st).

3.6.1.1 PROCEDIMENTO DO ENSAIO EM MOINHOS DE BOLAS

O ensaio de moabilidade de Bond (ABNT, 1990) é conduzido a seco em circuito fechado com peneiramento - que simula as condições de recirculação de um circuito industrial -, até que o equilíbrio seja estabelecido.

O moinho de Bond apresenta comprimento e diâmetro internos de 12 polegadas e carcaça interna sem *lifters*. Opera a 70 rpm e é equipado com um contador de revoluções (Figura 3.12). A carga moedora é constituída de 285 bolas de aço com massa total de 20,125 kg e distribuição de tamanhos pré-definida, relacionada na Tabela 3.3.

Figura 3.12. Moinho de Bond da Escola Politécnica.

Tabela 3.3. Distribuição de tamanhos das bolas da carga moedora.

Número de bolas	Tamanho (mm)
43	36,5
67	30,6
10	25,4
71	19,0
94	15,9

Fonte: ABNT (1990)

O minério é preparado por britagem estagiada, de forma a que todo o material seja passante na peneira 3,35 mm. O material a ser alimentado deve apresentar um volume de 700 cm³, carga esta que deve ser mantida durante o ensaio. Assim, a cada ciclo o produto obtido retido na malha do teste (x_t) deve ser devolvido ao moinho juntamente com a fração de alimentação nova, de forma a completar a massa inicial.

A massa de produto por revolução do moinho é calculada a cada ciclo e utilizada para calcular o número de revoluções do próximo ciclo, equivalente a uma carga circulante de 250%. O processo continua até que tal índice entre na condição estipulada como de equilíbrio. A média dos últimos três valores da moabilidade (g_b) é utilizada para obter o *Work Index*, conforme a relação apresentada.

$$WI = \frac{44,5}{x_t^{0,23} g_b^{0,82} \left[\frac{10}{\sqrt{x_2}} - \frac{10}{\sqrt{x_1}} \right]}$$

onde:

x_1 e x_2 são o tamanho das partículas, em micrômetros, em que passam 80% da alimentação e do produto, respectivamente;

x_t é a malha do teste, em micrômetros;

g_b é a média dos últimos três valores do índice, em gramas por revolução.

Embora amplamente utilizado no dimensionamento de moinhos, o WI apresenta algumas incertezas, que podem levar a desvios da potência requerida, pois não considera variáveis como carga circulante, eficiência da classificação, variação do tempo de residência, dimensões dos *lifters* e reologia da polpa, bem como distribuições granulométricas completas e grau de enchimento do moinho. Além disso, assume-se que a energia específica não é função da carga de bolas e não são considerados os diferentes regimes de movimentação da carga e seus efeitos na fragmentação (CHAVES, 2006).

3.6.2 DROP WEIGHT TEST – DWT

Com o objetivo de desvincular as características do material e aquelas relativas ao equipamento, o *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre* (JKMRC) desenvolveu ensaios específicos para a determinação da taxa de quebra de partículas. Criado e desenvolvido pela equipe técnica do JKRC na Austrália, os resultados desse método têm sido amplamente empregados no dimensionamento e/ou otimização de circuitos industriais de cominuição. O ensaio padrão desenvolvido pelo JKRC é executado no equipamento denominado *Drop Weight Tester* (DWT). A Figura 3.13, apresenta o DWT do LSC-EPUSP.

Figura 3.13. *Drop Weight Tester* do LSC-EPUSP.

3.6.2.1 PROCEDIMENTO DO ENSAIO DE DWT

De acordo com o procedimento padrão do ensaio de DWT, os fragmentos são inicialmente classificados em cada uma das cinco faixas granulométricas que seguem: 63,0 x 53,0 mm; 45,0 x 37,5 mm; 31,5 x 26,5 mm; 22,4 x 19,0 mm e 16,0 x 13,2 mm.

Assim, são preparados três lotes compostos de 30 fragmentos cada, para cada faixa de tamanho estipulada. A partir da massa de cada lote, as alturas de queda da carga para cada conjunto tamanho/energia podem ser calculadas (CHIEREGATI, 2001). Os fragmentos são submetidos a impactos com energia específica entre 0,25 e 2,5 kWh/t, de maneira individual e separadamente.

Ao final da fragmentação de cada lote, o material é reunido e submetido à análise granulométrica por peneiramento. Através da distribuição granulométrica é obtido o parâmetro t_{10} , que corresponde à porcentagem passante na malha igual a 10% do tamanho original do fragmento.

A relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante para as diferentes faixas granulométricas é parametrizada da seguinte forma:

$$t_{10} = A (1 - e^{-bE_{cs}})$$

onde:

E_{cs} é a energia específica aplicada ao fragmento de minério (kWh/t);

A e b são parâmetros característicos da resistência à quebra do minério.

O fenômeno de fragmentação é convenientemente descrito por uma curva logarítmica de rápido crescimento inicial - determinado pelo parâmetro b -, tendendo posteriormente a um comportamento assintótico - determinado pelo parâmetro A -, conforme mostra a Figura 3.14.

Figura 3.14. Representação da relação energia/fragmentação.

Os parâmetros A e b são característicos da amostra ensaiada e a fragmentação é crescente conforme o aumento da energia específica aplicada à partícula, até que um limite superior seja atingido. Esses parâmetros têm mesmo efeito para representar a resistência de amostras submetidas a ensaios, razão pela qual o produto de ambos é representado por um único índice de resistência da amostra. O parâmetro assim obtido é o Índice de Quebra – IQ (produto de A por b), a partir do qual é possível realizar uma análise comparativa entre minérios, conforme mostra a Tabela 3.4, criada por Delboni Jr. (mensagem pessoal)³.

³ DELBONI JR., H. **Tabelas de classificação de resistência ao impacto e à abrasão**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <bianca.foggiatto@poli.usp.br> em 8 jan. 2008.

Tabela 3.4. Classificação de resistência ao impacto de amostras conforme o Índice de Quebra.

Intervalo de Valores do Parâmetro Índice de Quebra		Resistência ao Impacto
Menor	Maior	
0	9,9	Excepcionalmente Alta
10	19,9	Extremamente Alta
20	29,9	Muito Alta
30	39,9	Alta
40	49,9	Moderadamente Alta
50	59,9	Média
60	69,9	Moderadamente Baixa
70	89,9	Baixa
90	109,9	Muito Baixa
> 110		Extremamente Baixa

3.6.2.2 ENSAIO DE DWT SIMPLIFICADO

Algumas amostras apresentam limitações de massa e tamanho de fragmentos, o que impede a realização do ensaio em todas as faixas granulométricas. Para estimar as características de fragmentação de tais amostras foi desenvolvido o método denominado Ensaio Sintético de Impacto ou DWT Simplificado, descrito por Chieregati e Delboni Jr. (2001). De acordo com os autores, se os parâmetros de quebra obtidos forem confrontados com aqueles obtidos em um ensaio completo, é possível estabelecer uma relação entre os parâmetros de quebra obtidos a partir do ensaio sintético e aqueles calculados para o ensaio completo.

3.6.2.3 DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO QUEBRA

O procedimento empregado para determinação da função quebra estabelece que os fragmentos sejam inicialmente classificados em faixas granulométricas pré-determinadas, de acordo com os tamanhos de partícula que alimentam o moinho.

De maneira semelhante àquela apresentada anteriormente, são preparados lotes de partículas que são submetidos a impactos com energia específica entre 0,25 e 2,5 kWh/t. As

partículas de cada lote são submetidas a impacto individual e, ao final, o material é reunido e peneirado. Através da distribuição granulométrica são calculados os parâmetros t_n , que correspondem à porcentagem passante na malha igual a $n\%$ do tamanho original do fragmento.

A relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante para as diferentes faixas granulométricas é, neste caso, parametrizada da seguinte forma:

$$t_{10} = A + b \cdot \ln(Ecs)$$

Os parâmetros A e b são característicos da amostra ensaiada e a fragmentação é crescente conforme o aumento da energia específica aplicada à partícula, até que um limite superior seja atingido. Assim, em função dos parâmetros A e b é possível calcular o t_{10} para uma energia média de 2,1475 kWh/t, denominado pela autora de t_{10}^* . Esse índice permite realizar uma análise comparativa entre os tipos de minérios e ainda determinar a função quebra.

A partir do valor de t_{10}^* , a função quebra pode ser graficamente determinada por meio do gráfico desenvolvido por Narayanan (1985), apresentado na Figura 3.15.

Fonte: Adaptado de Narayanan (1985)

Figura 3.15. Curvas t_n (% passante) x t_{10} .

A família de curvas apresentada na Figura 3.14 representa diversos tipos de minérios e permite prever a distribuição granulométrica resultante (t_n) para um determinado nível de fragmentação conhecido (t_{10}^*).

3.6.2.4 ENSAIO DE TAMBORAMENTO

De acordo com o método desenvolvido pelo JKMRC, a resistência da amostra à fragmentação por abrasão é avaliada através do ensaio de tamboramento, que é realizado em condições padronizadas: 3 kg de amostra de fragmentos com tamanho entre 55,0 e 37,5 mm são submetidos a 10 minutos de tamboramento em moinho de diâmetro e comprimento de 12 polegadas, sob rotação de 58 rpm.

Ao final do ensaio, o produto tamborado é peneirado e o valor de t_{10} determinado. O assim denominado índice de abrasão, t_a , é numericamente igual a 10% do valor do t_{10} obtido.

A resistência da amostra à fragmentação por abrasão é inversamente proporcional ao valor de t_a . A Tabela 3.5, também criada por Delboni Jr. (mensagem pessoal)⁴, apresenta a classificação de amostras, em termos de resistência à abrasão.

Tabela 3.5. Classificação de resistência à abrasão de amostras conforme t_a .

Intervalo de Valores do Parâmetro t_a		Resistência à Abrasão
Menor	Maior	
0,00	0,19	Extremamente Alta
0,20	0,39	Muito Alta
0,40	0,59	Alta
0,60	0,79	Moderadamente Alta
0,80	0,99	Média
1,00	1,19	Moderadamente Baixa
1,20	1,39	Baixa
1,40	1,69	Muito Baixa
1,70	2,09	Extremamente Baixa
> 2,10		Excepcionalmente Baixa

⁴ DELBONI JR., H. **Tabelas de classificação de resistência ao impacto e à abrasão**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <bianca.foggiatto@poli.usp.br> em 8 jan. 2008.

3.6.2.5 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO

Ainda segundo o método proposto pelo JKRCM, para determinação do peso específico são preparados lotes compostos por 100 fragmentos na fração granulométrica entre 6,70 e 4,75 mm. Esses fragmentos são divididos aleatoriamente em grupos de 30 fragmentos, que são então pesados a seco (m_{seca}) e posteriormente pesados submersos (m_{sub}) em água. A partir desses dois valores é possível obter o peso específico do material (ρ), utilizando a seguinte relação:

$$\rho = \frac{m_{seca}}{(m_{seca} - m_{sub})}$$

4 MINÉRIO DE FERRO

Este capítulo apresenta uma breve descrição dos minerais de ferro e dos tipos litológicos de minério de ferro, bem como as principais rotas de beneficiamento de minérios de ferro e os principais produtos gerados por tais rotas de beneficiamento.

4.1 MINERAIS DE FERRO

O ferro é um dos elementos mais abundantes na Terra e é componente de aproximadamente 300 minerais. Os principais minerais de ferro são a hematita e a magnetita, que ocorrem em conjunto com outros minerais oxidados de ferro, secundários, chamados genericamente de limonitas. As limonitas são formadas pela alteração e hidratação das variedades primárias (DANA, 1986). Um exemplo de limonita é a goethita.

A hematita, óxido férrico (Fe_2O_3) que contém 70% de ferro e usualmente ocorre em cristais tabulares, é a variedade mineral que predomina em formações ferríferas de minérios como os brasileiros e australianos. Pode ocorrer em rochas de todas as idades, em depósitos metamórficos, como mineral acessório em rochas ígneas e também em rochas silícicas. Apresenta-se desde a variedade especular e dura até o tipo terroso e mole.

A magnetita (Fe_3O_4), mineral com forte brilho metálico que se apresenta na forma maciça granular, é fortemente magnética e é composta por 72,4% de ferro. É um mineral de ferro comum, frequentemente encontrado na forma de mineral acessório em rochas ígneas. No Brasil, existem depósitos de magnetita associados a rochas metamórficas, muitas vezes ricos em materiais ferro-magnesianos. Quando sofre alteração devido à ação do intemperismo, é denominada martita.

A goethita ($FeO(OH)$) é um mineral que geralmente apresenta textura porosa e forma achatada. É um dos minerais mais comuns, pois sua formação típica ocorre em condições de oxidação, como produto do intemperismo dos minerais portadores de ferro. Também pode se formar como precipitado contido na água, condição em que é amplamente disseminada.

4.2 PRINCIPAIS TIPOS DE MINÉRIOS

Os depósitos de minério de ferro são formados em todos os ambientes geológicos: ígneos, sedimentares e metamórficos. Os mais importantes são aqueles de origem sedimentar e metamórfica, com enriquecimento em ferro a partir de protominérios formados por precipitação química em ambiente aquoso.

Os protominérios de ferro são os itabiritos e os jaspilitos. Os itabiritos são de origem sedimentar-metamórfica e contêm óxidos de ferro - geralmente predomina a hematita - e quartzo. Já os jaspilitos são de origem sedimentar e contêm óxidos de ferro e sílica amorfa. As unidades litológicas que contêm os itabiritos ou jaspilitos são denominadas formações ferríferas bandadas (*Banded Iron Formations* - BIF) (WALDE, 1986).

Existem também depósitos relacionados à cristalização de rochas ígneas, originados pela atividade hidrotermal, e depósitos resultantes da alteração da superfície por oxidação ou lixiviação.

Segundo Damasceno (2006), os minérios de ferro são classificados em duas categorias: os de baixo teor (35 a 40% de ferro) e os de alto teor (teores de ferro superiores a 60%). Os minérios de baixo teor são lavrados principalmente na Rússia, na China, no Canadá e nos Estados Unidos da América (EUA). Os minérios que ocorrem na região dos Grandes Lagos (EUA e Canadá), conhecidos como taconitos, têm grande importância técnica: a tecnologia de aglomeração de finos foi desenvolvida para viabilizar a sua exploração.

Já os depósitos de alto teor ocorrem principalmente no Brasil e na Austrália, e em menor escala na Índia, na África do Sul e na Venezuela. Os teores elevados são decorrentes, em grande parte, do enriquecimento supergênico promovido pelo intemperismo e pela laterização e lixiviação da sílica contida no itabirito ou jaspilito (DAMASCENO, 2006). O intemperismo também contribui para o estabelecimento da granulação natural muito fina, que facilita as operações de desmonte.

Os minérios de ferro também podem ser classificados, de acordo com sua mineralogia, como: hematíticos, magnetíticos, ilmeníticos e limoníticos, entre outros. A maioria dos minérios brasileiros são hematíticos com elevados teores de ferro, razão pela qual são considerados os minérios de melhor qualidade do mundo (DAMASCENO, 2006; MOURÃO; GENTILE, 2007).

No Brasil, são observados minérios hematíticos compactos e friáveis e itabiritos geralmente friáveis. Os principais minerais de ferro são hematita, goethita, magnetita e martita, enquanto que os principais minerais de ganga são quartzo, caulinita, gibsitita e outros silicatos portadores de alumina.

4.3 ROTAS DE BENEFICIAMENTO

Os processos de beneficiamento de minério de ferro visam adequar a granulometria e os teores de impurezas de seus produtos para a indústria siderúrgica. Basicamente, os processos envolvidos são: cominuição, separação granulométrica (peneiramento e classificação), concentração (flotação, separação magnética e gravítica), separação sólido-líquido (espessamento e filtração) e, adicionalmente, aglomeração (sinterização e pelletização).

Apesar de haver diversas combinações desses processos e tipos de equipamento, é possível observar algumas práticas e circuitos industriais típicos do minério de ferro. Viana (2007) afirma que a rota de beneficiamento de minério de ferro é definida por dois fatores de grande importância, quais sejam, a composição mineralógica do minério e as especificações dos produtos no mercado.

A fragmentação cumpre um papel fundamental no desempenho do circuito, razão pela qual as variações na resistência à quebra dos minérios são conhecidas e monitoradas nos processos de britagem e moagem. O circuito de moagem é particularmente importante, pois pode levar a perdas significativas se ocorrer gerações exageradas de finos, os quais não são aproveitados posteriormente.

Os circuitos típicos de cominuição de minério de ferro podem empregar diferentes combinações e tipos de equipamento, como por exemplo:

- Britagem multiestagiada seguida por moagem de bolas;
- Britagem primária seguida por moagem semiautógena (SAG) e moagem de bolas;
- Moagem SAG de ROM e moagem de bolas; e
- Britagem primária seguida por rolos de alta pressão (HPGR).

A rota de britagem multiestagiada seguida por moagem é a mais tradicional. Os moinhos são na sua maioria de bolas, apesar de a moagem de barras em minérios de ferro já ter apresentado uma aplicação mais específica para produção de *sinter feed*. Contudo, as inovações tecnológicas direcionadas ao setor mineral tornaram os moinhos de barras obsoletos. Um exemplo de instalação que utilizou moagem de barras é Carajás, mas esse moinho está fora de operação.

A moagem semiautógena de minério de ferro foi pioneira no emprego de tais equipamentos em circuitos de cominuição. Em 1959, a *Canadian Iron* (METSO MINERALS, 2008) instalou o primeiro moinho SAG na região dos Grandes Lagos, e atualmente existem moinhos SAG operando com taconitos nos EUA e no Canadá. O Brasil não tem instalações que empreguem moinhos SAG para minério de ferro.

Por outro lado, a utilização de rolos de alta pressão (*High Pressure Grinding Rolls* – HPGR), principalmente no que diz respeito à produção de *pellet feed*, já está bem estabelecida. No Brasil, a HPGR é utilizada pela Samarco, em Ponta Ubú (ES), e nas instalações da Vale, em Vitória (ES) e em São Luís (MA).

Até a Segunda Grande Guerra Mundial a indústria siderúrgica não estava preparada para processar minérios finos. A necessidade de suprimento das siderúrgicas norte-americanas levou à busca de rotas que pudessem propiciar o aproveitamento dos minérios existentes naquela região, de baixo teor e granulação fina. Para Mourão e Gentile (2007), a aglomeração de finos por sinterização e pelotização, solução encontrada pelo *United States Bureau of Mines* (USBM), foi uma das mais importantes inovações tecnológicas no setor siderúrgico.

A progressiva diminuição dos teores de minérios tem levado a uma combinação de métodos de concentração para adequar o teor de ferro e de impurezas dos produtos obtidos. A seleção do circuito de concentração depende, fundamentalmente, das características do minério, como grau de liberação, susceptibilidade magnética, densidade e propriedades de superfície dos minerais. Apesar de os métodos magnéticos e densitários apresentarem vasta aplicação, a participação da flotação na produção de minério de ferro tem ampliado graças à alta seletividade relativa e à aplicação em ampla faixa de teores e tamanhos (comumente menores que 0,150 mm).

No Brasil, a produção de minério de ferro em grande escala está concentrada em duas regiões, a Província Mineral de Carajás no Pará e o Quadrilátero Ferrífero em Minas

Gerais, e, em menor escala, no Mato Grosso e na Bahia. Carajás não emprega etapas de concentração, mas as usinas brasileiras, em sua maioria, empregam concentração magnética, gravítica e/ou flotação. A Tabela 4.1 relaciona os métodos de concentração e os tipos de equipamentos utilizados em minérios brasileiros.

Tabela 4.1. Métodos de concentração/tipos de equipamentos.

Método de concentração	Tipos de equipamentos
Magnética	Separador magnético de alta intensidade
	Separador magnético de média intensidade
Gravítica	Jigagem
	Espirais
Flotação	Flotação catiônica reversa em célula mecânica e em coluna

Fonte: Adaptada de Viana (2007)

4.4 ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTOS

Em minérios de ferro, a caracterização é realizada para determinar a granulometria e a composição química dos produtos passíveis de serem obtidas, visando sua utilização na indústria siderúrgica.

Em geral, os teores de ferro, sílica, alumina, enxofre, fósforo e manganês são controlados dentro de limites que variam para cada empresa. É desejável o maior teor de ferro e o menor teor de impurezas, uma vez que estas últimas podem afetar negativamente a qualidade do aço produzido e sua eliminação no processo de redução implica em altos custos (TAKANO, 2007).

As especificações de granulometria também resultam em limitações, pois influenciam acentuadamente a produtividade dos processos subsequentes. Os produtos típicos de minério de ferro classificados segundo a granulometria são explicitados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Classificação típicas dos produtos de minério de ferro.

Produto	Granulometria
Granulados (<i>Lump ore</i>)	-50 + 6 mm
Pellet ore	- 15 + 9 mm
<i>Sinter feed</i>	- 8 + 0,15 mm
<i>Pellet feed</i>	- 0,15 mm

OBS: As faixas granulométricas variam de acordo com as especificações de cada empresa, e os valores citados são tipicamente observados na indústria.

Os produtos granulados apresentam limitações quanto ao percentual de material fino, pois esse tipo de partículas pode impedir a passagem do ar soprado para dentro do alto-forno e prejudicar o processo de redução. Já os produtos finos (*sinter e pellet feed*) requerem distribuições granulométricas bem definidas, uma vez que a eficiência dos processos de sinterização e de pelotização é controlada pela presença de partículas aderentes e nucleantes.

4.4.1 A IMPORTÂNCIA DA ÁREA ESPECÍFICA

A área específica média das partículas que compõem o minério de ferro é uma variável de controle importante na produção de *pellet feed*, pois exerce grande influência sobre a eficiência dos processos subsequentes à moagem:

- *Pellet feeds* com área específica maior que 2200 g/cm² apresentam menor produtividade na filtragem que antecede a etapa de pelotização (DONDA, 1998);
- Quanto maior for a área específica, maior é a energia superficial da população de partículas, o que favorece o processo de pelotização (SCHNEIDER; NEUMANN, 2002).

A área específica é gerada pela cominuição do minério de ferro e, por consequência, afeta o custo de produção de *pellet feed* de maneira expressiva. Assim, a relação custo/benefício ótima pode ser associada a um valor mínimo de área específica, suficiente para que o processo de pelotização seja eficiente.

5 CIRCUITO DE MOAGEM DO MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS

O depósito de minério de ferro da Serra dos Carajás é de grande importância no cenário mundial, tanto em volume de reservas como em produção de minério. Em Carajás são operadas duas minas - N4 e N5 - constituídas por diversas frentes de lavra (por exemplo, N4WN, N4W Central, N4E, N5W, N5E e N5S), que podem alimentar simultaneamente a única usina em operação, totalizando uma produção de aproximadamente 100 MTPA de minério em 2007. Projetos para aumentar a capacidade da usina já estão em andamento, e em 2009 a capacidade deverá atingir 130 MTPA.

A usina se divide basicamente em três etapas: britagem/peneiramento, ciclonagem e moagem/classificação. Cada etapa se destina à produção de um tipo de produto (COMPANHIA VALE DO RIO DOCE - CVRD, 2002):

- Britagem/peneiramento: produção de *granulado* e *sinter feed*;
- Ciclonagem: produção de *pellet feed* natural; e
- Moagem/classificação: produção de *pellet feed* moído.

As características geológicas do depósito mineral e do circuito de moagem de Carajás são descritas a seguir.

5.1 GEOLOGIA

As minas de Carajás são parte da formação de mesmo nome localizada região norte do Brasil, no estado do Pará. O minério explotado é hematítico de alto teor, resultante de processos de enriquecimento supergênico do protominério jaspilítico, com a lixiviação da sílica e a concentração dos óxidos de ferro. As formações ferríferas são compostas alternadamente por sílica e ferro, com espessura média de 250 metros.

A caracterização dos tipos de minério proposta por Rezende e Barbosa (apud COELHO, 1986) é a que segue:

- Hematita: todos os minérios ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro;
- Itabirito: protominério;

- Ganga: material superficial com elevados teores fósforo.

Segundo Coelho (1986), o primeiro critério de classificação dos minérios foi o grau de friabilidade que, por ser muito subjetivo, foi substituído por outro, baseado na granulometria. Assim, três tipos de minério foram determinados (MELO, 1984 apud COELHO, 1986):

- Hematita dura: é o minério que pode gerar predominantemente frações acima de 9,5 mm. Apresenta-se na variedade compacta, constituída essencialmente por especularita. A hematita semidura é uma variedade entre a hematita dura compacta e mole, na qual se observam hematitas finamente bandadas. O bandamento é definido por finos leitos de material compacto, constituído por hematita especular e martita com inclusões de magnetita, alternados com leitos mais friáveis e porosos constituídos por limonitas;
- Hematita mole: é o minério que pode gerar predominantemente frações intermediárias entre 9,5 e 0,25 mm. É o minério mais abundante, essencialmente composto por hematita em palhetas alternadas com outras de martita e, ocasionalmente, de goethita. Também pode apresentar massas significativas de magnetita residual e goethita como inclusão na martita;
- Hematita pulverulenta: é o minério que pode produzir predominantemente frações abaixo de 0,25 mm. Pode ou não se apresentar em estrutura bandada, e é composta exclusivamente por óxidos de ferro.

Os protominérios foram classificados conforme os critérios estabelecidos para a hematita. Já a ganga foi classificada em ganga química, composta predominantemente por limonitas, e ganga de minério, que contém mais de 10% de fragmentos de hematita dura.

5.2 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE CARAJÁS

O texto apresentado a seguir teve como base o “Manual de Operação - Moagem de *pellet feed*” (CVRD, 2002) e informações obtidas pela autora durante os trabalhos realizados na usina de Carajás.

O circuito de moagem de Carajás (Figura 5.1) tem por objetivo a produção de *pellet feed*, que é espessado, desaguado em filtros a vácuo e transportado para a unidade de pelletização em São Luís, MA.

Figura 5.1. Circuito de moagem de Carajás.

O *pellet feed* deve apresentar características granulométricas e de área específica bem definidas (CVRD, 2007):

- 3 – 5% > 0,106 mm;
- 67 – 65% < 0,045 mm;
- 12 – 13% < 0,007 mm;
- Área específica (*Blaine*): 1200 – 1300 cm²/g.

As especificações para os teores de impurezas são listadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Especificações para o teor de impurezas do *pellet feed* de Carajás.

	Limite Inferior	Limite Superior
Fósforo	0,029%	0,051%
Alumina	1,30%	1,90%
Manganês	0,44%	0,86%
Sílica	0,90%	1,50%

O circuito de Carajás é constituído por duas linhas paralelas de moagem em circuito fechado por ciclones, seguidas por uma etapa de deslamagem que foi projetada para produzir 6 MTPA de *pellet feed*. O resumo dos equipamentos presentes no circuito é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Equipamentos do circuito de moagem de Carajás.

Equipamento	Dimensões	Quantidade
Moinho de bolas	20' x 34,5'	2
Ciclones classificadores	26"	16
Ciclones de deslamagem	4"	360

O circuito de moagem foi projetado para produção de *pellet feed* a partir da moagem de minério britado abaixo de 8 mm, ou seja, com granulometria adequada para *sinter feed*.

Na usina de moagem, o minério é alimentado ao circuito através de dois alimentadores de correia a uma vazão nominal de 400 t/h para cada moinho. Na descarga de cada moinho existe um *trommel* para retenção de material mais grosseiro e/ou de corpos moedores quebrados ou desgastados. Esse material é retirado do circuito por meio de um transportador de correia, e empilhado em uma área externa ao prédio.

Em cada linha, a fração passante no *trommel* flui por gravidade para uma caixa de concreto, de onde é bombeada para a etapa de classificação. Essa caixa recebe água, para adequação da densidade da polpa de alimentação da classificação. O circuito opera com cargas circulantes elevadas, em torno de 400%.

A classificação é constituída por duas baterias de 4 ciclones de 26" por linha. O *overflow* da classificação tem por especificação 95% passante em 0,106 mm. Esse fluxo

segue para a caixa de bomba que alimenta o distribuidor central único que alimenta a deslamagem.

A operação de deslamagem é responsável pelo controle da área específica do *pellet feed*. A instalação inclui 360 ciclones, dispostos em baterias com 10 unidades cada, que operam com pressões na faixa 2,5 a 3,0 kg/cm². A fração de finos da etapa de deslamagem é descartada e encaminhada para a barragem de rejeitos e o *underflow* segue para etapas subsequentes de desaguamento e filtragem.

A Figura 5.2 apresenta o fluxograma simplificado do atual processo de moagem, classificação e deslamagem objeto deste estudo.

Figura 5.2. Fluxograma do circuito de moagem e deslamagem de Carajás.

A seguir são apresentadas informações sobre os equipamentos, fornecidas pela Vale:

- Moinho de Bolas

Diâmetro interno: 6,1 m

Comprimento: 10,5 m

Grau de enchimento: 35% com bolas

Velocidade de rotação: 76% do valor crítico

Potência do motor: 4250 cv (2 motores para cada moinho)

Diâmetro das bolas de reposição: 60 mm

Peso específico das bolas: 7,8 g/cm³

- Ciclones de Classificação

Diâmetro dos ciclones: 660 mm

Diâmetro dos *apex*: 120 mm

Diâmetro dos *vortex*: 320 mm

- Ciclones de Deslamagem

Diâmetro dos ciclones: 101 mm

Diâmetro dos *apex*: 25 mm

Diâmetro dos *vortex*: 35 mm

6 PREVISÃO DO DESEMPENHO DO CIRCUITO DE MOAGEM

O método desenvolvido teve por objetivo investigar a influência, tanto da granulometria de alimentação como dos tipos de minério, nas características dos produtos obtidos no circuito de moagem de Carajás, de forma a criar um recurso de previsão do desempenho do circuito de moagem. O presente capítulo descreve as etapas de desenvolvimento do método.

6.1 AMOSTRAGENS

Para a obtenção de amostras para a execução de ensaios de caracterização dos tipos de minério e de ensaios de moagem em escala de bancada foram realizadas amostragens nas frentes de lavra das minas de Carajás e, para a calibração de modelos, foram realizadas amostragens no circuito industrial de moagem de Carajás. O processo de coleta de amostras adotado nas amostragens realizadas na mina e na usina de moagem é apresentado separadamente nas próximas subseções.

6.1.1 MINA

As amostragens realizadas nas diferentes frentes de lavra de Carajás foram conduzidas pelo técnico da Vale Ercílio Rangel Almeida e, quando possível, também pela autora. As frentes de lavra que possuíam minério típico de alimentação da moagem foram selecionadas para amostragem, conforme orientação do técnico em geologia Cesário Sales Campos. Tal minério é composto por hematita mole a pulverulenta e está dentro das especificações finais de produtos – estabelecidas de acordo com as especificações dos diferentes clientes - quanto ao teor de impurezas.

Para a coleta das amostras foram delimitadas áreas nos pés das bancadas. As áreas foram igualmente espaçadas, de modo que as amostras representassem toda a área da bancada selecionada. Considerando que o minério do tipo hematita mole presente no pé da bancada é homogêneo devido a sua granulação fina e alta qualidade, coletou-se -

manualmente, com o auxílio de uma pá - uma amostra de cada área selecionada, de maneira a completar amostras de 50 kg por frente de lavra. Se trata de um procedimento adotado pela empresa.

6.1.2 CIRCUITO DE MOAGEM

6.1.2.1 AMOSTRAGENS PARA ENSAIOS DE BANCADA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Para a condução de ensaios de bancada, foram coletadas amostras de alimentação do circuito de moagem. Já para a caracterização e posterior comparação com os produtos obtidos nos ensaios, foram coletadas amostras de *overflow* dos ciclones de classificação. Também foram realizadas amostragens em outros pontos da usina de Carajás para a obtenção de alíquotas de produtos que também são tipicamente utilizados para alimentar o circuito de moagem, quais sejam *sinter feed* e produto granulado.

6.1.2.2 AMOSTRAGENS PARA MODELAGEM DO CIRCUITO DE MOAGEM

Juntamente com os técnicos da Vale Eduardo Wellington Veríssimo de Souza e Ercílio Rangel Almeida, a autora planejou e executou três amostragens completas no circuito de moagem e deslamagem da usina de Carajás.

Em virtude da magnitude das instalações e da necessidade de uma equipe de amostragem, antes da realização de cada amostragem houve um planejamento para definir os pontos de amostragem, bem como o número de pessoas necessárias para a coleta.

No circuito de moagem as amostragens foram realizadas manualmente, mediante o emprego de canecas coletoras e técnica incremental. A coleta de incrementos foi realizada a cada 10 minutos durante o período de 1 hora, e cada amostra foi composta pelos incrementos coletados no período planejado. Essa técnica foi aplicada tanto na amostragem de fluxos de polpa como na amostragem de fluxos de minério em correias transportadoras. A coleta de amostras foi planejada para períodos de uma hora, desde que o circuito de moagem se encontrasse estabilizado, isto é, em regime estacionário. Como a alimentação do

minério é frequentemente interrompida, as principais variáveis de controle do circuito, como vazão de alimentação nova e granulometria do *overflow* da classificação e do *underflow* da deslamagem, podem sofrer oscilações.

Foram selecionados fluxos e pontos de tomada de amostra. Os pontos selecionados são elencados abaixo e ilustrados na Figura 6.1:

- Alimentação nova moinho (linha I e II);
- Produto do moinho (linha I e II);
- Alimentação da classificação (linha I e II);
- *Underflow* da classificação (linha I e II);
- *Overflow* da classificação (linha I e II);
- Alimentação da deslamagem;
- *Underflow* da deslamagem;
- *Overflow* da deslamagem.

Figura 6.1. Pontos de amostragem no circuito de moagem e deslamagem de Carajás.

Durante as amostragens, por problemas de ordem prática, não foram coletadas amostras de alguns dos pontos anteriormente listados. Houve dificuldade para realizar coletas em dois fluxos: (1) o fluxo de alimentação da classificação e (2) o fluxo da alimentação da deslamagem. A coleta do fluxo de alimentação da classificação é realizada em mangotes que entopem facilmente durante o período de amostragem enquanto que a

coleta do fluxo da alimentação da deslamagem deve ser feita antes da chegada da polpa ao distribuidor central, em um amostrador localizado na tubulação de saída caixa de *overflow* dos ciclones de classificação, o qual é pouco utilizado e frequentemente se entope durante o período de amostragem.

A obtenção de amostras da alimentação do circuito foi realizada no final dos transportadores de correia, com um amostrador dotado de uma caneca utilizada para cortar o fluxo de minério. Os demais fluxos do circuito são fluxos de polpa. A amostragem também foi realizada por incrementos, com o uso de um amostrador semelhante àquele utilizado nos transportadores de correia. Conforme projeto fornecido por Bergerman (mensagem pessoal)⁵, a Vale construiu um amostrador para melhorar a coleta de amostras no *underflow* do ciclone (Figura 6.2). Devido às elevadas vazões do circuito, para implementar o uso adequado do amostrador, este deve ser preso ao ciclone de maneira a apenas cortar o fluxo.

Figura 6.2. Amostragem no circuito de moagem.

Para determinar a distribuição granulométrica, a porcentagem de sólidos e a composição química, todas as amostras correspondentes a cada fluxo em cada campanha foram analisadas separadamente. Nos fluxos de *overflow* da classificação e os fluxos da deslamagem (alimentação, *underflow* e *overflow*), a área específica também foi determinada. As análises foram realizadas no Laboratório Físico da Vale, localizado na mina de Carajás, seguindo procedimentos internos padronizados pela empresa.

⁵ BERGERMAN, M. G. **Croqui do amostrador de polpas**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por <bianca.foggiatto@poli.usp.br> em 21 out. 2007.

Para determinar a distribuição granulométrica das amostras coletadas, foram empregadas diferentes técnicas, conforme o procedimento da Vale. Inicialmente o material é deslamado nas peneiras de abertura 0,15 e 0,045 mm. As frações retidas em tais peneiras são secas em estufa a 100 °C. O material retido em 0,15 mm é peneirado a seco em peneiras cujas malhas variam entre 63,0 a 0,15 mm, enquanto que o material retido em 0,045 mm é peneirado à úmido em peneiras cujas malhas variam 0,15 e 0,045 mm. A fração de finos é quarteada e classificada em *cyclosizer*.

Os dados referentes à vazão da alimentação nova e ao consumo específico de energia foram obtidos pela autora no sistema supervisor da usina (*Aspen*), que permite obter valores médios respectivos aos períodos de amostragem. As demais informações sobre medições realizadas em campo, como dimensões reais do *apex* e *vortex* dos ciclones e grau de enchimento dos moinhos, foram fornecidas pela engenheira Vânia Donato de Azevedo, responsável pelo controle de processo da moagem.

6.2 BALANÇO DE MASSAS

Conforme mencionado anteriormente, o conceito de balanço de massas está baseado no princípio de conservação de massa ao longo do circuito de processamento mineral, para todas as frações de tamanhos de partícula. Assim, após a obtenção de dados experimentais em amostragens no circuito industrial é necessário conduzir um balanço de massas dos diversos fluxos da operação para tornar os dados consistentes.

A condução do balanço consiste em calcular valores consistentes mais próximos dos valores experimentais, bem como em obter dados que não foram obtidos a partir das amostragens. A rotina de balanço de massas adotada consistiu em balancear inicialmente os equipamentos individuais, posteriormente as linhas de moagem separadamente e, por fim, o circuito como um todo. Todos os balanços de massas foram obtidos com a utilização do programa *JKSimMet*.

Para a avaliação da qualidade dos balanços de massa conduzidos, foi selecionada a somatória dos quadrados da diferença entre valores calculados e experimentais ponderadas com o valor de seu desvio (*Weighted Sum of Squares – WSSQ*).

6.3 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos matemáticos representativos dos diversos tipos de equipamentos presentes nos circuitos de moagem e deslamagem da unidade de Carajás foram calibrados com o auxílio do programa *JKSimMet*. Os moinhos foram calibrados utilizando-se o Modelo de Misturador Perfeito, enquanto na calibração dos ciclones foi utilizado o Modelo de Nageswararao.

A calibração de modelos foi realizada para as amostragens 2 e 3. Na rotina de calibração de modelos empregada, os equipamentos foram calibrados inicialmente de maneira individualizada, e posteriormente o ajuste foi realizado para o circuito como um todo.

6.3.1 PARÂMETROS DO MODELO DE MISTURADOR PERFEITO

O Modelo de Misturador Perfeito tem por base dois grupos de parâmetros, o primeiro relacionado às características do minério - função quebra - e o segundo relativo às características do equipamento. Estes últimos representam a cinética de moagem ou taxa de quebra, parâmetro r/d^* . Embora no modelo o tamanho máximo das partículas para cálculo do parâmetro r/d^* esteja limitado a 20 mm, o programa emprega o método *spline function* para cobrir toda a faixa granulométrica em questão (JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER - JKMRC, 2003).

Inicialmente, o ajuste do modelo dos moinhos foi conduzido considerando as linhas de moagem de forma independente. Posteriormente, tendo em vista a semelhança entre a operação das duas linhas de moagem, o ajuste dos moinhos foi realizado através do módulo *master/slave*, disponível no programa *JKSimMet*, que permite o ajuste da operação dos dois moinhos seja conduzida em conjunto, resultando em um único conjunto de parâmetros para os dois moinhos (JKMRC, 2003).

6.3.2 PARÂMETROS DO MODELO DE NAGESWARARAO

Cada uma das quatro equações do modelo de Nageswararao possui uma constante que deve ser ajustada a cada operação. Tais constantes são:

- Relativa ao diâmetro mediano: K_{D0} ;
- Relativa à vazão/pressão de alimentação: K_{Q0} ;
- Relativa à partição de polpa: K_{V1} ;
- Relativa à partição de água: K_{W1} .

O ajuste do modelo dos ciclones de classificação do circuito de moagem foi realizado separadamente para cada linha, com o ajuste dos moinhos no módulo *master/slave*, conforme descrito na subseção anterior. Nos ajustes as dimensões medidas dos ciclones fornecidas pela Vale também foram utilizadas. Medições em campo do diâmetro do *apex*, do *vortex* e do *inlet* das diferentes baterias de ciclones de classificação e de deslamagem possibilitaram a determinação de valores médios desses parâmetros, que são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Dimensões dos ciclones medidas em campo.

	Bateria IA	Bateria IB	Bateria IIA	Bateria IIB	Deslamagem
Diâmetro do <i>inlet</i> (m)*	0,211	0,211	0,211	0,211	0,027
Diâmetro do <i>vortex</i> (m)	0,260	0,320	0,320	0,290	0,035
Diâmetro do <i>apex</i> (m)	0,118	0,122	0,118	0,119	0,028

* Como o *inlet* é uma entrada retangular, esse diâmetro refere-se ao diâmetro de um círculo equivalente em área.

O ajuste de modelos de ciclones pode ser realizado através do módulo *master/slave*, com uma ressalva: a partição de água não pode ser ajustada nesse módulo. Para ajustar a partição de água, os parâmetros (K_{W1} , K_{V1} , α e a partição de água) das baterias individuais de ciclones deveriam ser ajustados antes do ajuste *master/slave*. Devido às variações observadas entre as partições de água obtidas, optou-se por não ajustar as linhas de ciclonagem de maneira conjunta.

Na avaliação da qualidade do ajuste dos modelos de ciclones, os desvios entre valores balanceados e ajustados foram analisados através do valor da soma total de erros. Para o ajuste de modelos, uma soma de erro baixa significa um bom ajuste, enquanto somas altas mostram que o ajuste foi pobre. Foram consideradas somas baixas aquelas com valores inferiores a 10, e para somas de erros superiores a 40 os ajustes foram considerados ruins, conforme mostra a Tabela 6.2. Ajustes com somas de erros superiores a 40 foram novamente ajustados com base em novos valores iniciais atribuídos aos parâmetros a serem ajustados: K_{Q0} , K_{D0} , α e partição de água.

Tabela 6.2. Critério de avaliação da qualidade do ajuste de modelos.

Soma de erros	Qualidade do ajuste
> 40	Ruim
30 a 40	Razoável
20 a 30	Boa
10 a 20	Ótima
0 a 10	Excelente

6.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Para a caracterização da fragmentação nas instalações do LSC-EPUSP, foram selecionadas amostras representativas das principais frentes de lavra das minas de Carajás, como anteriormente mencionado. Foram também coletadas, em outros pontos da usina de Carajás, amostras de produto granulado e *sinter feed*, que são alimentados à usina de moagem para a produção de *pellet feed*.

As amostras foram submetidas ao ensaio de resistência ao impacto (DWT) e ao ensaio de moabilidade em moinho com bolas (WI de Bond). Os outros materiais típicos de alimentação do circuito coletados, como *sinter feed* e misturas de ROM com granulado, também foram submetidos a ensaios de moabilidade.

6.5 ENSAIOS DE MOAGEM EM BANCADA

Para a realização de ensaios de bancada foram coletadas amostras no circuito industrial de moagem. O objetivo desses ensaios foi obter um produto cuja granulometria se aproximasse daquela obtida na amostragem do *overflow* do ciclone de classificação (aqui considerado como o produto da moagem industrial).

O planejamento dos ensaios de bancada foi realizado pela autora com o apoio da equipe técnica da Gerência de Otimização e Tratamento de Minérios da Vale, em especial o técnico Ercílio Rangel Almeida.

A primeira bateria de ensaios visou à determinação do tempo de moagem no ensaio de laboratório que resultasse em um produto moído com distribuição granulométrica mais próxima daquela apresentada pelo produto da moagem industrial. Após sua confirmação, diversas variáveis operacionais foram analisadas. Os ensaios de moagem em bancada foram planejados e executados segundo condições variadas de operação, tais como alimentação composta por misturas de minérios (*blends*), distribuição de tamanho das bolas, porcentagem de sólidos, grau de enchimento e velocidade de rotação do moinho.

As características padronizadas utilizadas nos ensaios, tanto do moinho laboratorial quanto da carga moedora, foram baseadas nas características da operação industrial, e são descritas nas Tabelas 6.3 e 6.4.

Tabela 6.3. Características padronizadas do moinho laboratorial.

Dados do moinho	
Diâmetro x Comprimento	12" x 12"
Volume total	22,2 litros
Velocidade crítica	76,6 rpm
Velocidade de rotação	76% da velocidade crítica
Rotação	58 rpm
Alimentação	78,6% de sólidos

Tabela 6.4. Características padronizadas da carga moedora.

Dados da carga moedora	
Grau de enchimento	35% do volume total
Densidade aparente das bolas	4,68 g/cm ³
Peso total da carga de bolas	36,4 kg
Volume aparente das bolas	7,8 litros
Porcentagem de espaços vazios	39,9%
Volume de vazios	3,1 litros

O grau de enchimento utilizado como padrão foi de 35%, o mesmo do circuito industrial. Assim, através da densidade aparente das bolas e do volume total do moinho laboratorial, foi possível calcular o peso de bolas total necessário e seu volume aparente. Considerando o colar de bolas dentro do moinho industrial, foi calculada uma distribuição de tamanho de bolas para os ensaios de laboratório (Tabela 6.5).

Tabela 6.5. Distribuição de tamanhos da carga moedora padrão dos ensaios de bancada.

Tamanho (mm)	Massa retida (kg)	Porcentagem retida simples (%)
60	12,0	33
50	14,9	41
40	6,9	19
22	2,6	7
Total	36,4	100

Os fluxos amostrados e os produtos dos ensaios de moagem foram caracterizados quanto à granulometria, à composição química e à área específica. Esses ensaios e tais caracterizações dos produtos obtidos foram realizados nas instalações do Laboratório Físico de Carajás.

6.5.1 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS EM BANCADA

A distribuição granulométrica dos produtos moídos foi obtida mediante o procedimento padronizado pela Vale, descrito anteriormente na subseção 6.1.2.2. Para cada ensaio de moagem foram analisados parâmetros referentes à granulometria do produto, quais sejam:

- P_{80} (mm);
- P_{50} (mm);
- Porcentagem passante em 0,007 mm;
- Porcentagem passante em 0,045 mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm; e
- Área específica.

A área específica foi avaliada através do método *Blaine*, e os teores das principais impurezas - quais sejam alumina, sílica, fósforo e manganês - foram obtidos por análise química via úmida, também realizadas nas instalações da Vale.

O objetivo desta análise foi consolidar um ensaio padrão realizado em condições operacionais que melhor representam o desempenho do circuito fechado de moagem. Para avaliar a qualidade do produto de cada ensaio de moagem, foram calculadas somas ponderadas das diferenças (SPD) entre o parâmetro obtido para o ensaio e para o *overflow* do ciclone no dia da amostragem.

6.6 SIMULAÇÕES

A simulação de desempenho de quatro tipos de minérios de Carajás foi realizada pelo ensaio padrão e pelo *JKSimMet*, conforme descrito nas subseções que seguem.

6.6.1 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO DO ENSAIO PADRÃO

A simulação do desempenho pelo ensaio padrão em laboratório foi baseada na condução do ensaio laboratorial segundo as condições selecionadas para o ensaio padrão. O desempenho de cada tipo de minério submetido ao ensaio padrão foi determinado pela análise dos parâmetros da distribuição granulométrica obtidos para a alimentação e os produtos dos ensaios de moagem em bancada.

6.6.2 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO *JKSimMet*

A avaliação do desempenho pelo *JKSimMet* foi baseada na simulação do modelo matemático ajustado dos moinhos e dos ciclones de classificação utilizando o programa *JKSimMet*, no qual foram empregados dados da distribuição granulométrica dos minérios amostrados nas diferentes frentes de lavra e da caracterização quanto à fragmentação dos tipos de minério.

Durante as simulações, a variação da vazão de alimentação nova do circuito foi avaliada, para cada frente de lavra, bem como a influência das características de fragmentação dos minérios sobre o desempenho do circuito industrial e sobre os produtos obtidos na simulação. Foram avaliados parâmetros relacionados à distribuição granulométrica, vazão e porcentagem de sólidos dos fluxos da ciclonagens. Também foram observados parâmetros como a carga circulante e a recuperação de sólidos na classificação.

O comportamento de cada tipo de minério foi avaliado pela análise das variações dos parâmetros simulados de distribuição granulométrica, vazão de alimentação, carga circulante e partição de sólidos em relação aos obtidos para o CB.

7 RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa do trabalho.

7.1 AMOSTRAGENS

As amostragens realizadas na mina e na usina de moagem são apresentadas separadamente nas próximas subseções.

7.1.1 AMOSTRAGEM NA MINA

As amostragens na mina foram conduzidas em duas ocasiões: na primeira foram coletadas amostras para o ensaio de moabilidade de Bond e ensaios de moagem em bancada, e na segunda foram coletadas amostras para ensaio de DWT. As amostras de ROM provenientes das várias frentes de lavra das minas N4 e N5 foram coletadas nos dias 26/03/2007 e 21/08/2007.

As amostras foram quarteadas por pilha alongada, ensacadas e lacradas no laboratório de Carajás. Após o quarteamento de tais amostras, subamostras foram posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Simulação e Controle do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LSC/EPUSP), onde foram submetidas a ensaios de caracterização tecnológica quanto à fragmentação. As frentes de lavra amostradas, bem como os respectivos ensaios executados, são descritas na Tabela 7.1.

Tabela 7.1. Amostras ensaiadas no LSC-EPUSP.

Ensaio	Número de amostras	Amostras
Moabilidade de Bond Moagem em bancada	4	N4E, N4W Central, N4WN e N5W
DWT	5	N4E, N4W Central, N4WN, N5E e N5W

Devido a procedimentos relacionados à segurança, não foi possível executar a amostragem para obtenção de amostras adequadas a ensaios de DWT na frente de lavra N5E. A Figura 7.1 constitui-se em fotografia de algumas amostras sendo recebidas nas instalações do LSC-EPUSP.

Figura 7.1. Amostras de minério de ferro no pátio do LSC-EPUSP.

7.1.2 AMOSTRAGEM NO CIRCUITO DE MOAGEM

7.1.2.1 AMOSTRAS PARA ENSAIOS DE BANCADA E CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

As onze amostragens no circuito industrial para ensaios em bancada foram realizadas nas datas apresentadas a seguir.

- 09/02/2007;
- 26/03/2007;
- 17/05/2007;
- 28/02/2007;
- 25/04/2007;
- 29/05/2007;
- 01/03/2007;
- 02/05/2007;
- 02/08/2007.
- 13/03/2007;
- 08/05/2007;

Conforme descrito anteriormente, foram realizadas amostragens em outros pontos da usina de Carajás para obtenção de *sinter feed* (SFCK) e produto granulado (NP2). O material granulado foi utilizado para compor misturas com ROM sob diferentes proporções (80-20% e 75-25%). Posteriormente, tais misturas e também o *sinter feed* foram submetidas ao ensaio de moabilidade de Bond. As amostras de NP2 e de SFCK foram coletadas na usina em 1 de março de 2007.

7.1.2.2 AMOSTRAS PARA MODELAGEM DO CIRCUITO DE MOAGEM

As três amostragens completas realizadas no circuito industrial de moagem, denominadas Amostragem 1, 2 e 3, foram conduzidas em 3 de julho, 22 de agosto e 13 de novembro de 2007, respectivamente. Detalhes dessas amostragens são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2. Amostragens realizadas no circuito industrial de moagem.

Amostragem	Minério alimentado	Data	Início	Fim	Período (min)
1	ROM	03/07	14:30	15:05	35
2	ROM	22/08	11:45	12:25	40
3	ROM + <i>Sinter feed</i>	13/11	08:20	09:20	60

O período de coleta da primeira amostragem foi diminuído devido a variações na alimentação do circuito. A segunda amostragem foi realizada em duplicata, isto é, a cada coleta dois incrementos por amostra foram coletados. Essa conduta foi adotada para atender a Vale, que solicitou duas análises separadas para cada amostra para a verificação de possíveis variações decorrentes de erros na amostragem ou na análise propriamente dita. O período de uma hora tampouco foi atingido, devido a variações na vazão de alimentação e nas vazões de água do circuito. Após a análise dos resultados, optou-se por empregar valores médios calculados para os dados experimentais de distribuição granulométrica, de porcentagem de sólidos e de área específica. Por fim, a terceira amostragem foi realizada no período de uma hora, conforme planejado.

Para verificar oscilações no circuito e comparar os resultados de porcentagem de sólidos medidos em campo com aqueles obtidos em laboratório, a medição da densidade de polpa com uma balança *Marcy* foi realizada durante as amostragens. A Figura 7.2 ilustra uma medição realizada, e a Tabela 7.3 apresenta as porcentagens de sólidos obtidas para as três amostragens, calculadas a partir da densidade do minério ($5,0 \text{ g/cm}^3$) e das densidades de polpa medidas.

Figura 7.2. Acompanhamento, pela autora, da densidade de polpa durante a amostragem.

Tabela 7.3. Porcentagens de sólidos (em peso) obtidas através de balança Marcy.

Fluxo	AM 1	AM 2	AM 3
MO PROD I	81,9	79,5	77,3
MO PROD II	81,6	82,1	77,8
AL classificação I	72,3	-	52,3
O/F classificação I	42,2	28,5	24,6
U/F classificação I	89,0	86,7	79,4
AL classificação II	64,0	60,2	62,0
O/F classificação II	46,9	29,6	36,0
U/F classificação II	81,3	81,7	84,3
AL deslamagem	-	-	24,2
O/F deslamagem	31,7	15,4	8,2
U/F deslamagem	58,9	45,9	31,0

Os parâmetros operacionais obtidos em campo, que caracterizam a operação durante a coleta de amostras, e os dados obtidos no programa supervisorio da usina constam da Tabela 7.4. Os demais resultados são detalhadamente apresentados no Anexo 1 – Dados Experimentais de Amostragens no Circuito de Moagem.

Tabela 7.4. Dados de campo e dados obtidos no programa supervisorio da usina.

Amostragem	1			2			3		
	MO II		MO I	MO II		MO I	MO II		MO I
Vazão de alimentação (t/h) ¹	374		381	393		415	417		431
Umidade da alimentação	-		-	-		7,8	-		10,1
Potência dos moinhos (kW) ²	3184	2977	3131	3097	2884	3103	3098	3047	3060
Consumo específico (kWh/t) ³	16,8		16,1	13,0		14,2	13,2		10,1
Bateria	II-B	II-A	I-B	I-A	II-B	I-B	I-A	II-B	I-A
Número de ciclones em operação	4	-	4	4	-	3	4	-	4
Pressão ciclones (kgf/cm ²)	0,5	-	0,45	*	-	0,45	0,55	-	0,55
Condição de operação	spray	-	spray	spray	-	spray	cordão	-	spray

¹ Base seca, corrigida pelo Aspen.

² Medida nos motores e corrigida pelo Aspen.

³ Calculado pelo Aspen.

* Medidor de pressão fora de operação.

7.2 BALANÇO DE MASSAS

Como resultado das rotinas de balanço de massas obteve-se uma base de dados consistente, constituída por dados de distribuição granulométrica, porcentagem de sólidos e vazão de sólidos. Os dados experimentais estão apresentados no Anexo 2 – Resultados dos Balanços de Massa. Aqueles dados que não foram medidos em campo foram calculados, podendo-se citar como exemplo os fluxos de adição de água do circuito.

Para avaliar a qualidade do balanço de massas foram calculadas as somatórias do quadrado da diferença entre valores calculados e experimentais ponderadas com o valor de seu desvio (WSSQ). Os WSSQ totais obtidos pelo simulador nos balanços de massa são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5. WSSQ obtidos no balanço de massa.

Amostragem	1	2	3
Ciclone de classificação I	140	15,9	17,7
Ciclone de classificação II	254	2,2	13,5
Alimentação da deslamagem	0,1	8,1	14,0
Ciclone de deslamagem	117	28,5	11,7
Moagem I	292	59,9	45,5
Moagem II	397	12,5	50,6
Geral	1017	163	125

Os elevados valores de WSSQ verificados no balanço de massa da amostragem 1 refletem as discrepâncias entre os valores experimentais e os valores balanceados e apresentaram valores altos em relação às demais amostragens. Tais erros podem ser observados nos gráficos da Figura 7.3, nos quais os valores experimentais são pontos e os valores balanceados são linhas. Esses gráficos também são apresentados para as amostragens 2 e 3, nas Figuras 7.4 e 7.5 respectivamente.

(a) Moagem e classificação linha 1

(b) Moagem e classificação linha 2

(c) deslamagem

Exp - Dados experimentais

Bal – Dados balanceados

Figura 7.3. Gráficos do balanço de massa da amostragem 1.

(a) Moagem e classificação linha 1

(b) Moagem e classificação linha 2

(c) deslamagem

Exp - Dados experimentais

Bal - Dados balanceados

Figura 7.4. Gráficos do balanço de massa da amostragem de 2.

(a) Moagem e classificação linha 1

(b) Moagem e classificação linha 2

(c) deslamagem

Exp - Dados experimentais

Bal – Dados balanceados

Figura 7.5. Gráficos do balanço de massa da amostragem 3.

7.2.1 SUMÁRIO DOS DADOS EXPERIMENTAIS E BALANCEADOS

Os dados experimentais e balanceados de vazão mássica, porcentagem de sólidos e distribuição granulométrica (porcentagem passante em 0,007 mm e em 0,045 mm, e porcentagem retida em 0,106 mm) foram resumidos e são apresentados nas Tabelas 7.6, 7.7 e 7.8.

Tabela 7.6. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 1.

Fluxo	Vazão mássica (t/h)		% de sólidos		% retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% passante em 0,007mm	
	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal
Alim. Moinho I	381	381	92,2	92,3	87,0	87,0	10,3	10,3	1,1	1,1
Produto Moinho I	2016	1994	78,6	84,8	38,3	63,6	32,5	19,7	13,1	7,7
Alim. Classificação I	2016	1994	65,8	65,7	38,3	63,6	32,5	19,7	13,1	7,7
O/F Classificação I	381	381	31,4	31,7	2,4	2,9	80,8	79,1	34,7	34,0
U/F Classificação I	1635	1613	88,4	88,0	82,9	77,9	4,0	5,7	1,2	1,5
Alim. Moinho II	374	374	91,3	91,5	79,4	79,4	18,7	18,7	10,4	10,4
Produto Moinho II	1242	1225	78,6	78,8	23,0	35,3	44,1	34,6	15,9	13,1
Alim. Classificação II	1242	1225	60,8	60,6	23,0	35,3	44,1	34,6	15,9	13,1
O/F Classificação II	374	374	35,9	35,9	3,6	3,7	86,4	85,2	34,5	34,4
U/F Classificação II	868	851	86,7	86,8	73,0	49,1	8,9	12,4	2,7	3,8
Alim Deslamagem	755	755	33,6	31,1	3,0	3,3	83,6	82,1	34,6	34,2
O/F Deslamagem	55	206	6,2	15,1	0,7	0,4	97,2	97,5	85,8	85,8
U/F Deslamagem	700	549	51,5	51,6	10,6	4,4	64,9	76,4	13,3	14,8

Na amostragem 1 verifica-se que, para atingir a granulometria estipulada para o *overflow* dos ciclones de classificação, os produtos de ambas as linhas de moagem apresentaram granulometria mais fina do que a esperada. Como nessa amostragem tais fluxos não foram amostrados, mas sim calculados, foram-lhes atribuídos desvios maiores e, portanto houve variação maior. Um bom exemplo é a porcentagem passante em 0,045 mm, que para a linha I apresentou valor experimental de 4,0% e valor balanceado de 5,7% e para linha II, analogamente, valores de 8,9 e 12,4%.

Tabela 7.7. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 2.

Fluxo	Vazão mássica (t/h)		% de sólidos		% retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% passante em 0,007mm	
	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal
Alim. Moinho I	392	393	90,1	90,2	85,1	85,1	12,7	12,7	4,1	4,1
Produto Moinho I	1850	1764	77,2	74,6	43,7	47,4	29,6	24,7	10,1	8,8
Alim. Classificação I	1850	1764	53,1	50,7	43,7	47,4	29,6	24,7	10,1	8,8
O/F Classificação I	392	393	24,2	22,8	10,0	10,6	70,0	69,0	29,1	31,3
U/F Classificação I	1457	1372	78,4	78,2	66,1	58,0	7,1	12,1	1,9	2,4
Alim. Moinho II	416	415	90,2	90,4	84,5	84,5	11,8	11,8	3,6	3,6
Produto Moinho II	2431	2431	80,9	79,5	56,7	60,4	23,2	19,6	7,8	7,8
Alim. Classificação II	2431	2431	56,3	58,5	58,7	60,4	20,9	19,6	7,6	7,8
O/F Classificação II	416	415	23,3	24,4	2,2	2,5	82,5	80,8	33,4	35,8
U/F Classificação II	2015	2016	81,7	82,8	73,4	72,4	6,7	7,0	2,0	2,0
Alim. Deslamagem	808	808	22,0	22,8	3,0	6,4	83,6	75,0	34,6	33,6
O/F Deslamagem	246	233	11,1	10,3	0,7	0,6	97,2	97,3	85,8	85,0
U/F Deslamagem	562	575	44,8	44,8	11,3	8,8	60,8	66,0	15,8	12,8

Tabela 7.8. Sumário de dados experimentais e balanceadas – Amostragem 3.

Fluxo	Vazão mássica (t/h)		% de sólidos		% retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% passante em 0,007mm	
	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal
Alim. Moinho I	430	430	90,5	90,5	85,6	85,6	11,2	11,2	4,0	4,0
Produto Moinho I	1978	1978	76,0	76,1	55,2	56,1	22,2	21,1	8,1	8,2
Alim. Classificação I	1978	1978	50,7	52,3	55,2	56,1	22,2	21,1	8,1	8,2
O/F Classificação I	430	431	23,4	23,4	3,2	3,1	76,8	76,6	34,8	35,5
U/F Classificação I	1549	1548	79,8	79,6	71,5	70,8	5,1	5,7	0,6	0,6
Alim. Moinho II	418	417	90,7	90,7	87,6	87,6	9,5	9,5	3,5	3,5
Produto Moinho II	1691	1691	74,8	75,4	62,2	58,7	20,0	21,7	7,0	8,9
Alim. Classificação II	1691	1691	58,4	56,5	60,2	58,7	22,3	21,7	10,1	8,9
O/F Classificação II	418	417	31,9	29,6	9,6	9,9	64,7	63,7	27,8	28,4
U/F Classificação II	1273	1274	80,4	80,4	72,3	74,6	8,4	8,0	2,8	2,5
Alim. Deslamagem	848	847	21,3	21,6	8,1	6,4	67,3	70,3	32,1	32,0
O/F Deslamagem	161	152	8,2	8,0	0,0	0,1	100,0	99,9	95,1	95,0
U/F Deslamagem	687	695	34,3	34,2	7,2	7,8	64,2	63,7	19,7	18,2

Examinando as informações apresentadas, verifica-se que os resultados obtidos no balanço de massa da primeira amostragem não apresentaram boa consistência e também não representavam o circuito adequadamente. As duas últimas amostragens apresentaram menores WSSQ, e dados com qualidade superior à daqueles obtidos na amostragem 1. Nessa amostragem observa-se uma diferença significativa entre os valores de distribuição granulométrica da alimentação nova do circuito medidos e calculados. Isso decorreu principalmente do fato de os fluxos de produto dos moinhos e o fluxo da alimentação da deslamagem - composta pelos *overflows* dos ciclones de classificação - não terem sido amostrados conforme planejado. Por essa razão, a amostragem 1 não foi utilizada nos estudos posteriores.

A segunda e a terceira amostragem apresentaram produto final (neste caso, o *underflow* dos ciclones de deslamagem) com distribuição granulométrica muito próxima das especificações mencionadas na seção 5.2, a exceção da fração retida em 0,106 mm que apresentou valores acima daquele estipulado (3 a 5%). Também se constata que a porcentagem passante em 0,007 mm obtida no balanço de massa para a segunda amostragem apresentou uma diferença de 3% em relação ao dado experimental.

Dessa maneira, obtiveram-se duas amostragens que representam o circuito com fidelidade. Ambas apresentaram distribuições granulométricas da alimentação nova distintas, uma vez que durante a amostragem 2 o circuito estava sendo alimentado com ROM, enquanto na amostragem 3 a alimentação era composta por ROM e material granulado proveniente de outros pontos da usina de Carajás.

7.3 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Os dados empregados nos ajustes de modelos foram aqueles obtidos nos balanços de massa. Assim sendo, foi garantido que os dados utilizados no ajuste fossem coerentes, dentro do limite dos erros do balanço de massa.

Os erros totais obtidos no ajuste dos modelos dos ciclones de classificação e de deslamagem, bem como das linhas de moagem como um circuito integrado são apresentados na Tabela 7.9.

Tabela 7.9. Soma total dos erros dos ajustes de modelos.

Equipamento ou circuito ajustado	Amostragem	
	2	3
Ciclone de classificação I	39,5	13,1
Ciclone de classificação II	29,9	23,9
Ciclone de deslamagem	18,0	17,5
Moagem I	9,1	5,3
Moagem II	8,1	5,2

Os erros obtidos para a amostragem 2 foram relativamente mais altos do que aqueles obtidos para a amostragem 3. Observando as Figuras 7.6 e 7.7, é possível comparar os dados balanceados (pontos) e os dados que foram ajustados ao modelo (linhas). Também se constata que o ajuste realizado para o ciclone de deslamagem apresentou baixa aderência, principalmente para o fluxo de *underflow*, em ambas as amostragens.

(a) Moagem e classificação linha 1

(b) Moagem e classificação linha 2

(c) deslamagem

Exp – Dados experimentais balanceados

Fit – Dados ajustados

Figura 7.6. Gráficos do ajuste de modelos da amostragem 2.

(a) Moagem e classificação linha 1

(b) Moagem e classificação linha 2

(c) deslamagem

Exp – Dados experimentais balanceados

Fit – Dados ajustados

Figura 7.7. Gráficos do ajuste de modelos da amostragem 3.

A partir dos gráficos apresentados verifica-se que a qualidade (aderência) do ajuste das distribuições granulométricas é boa, a menos do fluxo de *underflow* da deslamagem.

7.3.1 PARÂMETROS DOS MODELOS DE MOAGEM

Para a condução dos ajustes, os tamanhos de partícula definidos para o cálculo da taxa de quebra, r/d^* , foram 0,03; 0,3; 3,0 e 15,0 mm. Esses tamanhos foram selecionados por duas razões: primeiro porque a abscissa da função quebra é apresentada em escala logarítmica, e segundo por que abrangem a faixa de tamanhos da alimentação, dentro dos limites do programa *JKSimMet*.

Os gráficos obtidos para as duas amostragens e apresentados na Figura 7.8 comparam a distribuição do parâmetro r/d^* para cada uma das amostragens.

Figura 7.8. Gráficos das funções de quebra obtidas no ajuste dos moinhos.

Como resultado, a linha I apresentou um ponto de inflexão nítido e coincidente para as duas amostragens, enquanto que a linha II não apresentou tal inflexão para a amostragem 2.

A linha II apresentou comportamento diferente em cada amostragem. Assim, na amostragem 2 a curva apresentou crescimento constante, embora com um decréscimo no gradiente na área onde está o ponto de inflexão da linha I, e na amostragem 3 a curva para a linha II apresentou um ponto de inflexão com valor máximo muito próximo àquele atingido na amostragem anterior.

Considerando a semelhança entre a operação das duas linhas de moagem, foi posteriormente realizado o ajuste de modelos no módulo *master/slave*, disponível no *JKSimMet*. Esse módulo permite que a operação dos dois moinhos seja ajustada simultaneamente. Os gráficos da taxa de quebra obtidos para as duas amostragens no ajuste dos moinhos através do módulo *master/slave* são apresentados na Figura 7.9.

Figura 7.9. Gráficos das funções de quebra obtidas no ajuste *master/slave* dos moinhos.

Como resultado, as curvas da taxa de quebra apresentam consistência e reprodutibilidade, pois ambas tiveram crescimento constante até atingir um ponto de inflexão seguido de um decréscimo para partículas mais grossas. Assim, nas duas amostragens a curva da taxa de quebra apresentou um ponto de inflexão com valores de máximo para tamanhos de partícula bem próximos (cerca de 4 mm). Ainda que em ambas as amostragens a curva apresente crescimento constante, a taxa de quebra máxima da amostragem 2 foi menor. Quanto à taxa de quebra para partículas mais grossas, observa-se proximidade nos valores atingidos por ambas as curvas, conforme listado na Tabela 7.10.

Tabela 7.10. Comparação dos valores de r/d^* obtidos nos ajustes dos moinhos.

Tamanho (mm)	Amostragem	
	2	3
	$\ln (r/d^*)$	
0,03	0,70	0,67
0,3	1,48	1,46
3,0	5,61	6,25
15,0	5,15	5,69

Os resultados de vazões mássicas, porcentagens de sólidos e distribuições granulométricas obtidos na calibração dos modelos constam do Anexo 3 – Resultados da Calibração dos Modelos.

7.3.1.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O desempenho do moinho quanto à energia consumida foi analisado através do cálculo do WI operacional e da eficiência energética do moinho. As Tabelas 7.11 e 7.12 apresentam os resultados de análise da eficiência energética do circuito de moagem, para cada linha de moagem separadamente. Os dados de vazão de sólidos, F_{80} e P_{80} foram obtidos no balanço de massa e a potência é aquela obtida no *Aspen*. O WI-O e o WI-Oc foram calculados conforme o critério de Rowland (1998).

Tabela 7.11. Dados obtidos no ajuste de modelos para cálculo da eficiência energética operacional.

Amostragem	Moinho	Vazão de sólidos (t/h)	Potência (kW)	Potência consumida (kWh/t)	Relação de redução	F_{80} (μm)	P_{80} (μm)
1	MO I	381,2	6251	16,4	197	9119	46,4
	MOII	373,9	6161	16,5	133	4749	35,7
2	MO I	414,8	6201	14,9	100	6069	60,5
	MOII	392,7	5981	15,2	132	5737	43,5
3	MO I	430,5	6188	14,4	103	5182	50,5
	MOII	416,7	6144	14,7	117	9246	79,0

Tabela 7.12. Cálculo da eficiência energética segundo das obtidos no ajuste de modelos.

Amostragem	Moinho	WI	EF_1^*	EF_2^*	WI-O (kWh/t)	WI-Oc (kWh/t)	Eficiência da moagem (%)
1	MO I	11,42	0,941	1,03	12,0	12,8	89
	MOII	11,42	0,941	1,00	10,8	11,8	97
2	MO I	11,42	0,941	1,02	12,9	13,9	82
	MOII	11,42	0,941	1,01	11,0	11,9	96
3	MO I	12,14	0,941	1,01	11,3	12,2	99
	MOII	12,14	0,941	1,05	14,4	15,0	81

* Definidos por Rowland Jr. (1998), correspondem aos fatores EF_3 e EF_4

propostos anteriormente pelo mesmo autor em 1969 (apud Chaves, 2001).

Ao comparar os dados calculados da Tabela 7.12 com aqueles calculados pelo supervisorio (Tabela 7.4), observa-se diferença significativa no consumo específico de energia. As maiores diferenças foram observadas para a amostragem 1 como consequência da qualidade dos dados obtidos no balanço de massa.

A eficiência da moagem, conforme definida por Rowland Jr. (1998), apresentou média de 91%, com desvio padrão de 8%, patamar de eficiência considerado muito elevado para circuitos desse tipo. Ao confrontar os valores de potência consumida do supervisorio com aqueles estimados pelo *JKSimMet*, verificou-se que a potência obtida através do *Aspen* está subestimada. Valores da eficiência da moagem calculada através dos dados gerados no ajuste de modelos (Tabela 7.13) resultaram em eficiências mais baixas, caindo a uma média de 77% com desvio padrão de 8%. Isso ocorre porque a potência estimada pelo programa é muito maior do que aquela registrada pelo supervisorio.

Tabela 7.13. Cálculo da eficiência energética obtidos no ajuste de modelos.

Amostragem	Moinho	WI	Potência (kW)	WI-Oc (kWh/t)	Eficiência da moagem (%)
2	MO I	11,42	7146	16,0	71
	MOII	11,42	7145	14,2	80
3	MO I	12,14	7144	14,1	86
	MOII	12,14	7146	17,4	70

7.3.2 PARÂMETROS DO MODELO DE CICLONES

As próximas subseções apresentam os parâmetros do modelo de Nageswararao obtidos tanto para os ciclones de classificação como para os ciclones de deslamagem.

7.3.2.1 CICLONES DE CLASSIFICAÇÃO

Conforme descrito anteriormente, o ajuste dos ciclones de classificação foi realizado para cada linha separadamente, uma vez que as dimensões de *apex* e *vortex* utilizadas foram aquelas medidas em campo (Tabela 6.1) e, portanto, apresentam diferenças significativas na modelagem da operação do ciclone. Os parâmetros das equações de Nageswararao obtidos,

e os parâmetros operacionais calculados no ajuste das ciclonagens de classificação são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 7.14 e 7.15.

Tabela 7.14. Parâmetros das equações de Nageswararao para os ciclones de classificação.

Parâmetro	Amostragem			
	2		3	
	Bateria IB	Bateria IIA	Bateria IB	Bateria IIB
$K_{D0} \times 10^{-5}$	3,61	3,82	5,22	5,49
K_{Q0}	1031	1151	1198	894
K_{V1}	8,5	11,7	7,6	9,3
K_{W1}	16,5	22,6	13,5	17,5
α	0,62	2,40	2,05	2,09

Tabela 7.15. Parâmetros operacionais e de desempenho calculados para os ciclones de classificação.

Parâmetro	Amostragem			
	2		3	
	Bateria IB	Bateria IIA	Bateria IB	Bateria IIB
<i>By-pass</i> (%)	18,6	25,0	15,6	21,8
d_{50c} (mm)	0,036	0,049	0,052	0,069
Pressão (kPa)	53	59	50	44

Os valores obtidos para a variável relativa ao diâmetro mediano (K_{D0}) das duas baterias na mesma amostragem foram muito semelhantes. Já o parâmetro referente à pressão de operação (K_{Q0}) apresentou valores próximos à média, 1068, com exceção da bateria IIB, na terceira amostragem. Os parâmetros relativos à partição de polpa (K_{V1}) e à partição de água (K_{W1}) resultaram em valores mais elevados para a linha II, em ambas as amostragens. O parâmetro de inclinação da curva obtido para a bateria IB na segunda amostragem apresentou um valor muito abaixo daquele observado nas demais baterias.

A partir da avaliação do *by-pass*, é possível afirmar que a operação dos ciclones de classificação foi muito boa, segundo a classificação de Napier-Munn (1996) apresentada na Tabela 3.1. Não há homogeneidade nos diâmetros medianos obtidos pelas diferentes baterias na mesma amostragem, contudo a bateria da linha I apresentou diâmetros de corte

corrigidos e *by-pass* menores que a linha II nas duas amostragens. As curvas padrão de partição ajustadas (para o *underflow*) são apresentadas nos gráficos da Figura 7.10.

(a) Amostragem 2

(b) Amostragem 3

Figura 7.10. Curvas padrão de partição dos ciclones classificadores.

A análise das curvas padrão de partição demonstrou que na amostragem 2 houve uma diferença significativa na qualidade da separação dos ciclones de classificação das duas linhas, conforme mencionado na análise da Tabela 7.15. Esse fato decorreu da diferença entre a porcentagem de sólidos da polpa alimentada a cada moinho e, como consequência, entre as distribuições granulométricas dos produtos dos moinhos.

7.3.2.2 CICLONES DE DESLAMAGEM

Os parâmetros das equações de Nageswararao obtidos e os parâmetros operacionais calculados no ajuste do modelo dos ciclones para a etapa de deslamagem podem ser analisados nas Tabelas 7.16 e 7.17, respectivamente.

Tabela 7.16. Parâmetros das equações de Nageswararao para os ciclones de deslamagem.

Parâmetro	Amostragem	
	2	3
$K_{D0} \times 10^{-5}$	4,29	3,63
K_{Q0}	763	872
K_{V1}	13,0	14,5
K_{W1}	73,6	84,9
A	0,43	0,64

Tabela 7.17. Parâmetros operacionais calculados para os ciclones de deslamagem.

Parâmetro	Amostragem	
	2	3
By-pass (%)	37,7	42,3
d_{50c} (mm)	0,004	0,003
Pressão (kPa)	271	241

Os parâmetros calculados para ajustar o circuito de deslamagem ao modelo de Nageswararao apresentaram valores semelhantes nas duas amostragens. O parâmetro d_{50c} apresentou pequena variação entre amostragens, porém o foco da deslamagem é eliminação do excesso de material muito fino - de forma a obter um *underflow* com área específica e granulometria bem controlada, apresentando 12 a 13% passante em 0,007 mm.

A curva padrão de partição ajustada (para o *underflow*) é apresentada na Figura 7.11.

Figura 7.11. Curva padrão de partição dos ciclones de deslamagem.

A curva de partição apresentada acima corresponde às amostragens 2 e 3, em ajuste conduzido para os ciclones de deslamagem, considerando que a curva padrão de partição para uma dada alimentação é independente das condições operacionais (LYNCH, 1977), e diante da grande semelhança entre as curvas de partição obtidas em ajustes preliminares. Entretanto, foi observada baixa aderência das distribuições granulométricas dos produtos ajustados aos dados experimentais, resultando em produtos finais mais finos do que aqueles observados no circuito industrial.

7.3.3 SUMÁRIO DE DADOS BALANCEADOS E DADOS AJUSTADOS

Da mesma maneira que no balanço de massa, os dados balanceados e ajustados de vazão mássica, porcentagem de sólidos e distribuição granulométrica foram resumidos e são apresentados nas Tabelas 7.18 e 7.19.

Tabela 7.18. Sumário de dados balanceados e ajustados – Amostragem 2.

Fluxo	Vazão mássica (t/h)		% de sólidos		% retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% passante em 0,007 mm	
	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust
Alim. Moinho I	393	393	90,2	90,5	85,1	85,1	12,7	12,7	4,1	4,1
Produto Moinho I	1764	1772	74,6	78,0	47,4	52,4	24,7	26,7	8,8	9,9
Alim. Classificação I	1764	1772	50,7	50,5	47,4	52,4	24,7	26,7	8,8	9,9
O/F Classificação I	393	393	22,8	21,1	10,6	7,0	69,0	73,5	31,3	34,0
U/F Classificação I	1372	1379	78,2	82,4	58,0	65,4	12,1	13,3	2,4	3,0
Alim. Moinho II	415	415	90,4	90,7	84,5	84,4	11,8	11,8	3,6	3,6
Produto Moinho II	2431	2431	79,5	76,2	60,4	56,8	19,6	20,2	7,8	7,6
Alim. Classificação II	2431	2431	58,5	56,2	60,4	56,8	19,6	20,2	7,8	7,6
O/F Classificação II	415	415	24,4	29,9	2,5	1,3	80,8	77,4	35,8	32,7
U/F Classificação II	2016	2016	82,8	81,2	72,4	68,2	7,0	8,4	2,0	2,4
Alim. Deslamagem	808	808	22,8	20,5	6,4	4,1	75,0	75,5	33,6	33,3
O/F Deslamagem	233	105	10,3	6,5	0,6	0,0	97,3	100,0	85,0	84,7
U/F Deslamagem	575	703	44,8	34,1	8,8	4,7	66,0	71,9	12,8	25,7

Tabela 7.19. Sumário de dados balanceados e ajustados – Amostragem 3.

Fluxo	Vazão mássica (t/h)		% de sólidos		% Retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% Passante em 0,007 mm	
	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust	Bal	Ajust
Alim. Moinho I	431	431	90,5	90,5	85,6	85,6	11,2	11,2	4,0	4,1
Produto Moinho I	1978	1984	76,1	79,1	56,1	56,3	21,1	22,0	8,2	8,6
Alim. Classificação I	1978	1984	52,3	51,0	56,1	56,3	21,1	22,0	8,2	8,6
O/F Classificação I	431	431	23,4	21,1	3,1	3,2	76,6	74,1	35,5	32,6
U/F Classificação I	1548	1553	79,6	84,0	70,8	71,0	5,7	7,6	0,6	1,9
Alim. Moinho II	417	417	90,7	90,7	87,6	87,7	9,5	9,5	3,5	3,5
Produto Moinho II	1691	1568	75,4	76,0	58,7	56,2	21,7	25,3	8,9	10,7
Alim. Classificação II	1691	1568	56,5	55,7	58,7	56,2	21,7	25,3	8,9	10,7
O/F Classificação II	417	417	29,6	29,9	9,9	7,3	63,7	68,3	28,4	31,0
U/F Classificação II	1274	1152	80,4	81,0	74,6	73,9	8,0	9,7	2,5	3,3
Alim. Deslamagem	847	847	21,6	19,9	6,4	5,2	70,3	71,2	32,0	31,8
O/F Deslamagem	152	74	8,0	3,6	0,1	0,0	99,9	100	95,0	92,6
U/F Deslamagem	695	774	34,2	34,7	7,8	5,7	63,7	68,5	18,2	26,0

Na análise dos resultados obtidos na calibração, verifica-se que os modelos ajustados apresentam tendência a diminuir a porcentagem retida em 0,106 mm no *overflow* dos ciclones de classificação e, conseqüentemente, no *underflow* do ciclone de deslamagem. Por outro lado, apresentam produto final a porcentagem passante em 0,007 mm muito além dos limites estipulados.

7.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

7.4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE BOND

Os resultados obtidos nos ensaios de moabilidade de Bond estão apresentados na Tabela 7.20. A mesma malha de fechamento, qual seja, 0,149 mm, foi utilizada em todos os ensaios.

Tabela 7.20. Resultados dos ensaios de moabilidade de Bond.

Amostra	WI (kWh/t)
N5W + NP2 (85-15%)	12,1
N5W + NP2 (70-30%)	12,3
N4E	8,4
N4W Central	18,1
N4WN	11,8
N5W	11,4
SFCK	14,6

As planilhas detalhadas do ensaio, do cálculo do WI e da distribuição granulométrica de alimentação e produto seguem apresentadas no Anexo 4 – Resultados dos Ensaios de Moabilidade de Bond.

Constata-se variação significativa nos valores listados na Tabela 7.20, com uma amostra de 8,4 kWh/t (N4E) e outra com valor 18,1 kWh/t (N4W Central). A Tabela 7.21 apresenta os parâmetros estatísticos da distribuição de valores do ensaio de Bond para as sete amostras de Carajás.

Tabela 7.21. Estatística dos ensaios de moabilidade de Bond.

Variável	WI (kWh/t)
Média	12,7
Desvio Padrão	3,0
Média + Desvio Padrão	15,7
Média - Desvio Padrão	9,7

Na Tabela 7.21 observa-se que a média das sete amostras foi de 12,7 kWh/t com desvio padrão de 3,0. A partir da divisão do desvio padrão pela média das amostras obtém-se coeficiente de variação do WI, que resultou em 23%.

7.4.2 RESULTADOS DE ENSAIOS DE DWT

Uma amostra composta por minério de N5W e N4W Central (50-50%) foi submetida ao ensaio de DWT completo, segundo o procedimento anteriormente descrito na subseção 3.6.2.1. A partir da regressão matemática entre os 15 pares de valores de energia aplicada - E_{cs} (kWh/t) - e a fragmentação resultante - t_{10} (%) - foram calculados os valores dos parâmetros A e b , que por sua vez permitiram a obtenção do valor de IQ. Os 15 pares de valores experimentais obtidos são apresentados na Figura 7.12 sob a forma de um gráfico que contém a curva relativa à equação paramétrica obtida para a amostra, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 7.22.

Figura 7.12. Curva paramétrica da relação entre energia e fragmentação.

Tabela 7.22. Parâmetros obtidos através do ensaio de DWT completo.

A	b	IQ
68,3	3,3	225

A amostra de N5W+N4E apresentou valor de IQ que representa uma resistência ao impacto extremamente baixa, segundo a classificação de Delboni Jr. apresentada na Tabela 3.4. O parâmetro referente à fragmentação da amostra por abrasão, t_a , resultou em 8,59, o que indica também resistência excepcionalmente baixa à abrasão, segundo a classificação de Delboni Jr. apresentada na Tabela 3.5.

Os resultados dos ensaios de DWT completo seguem apresentados no Anexo 5 – Resultados do Ensaio de DWT.

7.4.2.1 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO

A partir da massa seca e da massa submersa de partículas de tamanhos compreendidos entre 4,75 e 6,35 mm, foram calculados o peso específico de cada tipo de minério, apresentados na Tabela 7.23.

Tabela 7.23. Densidades das amostras submetidas ao ensaio de DWT simplificado.

Amostra	Massa seca (g)	Massa sub. (g)	Peso específico	Peso específico médio
N4E	10,6	8,5	5,05	5,01
	9,9	7,9	4,95	
	11,1	8,9	5,05	
N5W	11,5	9,2	5,00	4,98
	10,5	8,4	5,00	
	6,9	5,5	4,93	
N4W C	11,7	9,4	5,09	5,08
	11,0	8,8	5,07	
	11,2	9,0	5,09	
N5E	11,9	9,6	5,06	5,06
	9,5	7,6	5,00	
	9,7	7,8	5,11	
N4WN	9,4	7,5	4,95	4,90
	8,7	6,9	4,94	
	10,1	8,0	4,81	
AL MO Amostragem 2	8,5	6,8	5,00	4,98
	8,7	7,0	5,03	
	9,8	7,8	4,90	

Tabela 7.24. Estatística dos ensaios de determinação do peso específico.

Variável	Peso específico
Média	5,00
Desvio Padrão	0,07
Média + Desvio Padrão	5,07
Média - Desvio Padrão	4,93

Os valores listados na Tabela 7.24 indicam pequena variação nos pesos específicos obtidos, com média de 5,00 e desvio padrão de 0,1, que resultaram em coeficiente de variação de 2%.

7.4.2.2 FUNÇÃO QUEBRA

Seis amostras de Carajás com tamanho entre 9,5 e 6,35 mm, uma proveniente da alimentação do circuito de moagem no dia da segunda amostragem e as demais provenientes das frentes de lavra das minas N4 e N5, foram submetidas ao ensaio de DWT Simplificado. Essa faixa granulométrica foi selecionada em função da distribuição de tamanhos de partículas que compõem a alimentação dos moinhos de Carajás.

Os pares de valores da energia aplicada e da fragmentação resultante obtidos nesses ensaios de DWT seguem na Tabela 7.25, na qual também são apresentados os valores de A e b ajustados segundo o método dos mínimos quadrados, bem como o valor de t_{10}^* .

Tabela 7.25. Resultados obtidos nos ensaios de DWT.

Amostra	E_{cs} (kWh/t)	t_{10} (%)	A	b	t_{10}^*
N4E	2,51	37,02	40,0	9,0	46,9
	1,01	25,74			
	0,25	13,69			
N5W	2,54	38,10	35,6	15,1	47,1
	1,04	34,21			
	0,27	15,05			
N4W Central	2,54	37,16	25,2	11,9	34,3
	1,03	30,23			
	0,24	9,33			
N5E	2,54	36,81	30,3	10,7	38,4
	1,03	24,68			
	0,28	10,33			
N4WN	2,54	49,45	27,5	11,9	36,6
	1,05	38,61			
	0,28	29,31			
AL MO (Amostragem 2)	2,53	46,75	27,0	10,0	34,6
	1,03	36,85			
	0,27	18,04			

A partir dos valores de t_{10}^* obtidos, verifica-se que existem dois tipos de minérios com maior resistência: o minério alimentado à usina no dia da segunda amostragem e o minério proveniente da frente de lavra N4W Central.

As funções de quebra, apresentadas na Tabela 7.26, foram determinadas pelo gráfico de Narayanan (1985).

Tabela 7.26. Funções de quebra.

	Porcentagem retida simples (%)					
	N4E	N5W	N4W Central	N5E	N4WN	AL MO Amostragem 2
t_1	0	0	0	0	0	0
t_2	6	7	4	2	0	0
t_4	26	26	25	24	19	19
t_{10}	31	30	32	33	30	30
t_{25}	17	17	18	19	23	24
t_{50}	8	8	8	8	11	11
t_{75}	4	4	4	4	5	5
Finos	8	8	9	9	11	11

Posteriormente essas funções foram corrigidas com o auxílio da equação de distribuição de Rosin-Rammler, e as distribuições foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados. Assim, para cada função quebra foi calculada a porcentagem passante acumulada de todas as faixas granulométricas que compõem a alimentação do circuito de moagem. Tais resultados, apresentados na Tabela 7.27, foram empregados como dados de entrada no ajuste de modelos dos moinhos e nas simulações de desempenho dos tipos de minério de Carajás.

Tabela 7.27. Funções de quebra corrigidas.

Tamanho (mm)	Porcentagem passante acumulada (%)					
	N4E	N5W	N4W Central	N5E	N4WN	AL MO Amostragem 2
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
35,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
17,7	99,9	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	99,4	99,3	99,7	99,9	100,0	100,0
8,84	97,5	97,3	98,4	99,1	99,8	99,8
6,25	93,1	92,8	95,0	96,7	98,5	98,5
4,42	85,6	85,2	88,5	91,2	94,6	94,5
3,13	75,5	74,9	78,9	82,4	86,9	86,6
2,21	63,9	63,4	67,5	71,1	75,6	75,0
1,56	52,2	51,7	55,5	58,9	62,4	61,7
1,11	41,5	41,0	44,2	47,0	49,2	48,5
0,781	32,2	31,8	34,3	36,5	37,5	36,8
0,552	24,6	24,3	26,2	27,8	27,9	27,2
0,391	18,5	18,3	19,6	20,7	20,2	19,7
0,276	13,7	13,6	14,6	15,3	14,5	14,0
0,195	10,2	10,1	10,7	11,2	10,3	9,9
0,138	7,5	7,4	7,9	8,1	7,3	7,0
0,098	5,5	5,4	5,7	5,9	5,1	4,9
0,069	4,0	4,0	4,2	4,2	3,6	3,4
0,049	2,9	2,9	3,0	3,1	2,5	2,4
0,035	2,1	2,1	2,2	2,2	1,7	1,6
0,024	1,5	1,5	1,6	1,6	1,2	1,1
0,017	1,1	1,1	1,1	1,1	0,8	0,8
0,012	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,5
0,009	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4
0,006	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
0,004	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
0,003	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1

7.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOAGEM EM BANCADA

Os dados experimentais obtidos nos ensaios de moagem em bancada são apresentados no Anexo 6 – Resultados dos Ensaio de Moagem. Os parâmetros da distribuição granulométrica (P_{80} , P_{50} , porcentagem passante em 0,007 mm e em 0,045 mm e porcentagem retida em 0,106 mm) foram obtidos com o auxílio do programa *JKSimMet*. Os resultados, agrupados de acordo com o parâmetro operacional em estudo, são discutidos a seguir.

7.5.1 TEMPO DE MOAGEM

Para os ensaios de moagem em bancada, foram utilizadas amostras obtidas no circuito industrial de moagem. Inicialmente foram realizados cinco ensaios de moagem nos tempos de 10, 20, 30, 60 e 90 minutos, com o objetivo de determinar o tempo de moagem requerido no ensaio de laboratório para que o produto obtido reproduza a granulometria do *overflow* do ciclone de classificação do circuito industrial no dia 26/03/2007:

- $P_{80} = 0,038$ mm;
- $P_{50} = 0,010$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 2,0%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 79,8%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 34,4%;
- Área específica = 3900 cm²/g.

A Tabela 7.28 apresenta os valores obtidos para os ensaios em diferentes tempos de moagem.

Tabela 7.28. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem –
Tempo de moagem.

Ensaio	Tempo de moagem	P_{80}	P_{50}	% passante em 0,007 mm	% passante em 0,045 mm	% retida em 0,106 mm	Área específica
	Min	mm	mm	%	%	%	cm ² /g
Alimentação		7,79	1,6	6,0	15,7	80,6	*
1	10	0,329	0,109	*	33,2	50,6	2308
2	20	0,168	0,057	15,9	44,2	35,6	2433
3	30	0,126	*	*	54,2	26,7	2727
4	60	0,051	*	*	75,9	3,2	3343
5	90	0,037	0,014	34,4	86,9	0,7	4046

* valores não medidos/calculados.

As curvas de moagem obtidas em função do P_{80} e da área específica podem ser observadas na Figura 7.13.

Figura 7.13. Curvas obtidas para diferentes tempos de moagem.

A partir das curvas apresentadas, o tempo de moagem foi calculado em 90 minutos. Após a determinação do tempo de moagem, ensaios com duração de 90 minutos foram conduzidos. Nesses ensaios, foram utilizadas diferentes amostras do circuito industrial e amostras das principais frentes de lavra de Carajás, estas últimas obtidas na amostragem realizada na mina no dia 26 de março de 2007.

Assim, para confirmar o tempo determinado foram realizados ensaios de moagem sobre amostras de minérios provenientes de diferentes amostragens realizadas no circuito industrial. Nessa etapa de confirmação também foram empregadas amostras de diferentes frentes de lavra de Carajás que não são alimentadas ao moinho. Portanto, os produtos obtidos nos ensaios sobre minérios de outras frentes de lavra que não a N5W tiveram como meta valores típicos de *overflow* do ciclone de classificação:

- $P_{80} = 0,040$ mm;
- $P_{50} = 0,013$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 1,3%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 81,5%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 35,7%;
- Área específica = 4160 cm²/g.

A variação das distribuições granulométricas dos produtos moídos é apresentada nos gráficos da Figura 7.14, nos quais as linhas representam a média obtida para o *overflow* do ciclone de classificação para todas as amostragens desta subseção, e os pontos os parâmetros P_{80} e P_{50} calculados para os diferentes produtos moídos.

Figura 7.14. Variação dos parâmetros P_{80} e P_{50} obtidos nos ensaios de confirmação do tempo de moagem.

Os parâmetros de P_{80} obtidos para os produtos moídos apresentaram valores entre 0,034 e 0,043 mm, com diferenças entre o valor obtido no ensaio e o valor esperado de até 0,015 mm. Já os valores de P_{50} variaram muito pouco em relação ao valor esperado e a faixa de tamanhos atingida foi de 0,012 até 0,016 mm.

Os parâmetros obtidos a partir da distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem são listados na Tabela 7.29.

Tabela 7.29. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto dos ensaios de moagem – Confirmação do tempo de moagem.

Ensaio	Amostragem data/minério	P_{80} mm			P_{50} mm		
		Alim.	Prod.	Meta	Alim.	Prod.	Meta
6	9/2	5,71	0,036	0,035	1,51	0,013	0,011
7	28/2	7,79	0,036	0,049	1,61	0,013	0,015
8	13/3	11,12	0,039	0,051	2,25	0,015	0,017
9	N4E	5,02	0,036	0,040	0,63	0,016	0,013
10	N4WN	10,00	0,040	0,040	2,78	0,015	0,013
11	N4W – Central	4,87	0,043	0,040	0,90	0,016	0,013
12	N5E	3,75	0,034	0,040	1,07	0,012	0,013
13	25/4	8,25	0,038	0,053	1,91	0,014	0,017
14	2/5	9,37	0,037	0,041	1,87	0,014	0,014
15	8/5	5,18	0,037	0,033	1,42	0,014	0,012
16	17/5	9,69	0,035	0,038	2,13	0,013	0,011

Ensaio	Amostragem data/minério	% passante em 0,007 mm %			% passante em 0,045 mm %			% retida em 0,106 mm %			Área específica cm ² /g	
		Alim.	Prod.	Meta	Alim.	Prod.	Meta	Alim.	Prod.	Meta	Prod.	Meta
6	09/fev	3,3	35,4	39,0	9,6	86,6	86,5	86,9	0,9	0,9	4000	4691
7	28/fev	6,0	35,6	32,3	15,7	86,5	76,9	80,6	1,1	3,0	4138	3672
8	13/mar	3,7	32,9	33,0	9,8	84,5	74,7	86,7	2,1	2,8	4800	4078
9	N4E	5,4	32,3	35,7	16,1	87,6	81,5	77,5	0,1	1,3	3750	4160
10	N4WN	2,9	36,7	35,7	8,9	83,5	81,5	88,3	0,5	1,3	4138	4160
11	N4W – Central	4,2	33,6	35,7	11,7	81,8	81,5	84,4	0,2	1,3	3750	4160
12	N5E	3,8	38,9	35,7	11,9	87,4	81,5	84,1	0,2	1,3	4444	4160
13	25/abr	3,5	35,3	32,0	8,8	85,2	74,7	88,1	0,6	1,9	4286	3871
14	02/mai	3,2	35,2	34,3	9,9	86,2	82,9	86,7	0,4	0,3	4800	4000
15	08/mai	3,1	35,7	36,2	10,3	86,5	87,6	86,0	0,2	1,2	3750	4000
16	17/mai	3,3	36,8	41,3	9,7	87,2	84,4	87,3	0,3	0,8	5000	4615

A partir da Tabela 7.32 foram verificadas diferenças de até 10,5% entre a porcentagem passante em 0,045 mm obtida em laboratório e a esperada. Ainda observa-se que essas variações influenciaram diretamente a área específica dos produtos. Já para a

porcentagem passante em 0,007 mm a diferença máxima atingida foi menor, atingindo 4,5% no ensaio 16.

Após o trabalho de confirmação do tempo de moagem, foram realizados ensaios para verificar a influência de algumas variáveis operacionais sobre os produtos obtidos. Esses ensaios de moagem, conduzidos sob variadas condições operacionais, são descritos a seguir.

7.5.2 PORCENTAGEM DE SÓLIDOS

O objetivo desta etapa foi determinar a influência da porcentagem de sólidos no desempenho do moinho. As demais variáveis operacionais e a carga de bolas foram mantidas constantes. Assim, foram realizados ensaios em triplicata para as seguintes porcentagens de sólidos: 68, 70, 72, 74, 76, 78,6 e 80%, a fim de atingir a meta detalhada a seguir (amostragem do dia 13/03/2007):

- $P_{80} = 0,051$ mm;
- $P_{50} = 0,017$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 2,8%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 74,7%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 33,0%;
- Área específica = 4780 cm²/g.

No gráfico da Figura 7.15, observa-se a variação do P_{80} e do P_{50} em função da porcentagem de sólidos. A Tabela 7.30 apresenta todos os valores obtidos para os ensaios em diferentes porcentagens de sólidos.

Figura 7.15. Curvas de moagem x porcentagem de sólidos.

Tabela 7.30. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Porcentagem de sólidos.

Ensaio	% sólidos	P_{80}	P_{50}	% passante em 0,007 mm	% passante em 0,045 mm	% retida em 0,106 mm	Área específica
	%	mm	mm	%	%	%	cm ² /g
Alimentação		11,12	2,25	3,7	9,8	86,7	
17	68,0	0,048	0,017	31,5	78,1	3,3	4000
18	68,0	0,046	0,016	32,8	79,4	2,4	4286
19	68,0	0,050	0,018	29,6	76,3	4,8	4000
20	70,0	0,044	0,016	33,4	80,7	2,6	4138
21	70,0	0,045	0,016	32,1	80,1	2,5	4000
22	70,0	0,046	0,017	30,9	79,5	2,3	4286
23	72,0	0,043	0,016	32,3	81,6	1,4	4286
24	72,0	0,044	0,016	32,3	81,1	1,4	4000
25	72,0	0,043	0,016	31,4	81,3	1,4	4444
26	74,0	0,042	0,016	32,8	82,2	1,2	4286
27	74,0	0,042	0,015	33,1	82,2	1,3	4286
28	74,0	0,043	0,016	32,5	81,9	1,1	4286
29	76,0	0,040	0,015	33,1	83,4	1,1	4444
30	76,0	0,039	0,014	34,6	85,1	0,7	4444
31	76,0	0,039	0,014	34,6	84,6	0,4	4286
32	78,6	0,038	0,014	35,4	85,6	0,1	4615
33	78,6	0,038	0,014	35,2	85,5	0,4	4286
34	78,6	0,036	0,013	36,1	86,4	0,3	4800
35	80,0	0,029	0,012	38,4	87,9	0,3	4615
36	80,0	0,036	0,013	37,5	87,1	0,6	4800
37	80,0	0,036	0,013	37,6	87,3	0,7	4615

Embora a meta fosse atingida a partir de 70% de sólidos ($P_{50} = 0,017$ mm e $P_{80}=0,051$ mm), nas moagens com maior porcentagem de sólidos observaram-se produtos com menor porcentagem retida em 0,106 mm e maiores porcentagens passante em 0,045 mm e 0,007 mm, porém com a área específica mais próxima da desejada. Esse parâmetro constitui-se em um importante índice de qualidade do *pellet feed* e, por isso, foi selecionada a porcentagem de sólidos cujos produtos apresentaram a maior área específica: 80% de sólidos.

A Figura 7.16 mostra a variação da área específica em função da porcentagem de sólidos. É possível verificar que a área específica varia linearmente com a porcentagem de sólidos da moagem.

Figura 7.16. Gráfico da área específica x porcentagem de sólidos.

7.5.3 PORCENTAGEM DE GRANULADO (NP2)

O *sinter feed* amostrado no circuito industrial (dia 01/03/2007) apresenta 1,3% da massa retida em 10 mm, o produto granulado apresenta aproximadamente 80,0%, enquanto que a média obtida para as diferentes amostras de ROM é de 14,4%. Devido a essa variação, observam-se diferentes granulometrias da alimentação empregada nos ensaios de moagem.

O objetivo desta etapa foi verificar a influência que o produto granulado exerce sobre o produto da moagem. Para tanto foram realizados ensaios sob diferentes porcentagens de NP2/*sinter feed*. As demais variáveis operacionais e a carga de bolas foram mantidas

constantes. Assim, foram realizados ensaios com as seguintes porcentagens de NP2: 5, 10, 15, 20, 30, 40 e 50%. A meta a ser atingida era o *overflow* do ciclone no dia da amostragem:

- $P_{80} = 0,045$ mm;
- $P_{50} = 0,015$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 2,0%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 78,8%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 33,4%;
- Área específica = 3900 cm²/g.

A Tabela 7.31 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios conduzidos com variação da porcentagem de NP2.

Tabela 7.31. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto dos ensaios de moagem – Porcentagem de NP2.

Teste	NP2	P_{80}		P_{50}		% passante em 0,007 mm		% passante em 0,045 mm		% retida em 0,106 mm		Área específica
		%	mm	%	mm	%	%	%	%	%	cm ² /g	
		Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	
38	5	5,98	0,032	1,77	0,015	1,9	34,2	6,1	83,9	8,7	0,9	4286
39	10	6,07	0,045	1,84	0,016	2,5	31,7	6,5	79,8	9,2	3,1	4000
40	15	8,00	0,028	2,73	0,014	1,9	33,8	5,3	84,4	7,7	1,6	4286
41	20	9,29	0,033	2,56	0,012	1,9	37,3	5,3	89,2	7,6	0,6	4444
42	30	11,83	0,039	3,84	0,014	1,6	35,5	4,5	84,2	6,5	1,8	4286
43	40	12,61	0,039	4,67	0,014	1,8	33,3	5,0	84,2	7,0	2,2	4000
44	50	12,61	0,039	7,90	0,014	1,2	34,5	3,5	85,2	5,1	2,9	4444

Observando os parâmetros de granulometria e o gráfico da Figura 7.17, verifica-se que os produtos obtidos com porcentagens de NP2 superiores a 15% apresentam granulometria semelhante à do *overflow* do ciclone (indicada no gráfico como linhas na cor dos marcadores).

Figura 7.17. Gráfico do tamanho de partícula x porcentagem de NP2.

É interessante notar que a moagem de minérios compostos por menores quantidades de NP2 resultou em P_{80} menores, com exceção da mistura com 10% de NP2, e já para o P_{50} tal comportamento não se repetiu.

Também foram avaliadas as características químicas do granulado relacionadas aos teores de impurezas, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 7.32 e no Anexo 6 – Resultados dos Ensaio de Moagem.

Tabela 7.32. Sumário dos resultados de análise química do produto dos ensaios de moagem – Porcentagem de NP2.

Elementos	Meta	Porcentagem de NP2 (%)						
		5	10	15	20	30	40	50
Fe	67,02	66,75	67,01	66,84	66,93	66,81	66,86	66,79
SiO ₂	1,03	1,02	0,95	0,98	0,98	1,03	1,00	1,09
P	0,03	0,04	0,038	0,043	0,04	0,04	0,04	0,04
Al ₂ O ₃	0,74	0,98	0,88	0,94	0,90	0,99	0,93	0,94
Mn	0,35	0,24	0,22	0,24	0,22	0,21	0,26	0,23

Apesar dos limites especificados de teores de impurezas serem atingidos, são observados teores mais altos de Al₂O₃ para as misturas de minérios compostas por maior quantidade de NP2. Neste caso, a porcentagem de NP2 ficou limitada a 50%.

7.5.4 TAMANHO DE BOLAS

Com o intuito de analisar a influência do tamanho das bolas sobre a distribuição granulométrica do produto da moagem foram conduzidos ensaios com diferentes tamanhos máximo de bolas. As demais variáveis operacionais foram mantidas constantes. Foram selecionados quatro *top sizes* de bolas, quais sejam, 50, 60, 75 e 80 mm. Os colares de bolas foram calculados e a distribuição de tamanhos de cada carga é apresentada na Tabela 7.33.

Tabela 7.33. Distribuição de tamanhos das cargas de bolas.

Top Size (mm)	50	60	75	80
Tamanho (mm)	Porcentagem retida simples (%)			
80	0	0	0	33
75	0	0	33	0
60	0	33	54	54
50	33	41	11	11
40	37	19	2	2
30	18	7	0	0
20	12	0	0	0

A meta a ser atingida foi o *overflow* do ciclone na amostragem no circuito industrial do dia 29 de maior de 2007, com as seguintes características:

- $P_{80} = 0,029$ mm;
- $P_{50} = 0,012$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 0,3%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 94,0%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 38,4%;
- Área específica = 4615 cm²/g.

A Tabela 7.34 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios com variação do *top size* dos corpos moedores.

Tabela 7.34. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem –
Top size das bolas.

Teste	<i>Top size</i> bolas (mm)	P_{80}	P_{50}	% passante em 0,007 mm	% passante em 0,045 mm	% retida em 0,106 mm	Área específica
	%	mm	mm	%	%	%	cm ² /g
Alimentação		5,831	1,427	4,4	13,0	84,2	
45	50	0,026	0,013	36,3	90,1	0,7	4615
46	50	0,025	0,010	40,7	93,6	0,5	5217
47	50	0,029	0,012	38,4	91,1	0,7	4615
48	60	0,037	0,012	39,7	86,2	1,3	5000
49	60	0,028	0,013	36,0	89,9	0,4	4800
50	60	0,032	0,012	38,7	89,2	0,7	4444
51	75	0,037	0,016	34,6	83,7	2,0	4286
52	75	0,047	0,014	39,5	79,0	3,0	4138
53	75	0,041	0,016	33,8	82,3	1,9	4000
54	80	0,053	0,018	31,9	74,9	3,4	4286
55	80	0,050	0,018	30,4	77,1	3,9	4138
56	80	0,047	0,014	37,4	79,0	2,6	4000

Os ensaios de moagem com cargas de bolas com tamanho máximo de 50 e 60 mm apresentaram produtos com parâmetro de área específica semelhantes entre si, mas, quando comparados àqueles obtidos nos ensaios com cargas de bolas de 75 e 80 mm, foram significativamente menores. Já para cargas com bolas de menor tamanho, que geraram maior quantidade de produto fino, verificou-se também decréscimo significativo da quantidade de material retido em 0,106 mm. Esse fenômeno é desejável para o *overflow* da classificação no circuito industrial.

Os resultados, apresentados na Figura 7.18, demonstram a tendência de diminuição da quantidade de finos gerados em função do aumento do tamanho máximo de bolas. Observa-se que os produtos gerados que melhor atendem às especificações da granulometria são resultantes de ensaios com cargas de bolas com tamanho máximo de 50 e 60 mm.

Figura 7.18. Gráfico de parâmetros da granulometria x tamanho máximo de bolas.

7.5.5 ROTAÇÃO

Para verificar a influência da rotação no produto da moagem, ensaios foram conduzidos em rotações de 54, 56 e 58 rpm. As demais variáveis operacionais foram mantidas constantes e a carga de bolas padrão foi utilizada. Tais ensaios, realizados em triplicata, tinham como meta atingir o *overflow* do ciclone no dia da amostragem no circuito industrial (02/08/2007), com as seguintes características:

- $P_{80} = 0,045$ mm;
- $P_{50} = 0,013$ mm;
- Porcentagem retida em 0,106 mm = 1,9%;
- Porcentagem passante em 0,045 mm = 79,7%;
- Porcentagem passante em 0,007 mm = 35,7%;
- Área específica = 3636 cm²/g.

A Tabela 7.35 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios com variação da rotação do moinho.

Tabela 7.35. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem – Rotação.

Ensaio	Rotação	P_{80}	P_{50}	% passante em 0,007 mm	% passante em 0,045 mm	% retida em 0,106 mm	Área específica
	rpm	mm	mm	%	%	%	cm ² /g
Alimentação		0,47	0,20	4,7	11,2	53,4	
57	58	0,041	0,017	34,2	83,4	0,7	3529
58	58	0,043	0,017	34,5	81,8	1,3	3871
59	58	0,042	0,017	33,7	82,9	0,6	3750
60	54	0,041	0,016	34,0	83,5	0,4	4000
61	54	0,044	0,018	31,7	81,0	0,5	3750
62	54	0,041	0,017	34,1	83,6	0,4	3871
63	50	0,051	0,021	30,0	75,2	1,4	2818
64	50	0,043	0,017	33,3	82,0	0,6	3069
65	50	0,048	0,018	33,1	77,5	0,7	3529

Considerando os parâmetros de granulometria anteriormente mencionados, observa-se que, em rotações mais baixas, a distribuição granulométrica dos produtos moídos se torna mais grossa. A partir da média obtida para a fração passante em 0,007 mm para cada rotação, traçou-se o gráfico apresentado na Figura 7.19. Foi verificada uma relação linear entre esse parâmetro e a rotação do moinho, ou seja, a quantidade de material passante em 0,007 mm no produto da moagem decresce com a diminuição da rotação.

Figura 7.19. Gráfico da porcentagem passante em 0,007 mm x rotação.

A partir dos resultados obtidos em laboratório, constata-se que os produtos cuja granulometria melhor se ajusta àquela do *overflow* amostrado são aqueles obtidos nos ensaios que foram realizados sob rotação de 58 rpm, que corresponde a 76% da velocidade crítica do moinho.

7.5.6 GRAU DE ENCHIMENTO

Ensaio com diferentes graus de enchimento do moinho foram realizados para verificar como essa variável influencia a granulometria dos produtos obtidos. Foram realizados ensaios em triplicata com 32, 35 e 38% de enchimento. Para tanto, a carga de bolas padrão foi utilizada e as demais variáveis operacionais foram mantidas constantes. A meta a ser atingida foi o *overflow* do ciclone no dia da amostragem no circuito industrial (02/08/2007), apresentada anteriormente na subseção 7.5.5. A Tabela 7.36 apresenta os parâmetros obtidos nos ensaios com variação do grau de enchimento do moinho.

Tabela 7.36. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de moagem –
Grau de enchimento.

Ensaio	Grau de enchimento	P_{80}	P_{50}	% passante em 0,007 mm	% passante em 0,045 mm	% retido em 0,106 mm	Área específica
	%	mm	mm	%	%	%	cm ² /g
Alimentação		0,47	0,20	4,7	11,2	53,4	
66	32	0,043	0,017	33,5	82,0	0,5	4615
67	32	0,043	0,017	34,2	81,6	0,6	3636
68	32	0,044	0,017	33,3	80,5	0,6	3636
69	35	0,041	0,017	34,2	83,4	0,7	4000
70	35	0,043	0,017	34,5	81,8	1,3	3750
71	35	0,042	0,017	33,7	82,9	0,6	3871
72	38	0,041	0,016	34,7	85,1	0,4	5000
73	38	0,038	0,014	36,7	89,0	2,0	4000
74	38	0,037	0,015	36,2	89,3	0,3	4615

No gráfico exibido da Figura 7.20 observa-se que produtos com maior quantidade de material passante em 0,007 mm são obtidos em rotações mais altas. Tal comportamento também ocorreu para a porcentagem passante em 0,045 mm. Além disso, e com base nos parâmetros de granulometria já mencionados, pode-se concluir que os produtos obtidos apresentaram resultados mais próximos à meta com grau de enchimento de 35%.

Figura 7.20. Distribuição granulométrica dos produtos moídos a 32, 35 e 38% de enchimento.

7.5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CONSOLIDAÇÃO DO ENSAIO PADRÃO

O parâmetro selecionado para estimar a qualidade de predição dos dados obtidos em laboratório foi a soma ponderada das diferenças (SPD). Assim, foi atribuída uma precisão padrão de 10% e então calculada a SPD. Para determinar a SPD, a diferença entre os dados de laboratório (X_{lab}) e os dados obtidos do *overflow* do ciclone de classificação (X_{OF}) deve ser normalizada dividindo-a por sua precisão, conforme a equação:

$$SPD = \frac{X_{lab} - X_{OF}}{0.1 \times X_{OF}}$$

Para verificar as condições operacionais, os dados foram agrupados de acordo com a variável de interesse, de maneira que as demais condições permanecessem constantes. As SPDs foram calculadas para as seis variáveis e para cada condição de moagem:

- SPD_1 – referente à porcentagem passante em 0,007 mm;
- SPD_2 – referente à porcentagem passante em 0,045 mm;
- SPD_3 – referente à porcentagem retida em 0,106 mm;
- SPD_4 – referente à área específica;
- SPD_5 – referente ao P_{80} ; e
- SPD_6 – referente ao P_{50} .

Posteriormente os valores foram somados, o que permitiu a determinação do SPD_{total} de cada ensaio. Os valores dos SPD obtidos para cada ensaio são apresentados no Anexo 7 – Análise dos Ensaios de Moagem. A Tabela 7.37 apresenta, de maneira hierarquizada, os valores de SPD_{total} dos três melhores ensaios, para cada condição de moagem analisada.

Tabela 7.37. Análise estatística dos ensaios de moagem.

Ensaio	% sólidos	SPD_{total}	Ensaio	% NP2	SPD_{total}	Ensaio	Tamanho de bolas (mm)	SPD_{total}
37	80,0	5,81	43	40	3,42	49	60	6,83
36	80,0	6,80	42	30	5,25	50	60	8,52
33	78,6	7,12	39	10	7,28	46	50	13,49

Ensaio	Rotação (rpm)	SPD_{total}	Ensaio	Grau de enchimento (%)	SPD_{total}
58	58	7,37	73	38	5,55
57	58	11,31	69	35	6,65
59	58	12,30	70	35	7,07

As condições que apresentaram menor SPD foram então determinadas, definindo o teste padrão:

- Porcentagem de sólidos: 80%;
- % NP2: 10-50%;
- *Top size* das bolas: 60 mm;
- Grau de enchimento: 35%; e
- Rotação: 58 rpm.

Uma vez que, no dia da amostragem (13/03/2007), o *overflow* do ciclone apresentou granulometria mais grosseira do que aquela rotineiramente observada para esse fluxo – o que pode ser confirmado pela porcentagem retida de 2,8% na fração 0,106 mm e pelo P_{80} de 0,051 mm -, realizou-se uma segunda análise para a porcentagem de sólidos, na qual valores médios dos parâmetros de granulometria e área específica foram analisados. Desta maneira, ensaios com menor porcentagem de sólidos passaram a apresentar SPD mais altos pois resultaram em produtos mais grossos do que a meta. Os valores apresentados na Tabela 7.37 são aqueles obtidos nesta segunda análise.

Assim, com base nas indicações da análise estatística, pode-se afirmar que o conjunto de condições selecionadas para o teste padrão representa com melhor fidelidade o desempenho do circuito industrial de Carajás.

7.6 SIMULAÇÕES

7.6.1 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO DO ENSAIO PADRÃO

Para simular o desempenho de quatro tipos de minério através do ensaio padrão, amostras coletadas nas principais frentes de lavra de Carajás: N4W Central, N4E, N4WN e N5W, foram submetidas a ensaios em triplicata. Um sumário dos resultados dos ensaios de moagem é apresentado na Tabela 7.38, e resultados detalhados no Anexo 8 – Resultados das Simulações pelo Ensaio Padrão.

Tabela 7.38. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e do produto obtidos na simulação pelo Ensaio Padrão.

Ensaio	Minério	P_{80}		P_{50}	
		mm		mm	
		Alim.	Prod.	Alim.	Prod.
75	N4W Central	2,70	0,040	0,45	0,016
76		2,70	0,041	0,45	0,015
77		2,70	0,043	0,45	0,017
78	N4E	5,02	0,034	0,63	0,014
79		5,02	0,034	0,63	0,014
80		5,02	0,034	0,63	0,015
81	N4WN	10,0	0,038	2,78	0,014
82		10,0	0,036	2,78	0,013
83		10,0	0,041	2,78	0,016
84	N5W	9,64	0,033	2,66	0,011
85		9,64	0,032	2,66	0,011
86		9,64	0,033	2,66	0,011

Ensaio	Minério	% passante em 0,007 mm		% passante em 0,045 mm		% retida em 0,106 mm		Área específica
		%		%		%		cm ² /g
		Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	
75	N4W Central	4,2	34,4	11,7	83,8	15,6	0,2	3529
76		4,2	34,6	11,7	83,7	15,6	0,3	3636
77		4,2	31,6	11,7	81,4	15,6	0,1	3871
78	N4E	5,4	33,5	16,1	89,9	19,3	1,2	3750
79		5,4	34,5	16,1	89,9	19,3	1,3	3636
80		5,4	32,9	16,1	89,9	19,3	1,4	3529
81	N4WN	2,9	36,9	8,9	85,9	11,7	0,2	4286
82		2,9	38,2	8,9	87,3	11,7	0,1	4000
83		2,9	35,1	8,9	83,0	11,7	0,2	3871
84	N5W	3,8	40,3	11,9	88,9	15,9	0,1	4615
85		3,8	40,7	11,9	90,2	15,9	0,2	5217
86		3,8	40,7	11,9	89,2	15,9	0,3	4444

As análises dos resultados da Tabela 7.38 indicam:

- Os maiores valores de P_{80} do produto foram obtidos para a amostra N4W Central, mesmo sendo a amostra de alimentação mais fina dentre as aqui analisadas;
- A mesma amostra N4W Central apresentou menor fração passante em 0,045 mm e valores relativamente baixos da fração passante em 0,007 mm;
- Embora seja considerada a amostra mais grossa dentre as simuladas, a amostra N4W Central não apresentou a menor quantidade de finos ou a menor área específica. Trata-se de um tipo de minério peculiar, cujo produto simulado apresenta material grosso e quantidade moderada de finos;
- A amostra N5W apresentou alimentação relativamente grossa e produto com maior quantidade relativa de finos ($< 0,007$ mm);
- Além da maior quantidade de finos, o tipo N5W mostrou o produto mais fino, em todas as malhas analisadas, com maior área específica dentre as quatro amostras selecionadas;
- A amostra N4WN apresentou resultados similares à amostra N5W, quais sejam alimentação grossa e produtos finos, ainda que não os mais finos dentre as quatro amostras submetidas ao ensaio padrão;
- A mesma amostra N4WN apontou valores relativamente altos de área específica, função da elevada geração de finos;
- Os resultados obtidos para a amostra N4E podem ser considerados intermediários ao grupo N5W/N4WN e a amostra N4W Central, respectivamente com maior e menor geração de finos;
- Os resultados da amostra N4E indicaram quantidade passante na fração 0,045 mm relativamente alta e a maior quantidade retida na fração 0,106 mm;
- Das análises acima, podem ser estabelecidos três grupos de amostras, quais sejam, N5W/N4WN; N4E e N4W Central para efeito de desempenho no circuito de moagem, conforme previsões baseadas no ensaio padrão.

7.6.2 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO PELO *JKSimMet*

Os mesmos quatro tipos de minério submetidos ao ensaio padrão foram simulados tendo por base o modelo calibrado referente ao circuito integrado de moagem de Carajás. Com base nos resultados obtidos em simulações preliminares, variações na vazão de alimentação do circuito foram simuladas para ajustar as características dos produtos obtidos. Assim, diminuições ou aumentos gradativos da vazão de alimentação foram simulados de forma a garantir a especificação da granulometria do *overflow* dos ciclones de classificação. Nas Tabelas 7.39 e 7.40 são apresentados os resultados de parâmetros referentes à distribuição granulométrica, vazões, cargas circulantes e partições dos ciclones. Os resultados em maior detalhe são apresentados no Anexo 9 – Resultados das Simulações pelo *JKSimMet*.

Tabela 7.39. Sumário dos parâmetros de distribuição granulométrica da alimentação e *overflow* obtidos na simulação pelo *JKSimMet*.

Minério	Linha	Vazão de alimentação (t/h)	P_{80}		P_{50}	
			mm		mm	
			Alim.	O/F	Alim.	O/F
CB	MO I	431	6,081	0,051	1,726	0,014
	MO II	416	5,757	0,079	1,389	0,024
N4E	MO I	540	5,026	0,052	0,627	0,016
	MO II	500	5,031	0,062	0,628	0,017
N4W Central	MO I	330	2,704	0,057	0,449	0,020
	MO II	310	2,704	0,062	0,449	0,021
N4WN	MO I	400	9,633	0,053	2,783	0,018
	MO II	380	9,633	0,061	2,783	0,020
N5W	MO I	410	3,755	0,051	1,072	0,017
	MO II	390	9,385	0,061	2,659	0,019

Minério	Linha	Vazão de alimentação (t/h)	% retida em 0,106 mm		% passante em 0,045 mm		% passante em 0,007 mm	
			%		%		%	
			Alim.	O/F	Alim.	O/F	Alim.	O/F
CB	MO I	431	85,05	3,07	12,73	76,64	4,07	35,46
	MO II	416	84,43	9,92	11,83	63,65	3,62	28,41
N4E	MO I	540	77,54	3,10	16,08	75,58	5,41	35,60
	MO II	500	77,51	6,46	16,10	71,21	5,42	34,96
N4W Central	MO I	330	82,51	3,76	13,97	72,44	5,34	30,42
	MO II	310	82,51	5,71	13,97	70,01	5,34	30,11
N4WN	MO I	400	88,31	2,98	8,90	76,64	2,91	33,12
	MO II	380	88,31	5,52	8,90	63,65	2,91	32,48
N5W	MO I	410	84,12	2,45	11,91	75,66	3,81	33,80
	MO II	390	84,11	5,68	11,91	70,81	3,81	32,83

Tabela 7.40. Sumário dos parâmetros operacionais das simulações pelo *JKSimMet*.

Minério	Linha	Vazão de alimentação (t/h)	Carga circulante (%)	Partição (%)
Caso Base	MO I	431	360	78,3
	MO II	416	307	73,4
N4E	MO I	540	285	74,0
	MO II	500	227	69,4
N4W Central	MO I	330	509	83,6
	MO II	310	434	81,3
N4WN	MO I	400	363	78,4
	MO II	380	301	75,0
N5W	MO I	410	358	78,2
	MO II	390	283	73,9

Na Figura 7.21 é possível comparar as curvas de distribuição granulométrica do produto obtido no Caso Base e do *overflow* dos ciclones de classificação da simulação, para os quatro tipos de minério de Carajás.

Figura 7.21. Gráficos de distribuição granulométrica dos *overflows* dos ciclones de classificação obtido no Caso Base e nas simulações.

As análises dos dados listados nas Tabelas 7.39 e 7.40 e os gráficos da Figura 7.21 indicam que:

- O minério N5W apresentou vazões similares ao caso base, em ambas as linhas de moagem;
- Além das vazões de alimentação, cargas circulantes são também bastante próximas entre o caso base e os resultados das simulações para o minério N5W;
- As granulometrias do caso base e resultados das simulações do minério N5W são próximas, sendo que os produtos simulados são mais finos em ambas as linhas, a menos da quantidade passante em 0,007 mm no produto da linha I (MO I). Os produtos simulados da linha I são os mais próximos ao caso base;
- Os resultados obtidos para a simulação da amostra do minério N4WN são bastante próximos aos obtidos para o tipo N5W, conforme comentários acima;
- As vazões de alimentação da simulação com minério N4WN são menores que as obtidas para o minério N5W, assim como as granulometrias são muito próximas, exceção feita à porcentagem passante em 0,045 mm obtida para a linha II, valor este muito mais próximo do caso base do que o obtido para o minério N4WN;
- Das observações acima nota-se que os resultados de vazão e granulometria são muito próximos para o minério N4WN e N5W e ambos similares ao caso base;
- Os resultados obtidos para a amostra N4W Central indicaram as menores vazões de alimentação, em ambas as linhas, dentre todas as simulações realizadas;
- A granulometria da linha I (MO I) simulada para o minério N4W Central é mais grossa do que o Caso Base, enquanto que na linha II (MO II) o produto foi mais fino do que o Caso Base;
- Para melhor ajustar os produtos da simulação com minério N4W Central seria necessário alterar outras condições de operação, tais como: pressão e porcentagem de sólidos na alimentação dos ciclones, ou ainda a quantidade de água adicionada aos moinhos;
- O minério N4E apontou resultados bastante diferentes dos demais, com vazões de alimentação significativamente maiores do que o Caso Base, que assim somaram 1040 t/h ante 847 t/h do Caso Base, um aumento de 23%;

- Muito embora a vazão fosse mais alta, as cargas circulantes de ambas as linhas foram menores para o minério N4E, conforme mostram as simulações;
- Em termos de granulometria, a linha II (MO II) da simulação do minério N4E apontou um produto mais fino, enquanto que a linha I (MO I) mostrou resultados muito próximos ao Caso Base.

8 CONCLUSÕES

A revisão detalhada dos conceitos e técnicas de amostragem e caracterização de minérios serviu de base para o levantamento de dados e informações relativas aos trabalhos práticos realizados na mina e na usina de moagem de Carajás.

A evolução da qualidade dos dados, verificada nas três amostragens realizadas, demonstra o entendimento da operação do circuito industrial, assim como sucesso da adaptação das técnicas para a realização das atividades práticas.

Os recursos para realização de balanços de massas e ajuste dos modelos foram fundamentais para avaliar a qualidade do trabalho experimental, quer seja da amostragem, como do tratamento de amostras e caracterização de minérios.

A realização de 86 ensaios de moagem em bancada, cada um com análises detalhadas de produtos, resultou em um recurso robusto para comparação de diferentes tipos de minérios que ocorram nas minas de Carajás. Mediante a análise dos resultados do ensaio padrão é possível agrupar tipos similares de minério, classificando-os sob o enfoque de desempenho no processo de moagem e não apenas sob classificações físicas e/ou químicas convencionais.

Já o modelo matemático integrado do circuito de moagem permitiu prever o desempenho e, sobretudo, ajustar as variáveis de operação para a obtenção de produtos dentro das especificações. Com este recurso é possível, portanto, estabelecer o desempenho do minério simulado no circuito industrial em termos absolutos, ou seja, prever o desempenho sob condições otimizadas.

O produto do presente trabalho consiste, portanto, em dois recursos com aplicação direta no circuito industrial, quer para a utilização na melhora do desempenho, ou ainda como forma de planejamento de produção.

Minérios considerados como inadequados para a moagem podem ser simulados e revistos visando seu melhor aproveitamento sob aspectos técnicos e sobretudo econômicos, conforme as demandas de mercado.

A extensão do trabalho ao circuito de deslamagem é aqui recomendada, como forma de integrar todo o processamento industrial desta parte da usina de Carajás.

Da mesma forma, recomenda-se aplicar o estudo para outras usinas industriais, como recurso para melhor aproveitamento técnico e econômico de minérios de ferro brasileiros.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB-3253**: moinho de bolas - determinação do índice de trabalho. Rio de Janeiro, 1990.

AUSTIN, L. G.; KLIMPEL, R. R. The theory of grinding operations. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 56, n. 11, p. 18-29, Nov. 1964.

BERALDO, J. L. **Moagem de minérios em moinhos tubulares**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1987. 143 p.

BOND, F. C. The third theory of comminution. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, New York, v. 193, p. 484-494, jan. 1952.

BOND, F. C. General aspects of comminution: history. In: WEISS, N. L. **SME mineral processing handbook**. New York: Society of Mining Engineers, 1985. cap. 3A. p. 1-4.

BRASIL. Banco Central do Brasil. **Relatório de Inflação**: revisão do PIB 2007. 2007. p. 26-28. Disponível em: <www.bcb.gov.br/htms/relinf/port/2007/06/ri200706b2p.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2009.

CHARLES, R. J. Energy-size reduction relationships in comminution. **Transactions of SME/AIME**, New York, v. 208, p. 80-88, jan. 1957.

CHAVES, A. P. Classificação. In: CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. 3ª ed. São Paulo: Signus, 2001. v. 1, cap. 3. p. 151-232.

CHAVES, A. P. Moagem. In: CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios**. São Paulo: Signus, 2006. 3ª ed. v. 3, cap. 1. p. 571-652.

CHIEREGATI, A. C.; DELBONI JR., H. Nova metodologia de caracterização de minérios aplicada a projetos de moinhos AG/SAG. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 17., 2001, Águas de São Pedro. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. v. 3, p. 49-54.

CHIEREGATI, A. C. **Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios**. São Paulo, 2001. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

COELHO, C. E. S. Depósitos de ferro da Serra dos Carajás, Pará. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM, 1986. v. 2, cap. 3, p. 29-64.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Ferrosos do Sistema Norte. **Especificação de produtos**: operacional. Paraúpebas: CVRD, 2007. (Relatório Interno, 2007).

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Diretoria de Ferrosos do Sistema Norte. **Manual de operação**: moagem de *pellet feed*. Paraúpebas: CVRD, 2002. (Relatório Interno, jun. 2002).

DAMASCENO, E. C. **Disponibilidade, suprimento e demanda de minérios para metalurgia**. Rio de Janeiro: CETEM, 2006. 145 p. (Série Estudos e Documentos, v. 69).

DANA, J. D. **Manual de mineralogia**. 1ª ed. [1969] revisada por Cornelius Searle Hurlbut Jr. Tradução de Rui Ribeiro Franco. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1986. 642 p.

DELBONI JR., H. **Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones**. São Paulo, 1989. 182 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

DELBONI JR., H. **Tratamento de minérios**: cominuição e classificação. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 21 transparências (Anotações de Aula, PMI 2854).

DONDA, J. D. **Estudo do comportamento de um itabirito do quadrilátero ferrífero quanto à superfície**. São Paulo, 1998. 180 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

GALERY, R.; VALADÃO, G. E. S.; MONTENEGRO, L. C. M. Separação por tamanho. In: VALADÃO, G. E.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. 1ª ed. Belo Horizonte: UGMG, 2007. cap. 4, p. 61-84.

GY, P. M. The sampling of particulate materials: a general theory. In: SYMPOSIUM ON SAMPLING PRACTICES IN THE MINERALS INDUSTRY, 1976, Melbourne. **Proceedings...** Parkville: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1976. p. 17-34.

HOLMES, J.A. A Contribution to the study of comminution: a modified form of Kick's Law. **Transactions of the Institute of Chemical Engineering**, London, v. 35, p. 126–156, 1957.

HUKKI, R. T. Minerals beneficiation: proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick, and Bond. **AIIME Transactions**, New York, v. 220, p. 403-408, Jan. 1961.

JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER. Perfect mixing ball mill. In: JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER. **The JKSimMet steady state mineral processing simulator**: full manual. Version 5.1. Indooroopilly, Queensland, 2003. appendix A8, p. A69-A80

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York: Wiley, 1982. 491 p.

KELSALL, D. F. A further study of the hidraulic cyclone. **Chemical Engineering Science**, v. 2, p. 254-272, Dec. 1953.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits**: their simulation, optimisation, design, and control. New York: Elsevier Scientific, 1977. 342 p.

LYNCH, A. J.; RAO, T. C. Modeling and scale-up of hydrocyclone classifiers. In: INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS, 11., Cagliari, 1975. **Proceedings...** Cagliari: Istituto di Arte Mineraria, 1975. p. 245-269.

METSO MINERALS. **Autogenous and semi-autogenous mills**. Disponível em: <[www.metsominerals.com/inetMinerals/MaTobox7.nsf/DocsByID/98D81AA9871FF8B2C1256C5A0029D8C7/\\$File/AG_SAG_Mills_EN.pdf](http://www.metsominerals.com/inetMinerals/MaTobox7.nsf/DocsByID/98D81AA9871FF8B2C1256C5A0029D8C7/$File/AG_SAG_Mills_EN.pdf)>. Acesso em: 18 fev. 2008.

MOURÃO, M. B.; GENTILE, E. F. Visão geral do processo siderúrgico. In: MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007. cap. 1, p. 1-20.

NAGESWARARAO. K. A generalized model for hydrocyclone classifiers. **AusIMM Proceedings...** Parkville, v. 2, n. 300, p. 21, Dec. 1995.

NAPIER-MUNN, T. J. **Mineral comminution circuits**: their operation and optimisation. Indooroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996. 413 p.

NARAYANAN, S. S. Development of a laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill modelling and scale-up. Queensland, 1985. 209 p. Tese (Doutorado) – Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland, Queensland, 1985.

NASCHENVENG, A. C. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Ultrafértil**. São Paulo, 2003. 101 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PLITT, I. R. A mathematical model of the hydrocyclone classifier. **CIM Bulletin**, v. 69, n. 776, p. 114-123, dec. 1976.

PRASHER, C. L. **Crushing and grinding process handbook**. 1st ed. New York: Wiley, 1987. 474 p.

PRYOR, E. J. **Mineral processing**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 1965. 844 p.

ROWLAND JR., C. A. Using the Bond work index to measure operating comminution efficiency. **Minerals & Metallurgical Processing**, Littletown, v. 15, n. 4, p. 32-36, Nov. 1998.

SCHNEIDER, C. L.; NEUMANN, R. Considerações sobre a geração de superfície específica em minérios de ferro porosos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 19., 2002, Recife. **Anais...** Recife: Desktop Publishing, 2002. v. 1., p. 153-159.

SILVA, K.C.; SOUZA, E. S.; FIGUEIREDO, J. C.; MENDES, P. J. S. Determinação e utilização de funções quebra e seleção em moagem de minérios de ferro. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 37., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MINÉRIO DE FERRO, 8., 2007, Salvador. **Anais...** Salvador: ABM, 2007. v. 2; p. 610-621.

TAGGART, A. F. **Elements of ore dressing**. 2nd ed. v. 1. New York: Wiley, 1951. cap. 22, p. 388-433.

TAKANO, C. Processos de preparação de matérias-primas siderúrgicas. In: MOURÃO, M. B. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: ABM, 2007. cap. 2, p. 21-54.

VIANA, P. R. M. Prática industrial no beneficiamento de minério de ferro. In: VALADÃO, G. E.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao tratamento de minérios**. 1ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap 10, p. 191-210.

WALDE, D. H. G. Geologia do ferro. In: SCHOBENHAUS, C.; COELHO, C. E. S. **Principais depósitos minerais do Brasil**. Brasília: DNPM, 1986. v. 2, p. 2-6.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ALLEN, T. **Particle size measurement**. 5th ed. London: Chapman & Hall, 1997. v. 1, 806 p.

SANT'AGOSTINO, L. M.; KAHN, H. **Metodologia para caracterização tecnológica de matéria primas minerais**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas. São Paulo: EPUSP, 1997. 29 p.

GAUDIN, A. M. **Principles of mineral dressing**. New York: Mc-Graw-Hill Book Company, 1978. 554 p.

GOMES, J. I. A.; CARRISSO, R. C. C. **Aplicação da simulação de hidrociclones em circuitos de moagem**. Brasília: DNPM, 1985. 12p. (Série Tecnologia Mineral, v. 35).

LEWIS, F. M. General aspects of comminution. In: WEISS, N. L. **SME mineral processing handbook**. New York Society of Mining Engineers, 1985. section 3A, p. 3A1-3A53.

MORREL, S. An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits. **International Journal of Mineral Processing**. Amsterdam, v. 74, p. 133-141, 2004.

ANEXO 1 – DADOS EXPERIMENTAIS DE AMOSTRAGENS NO CIRCUITO DE MOAGEM

AMOSTRAGEM 1

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	95,58	100,0	100,0	100,0
37,1	93,55	100,0	100,0	100,0
31,5	91,87	100,0	100,0	100,0
25,0	90,71	100,0	100,0	100,0
19,0	88,43	100,0	100,0	100,0
16,0	87,07	100,0	100,0	100,0
12,5	85,05	100,0	100,0	100,0
10,0	81,16	100,0	99,92	100,0
8,0	78,31	100,0	99,86	100,0
6,3	72,31	100,0	99,74	100,0
4,0	62,61	99,99	99,30	100,0
2,0	46,21	99,77	97,08	100,0
1,0	33,57	99,15	92,25	100,0
0,50	24,28	97,73	82,81	100,0
0,25	23,86	94,76	63,54	99,90
0,15	14,22	89,42	36,11	99,42
0,106	12,97	61,67	17,07	97,57
0,075	11,83	44,01	7,70	92,60
0,045	10,32	32,53	4,04	80,82
0,038	9,72	30,45	3,51	77,22
0,026	9,13	24,44	2,36	65,24
0,019	6,84	21,66	1,97	58,42
0,014	5,27	18,70	1,68	50,73
0,009	3,38	15,31	1,32	40,90
0,007	1,08	13,05	1,22	34,66
Área específica (cm ² /g)				3636

Tamanho (mm)	AL MO II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	99,77	100,0	100,0	100,0
19,0	99,44	100,0	100,0	100,0
16,0	99,24	100,0	100,0	100,0
12,5	98,96	100,0	100,0	100,0
10,0	98,40	100,0	100,0	100,0
8,0	97,68	100,0	99,94	100,0
6,3	95,51	100,0	99,94	100,0
4,0	87,97	99,98	99,94	100,0
2,0	72,06	99,88	99,40	100,0
1,0	53,71	99,62	97,67	100,0
0,50	38,42	98,77	92,19	100,0
0,25	36,94	95,61	76,64	99,72
0,15	21,99	86,95	47,97	98,97
0,106	20,63	76,99	27,03	96,43
0,075	19,62	59,11	14,58	92,77
0,045	18,66	44,09	8,94	86,38
0,038	18,40	40,90	8,26	84,51
0,026	16,90	30,29	5,15	62,72
0,019	15,58	26,13	4,47	55,77
0,014	13,78	22,21	3,84	48,45
0,009	11,51	18,12	3,16	39,53
0,007	10,37	15,92	2,71	34,46
Área específica (cm ² /g)	4000			

Tamanho (mm)	U/F DESL	O/F DESL
1,0	100,0	100,0
0,50	98,05	99,71
0,25	97,67	99,71
0,15	95,62	99,61
0,106	89,40	99,32
0,075	78,70	98,64
0,045	64,88	97,19
0,038	61,19	96,90
0,026	42,02	94,48
0,019	34,92	93,32
0,014	27,43	92,06
0,009	18,19	89,64
0,007	13,33	85,77
Área específica (cm ² /g)	1765	10094

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m ³ /h)
Classificação I A e B	Alimentação	65,8	20,5	60,4	81,1	428,91	2015,8	3062,9	3795,9
	Overflow	31,4					381,1	1213,8	1352,4
	Underflow	88,4					1634,6	1849,2	2443,6
Classificação II B	Alimentação	60,8	16,6	49,0	69,9	232,28	1242,1	2043,1	2494,8
	Overflow	35,9					373,8	1041,9	1177,8
	Underflow	86,7					868,3	1001,2	1317,0
Deslamagem	Alimentação	33,6	44,1	60,5	92,7	-	754,9	2245,7	2520,2
	Overflow	6,2					55,1	887,7	907,8
	Underflow	51,5					699,8	1357,9	1612,4

ANÁLISES QUÍMICAS

Fluxo	AL MO I	A/L CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL. MO II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II	U/F DESL	O/F DESL
Fe	67,11	68,10	68,35	67,35	67,55	68,15	68,29	67,46	67,66	66,74
SiO ₂	0,77	0,65	0,62	0,76	0,75	0,64	0,61	0,77	0,72	0,86
P	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
Al ₂ O ₃	1,06	0,61	0,52	0,88	0,76	0,59	0,52	0,83	0,81	0,92
Mn	0,59	0,44	0,38	0,62	0,56	0,43	0,39	0,60	0,53	0,85
CaO	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
MgO	0,050	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05
TiO ₂	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
K ₂ O	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PPC	1,31	0,69	0,54	1,12	1,05	0,66	0,61	1,04	0,90	1,52

AMOSTRAGEM 2

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	98,32	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	97,99	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	97,30	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	96,26	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	95,42	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	93,71	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	90,29	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	87,25	100,0	100,0	99,97	100,0
6,3	80,89	99,99	99,99	99,96	100,0
4,0	69,23	99,94	99,94	99,86	100,0
2,0	52,74	99,68	99,68	99,49	100,0
1,0	40,58	99,21	99,21	98,26	100,0
0,5	30,64	96,69	96,69	93,53	100,0
0,25	22,35	87,59	87,59	80,10	99,13
0,15	17,38	67,41	67,41	55,56	97,53
0,106	14,95	56,33	56,33	33,91	90,03
0,075	13,70	43,59	43,59	17,68	81,71
0,045	12,74	29,61	29,61	7,10	70,05
0,038	11,89	26,85	26,85	5,89	66,86
0,026	10,40	20,90	20,90	3,85	56,27
0,019	9,05	18,17	18,17	3,32	50,07
0,014	7,28	15,27	15,27	2,82	42,96
0,009	5,19	11,98	11,98	2,30	34,40
0,007	4,06	10,05	10,05	1,93	29,12
Área Específica (cm ² /g)					3429

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	99,59	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	98,41	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	98,24	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	97,70	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	96,93	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	96,32	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	94,70	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	91,51	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	88,48	99,97	99,99	100,0	100,0
6,3	81,82	99,94	99,90	99,89	100,0
4,0	72,45	99,77	99,67	99,63	100,0
2,0	56,86	98,85	98,86	98,39	100,0
1,0	44,15	96,95	97,20	96,02	100,0
0,5	33,19	92,36	92,49	89,86	100,0
0,25	23,72	80,07	78,79	73,41	99,95
0,15	17,92	58,90	56,86	47,09	99,66
0,106	15,55	43,32	41,33	26,63	97,78
0,075	14,28	32,03	31,15	14,82	93,73
0,045	11,84	23,21	20,93	6,71	82,48
0,038	11,14	21,20	18,87	5,72	78,48
0,026	9,61	16,47	15,97	3,72	66,03
0,019	8,32	14,38	13,68	3,24	58,65
0,014	6,66	12,06	11,45	2,78	50,07
0,009	4,72	9,43	9,27	2,24	39,55
0,007	3,60	7,77	7,62	1,97	33,42
Área Específica (cm ² /g)					3640

Tamanho (mm)	U/F DESL.	O/F DESL.
1,0	100,0	100,0
0,5	100,0	100,0
0,25	99,08	99,81
0,15	97,03	99,41
0,106	88,65	97,07
0,075	79,69	93,42
0,045	60,78	86,59
0,038	55,54	84,40
0,026	43,38	77,82
0,019	36,98	73,34
0,014	29,81	69,68
0,009	21,03	65,11
0,007	15,80	60,18
Área Específica (cm ² /g)	1740	7203

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m ³ /h)
Classificação I B	Alimentação	53,1	24,60	53,39	78,79	371,45	1849,6	3481,3	4153,9
	Overflow	24,2					392,3	1622,7	1765,4
	Underflow	78,4					1457,3	1858,6	2388,6
Classificação II A	Alimentação	56,3	23,86	57,07	82,89	484,54	2430,8	4321,0	5205,0
	Overflow	22,4					415,9	1855,0	2006,2
	Underflow	81,7					2015,0	2466,0	3198,7
Deslamagem	Alimentação	23,3	25,99	36,13	69,56	-	808,2	3472,8	3766,7
	Overflow	11,1					246,0	2218,0	2307,4
	Underflow	44,8					562,2	1254,8	1459,2

ANÁLISES QUÍMICAS

Fluxo	AL MO I	MOINHO PROD I	U/F CLASS I	O/F. CLASS I	AL MO II	MOINHO PROD II	U/F CLASS II	O/F CLASS II	U/F DESL	O/F DESL
Fe	67,22	67,12	67,78	66,71	67,19	67,22	67,69	67,72	66,62	66,90
SiO ₂	0,99	1,05	0,99	1,16	1,13	0,94	0,89	0,84	1,04	1,07
P	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,76	0,59	0,53	0,69	0,70	0,60	0,58	0,49	0,73	0,68
Mn	0,49	0,46	0,40	0,58	0,50	0,43	0,44	0,37	0,62	0,50
CaO	0,029	0,018	0,016	0,023	0,018	0,026	0,017	0,016	0,023	0,022
MgO	0,050	0,030	0,027	0,036	0,047	0,029	0,031	0,028	0,036	0,034
TiO ₂	0,039	0,032	0,028	0,036	0,037	0,031	0,031	0,027	0,039	0,036
K ₂ O	0,017	0,016	0,015	0,017	0,017	0,016	0,015	0,015	0,017	0,016
PPC	1,35	1,69	0,95	1,89	1,30	1,67	1,06	1,27	2,03	1,82

AMOSTRAGEM 3

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	ALMO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
75,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
63,0	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	97,24	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	96,34	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	95,06	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	92,40	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	89,19	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	85,19	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	72,28	100,0	99,98	99,83	100,0
2,0	57,57	99,82	99,79	99,69	100,0
1,0	45,51	99,33	99,16	98,73	100,0
0,50	34,72	96,96	96,53	95,22	100,0
0,25	23,07	87,09	85,19	82,53	99,81
0,15	16,53	52,15	45,47	46,87	99,13
0,106	14,41	44,81	38,48	28,54	96,81
0,075	12,81	31,18	26,17	11,63	89,64
0,045	11,18	22,23	18,05	5,13	76,77
0,038	10,65	20,27	15,72	4,11	72,02
0,026	9,44	16,24	12,31	2,44	62,25
0,019	8,37	14,23	10,62	1,93	55,76
0,014	6,80	11,92	8,77	1,47	48,40
0,009	5,05	9,45	6,91	0,96	39,88
0,007	4,04	8,05	5,92	0,56	34,75
Área Específica (cm ² /g)	4,000				

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
100,0	91,06	100,0	100,0	100,0	100,0
75,0	91,06	100,0	100,0	100,0	100,0
63,0	91,06	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	91,06	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	91,06	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	90,57	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	89,19	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	87,71	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	86,58	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	84,37	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	81,48	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	77,16	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	71,77	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	64,17	99,90	99,87	99,87	100,0
2,0	51,49	99,47	99,56	99,54	100,0
1,0	40,07	98,39	98,41	98,68	100,0
0,50	29,83	94,53	93,72	95,59	100,0
0,25	19,77	80,39	79,35	82,75	99,62
0,15	14,14	51,86	54,12	55,75	96,99
0,106	12,36	37,80	39,82	27,71	90,40
0,075	10,93	26,93	29,11	13,80	78,74
0,045	9,49	20,04	22,35	8,42	64,72
0,038	8,90	18,40	20,27	7,30	60,49
0,026	7,91	14,76	17,10	5,28	51,55
0,019	6,99	12,96	15,49	4,69	46,00
0,014	5,80	10,82	13,57	4,00	39,79
0,009	4,32	8,48	11,44	3,25	32,36
0,007	3,46	7,03	10,14	2,82	27,75
Área Específica (cm ² /g)	3,636				

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
1,0	100,0	100,0	100,0
0,50	100,0	100,0	100,0
0,25	99,71	99,81	100,0
0,15	97,46	97,96	100,0
0,106	91,94	92,78	100,0
0,075	81,04	81,10	100,0
0,045	67,32	64,19	100,0
0,038	62,93	60,01	99,95
0,026	56,36	49,56	99,75
0,019	50,59	42,82	99,70
0,014	44,58	35,37	99,36
0,009	37,59	25,67	98,03
0,007	32,13	19,68	95,09
Área Específica (cm ² /g)	3,750	2,380	12,182

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m ³ /h)
Classificação I B	Alimentação	52,3	21,82	51,37	78,29	360	1978,4	3780,9	4500,3
	Overflow	23,4					429,5	1838,7	1994,9
	Underflow	79,8					1548,9	1942,2	2505,4
Classificação II B	Alimentação	58,4	25,77	54,67	75,26	304	1690,8	2895,3	3510,2
	Overflow	31,9					418,3	1312,4	1464,5
	Underflow	80,4					1272,5	1583,0	2045,7
Deslamagem	Alimentação	21,3	42,12	50,42	81,00	-	847,8	3971,7	4280,0
	Overflow	8,2					161,0	1969,3	2027,9
	Underflow	34,3					686,8	2002,4	2252,2

ANÁLISES QUÍMICAS

Fluxo	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
Fe	66,06	67,38	67,42	67,76	66,36	66,55	67,44	67,46	67,87	66,53
SiO ₂	1,58	0,94	0,91	0,79	1,27	1,27	0,90	0,89	0,77	1,20
P	0,02	0,02	0,02	0,013	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Al ₂ O ₃	1,39	0,75	0,70	0,57	1,19	1,11	0,72	0,71	0,54	1,12
Mn	0,35	0,29	0,28	0,26	0,38	0,41	0,28	0,28	0,24	0,34
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
TiO ₂	0,06	0,04	0,04	0,03	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,06
K ₂ O	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,98	1,50	1,53	1,34	2,03	1,80	1,49	1,49	1,27	1,98

Fluxo	AL DESL	U/F DESL	O/F DESL
Fe	66,41	66,62	65,12
SiO ₂	1,22	1,14	1,74
P	0,02	0,02	0,03
Al ₂ O ₃	1,15	1,10	1,48
Mn	0,37	0,34	0,53
CaO	0,01	0,01	0,01
MgO	0,02	0,02	0,02
TiO ₂	0,06	0,06	0,08
K ₂ O	0,01	0,01	0,02
PPC	2,06	1,94	2,78

ANEXO 2 – RESULTADOS DOS BALANÇOS DE MASSA

AMOSTRAGEM 1

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	95,58	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	93,55	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	91,87	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	90,71	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	88,43	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	87,07	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	85,05	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	81,16	99,97	99,97	99,96	100,0
8,0	78,31	99,95	99,95	99,94	100,0
6,3	72,31	99,91	99,91	99,89	100,0
4,0	62,61	99,75	99,75	99,70	100,0
2,0	46,21	98,14	98,14	97,70	100,0
1,0	33,57	95,22	95,22	94,08	100,0
0,500	24,28	89,01	89,01	86,44	99,90
0,250	23,86	74,91	74,91	69,03	99,78
0,150	14,22	54,24	54,24	43,62	99,18
0,106	12,97	36,44	36,44	22,11	97,08
0,075	11,83	25,98	25,98	10,50	91,48
0,045	10,32	19,71	19,71	5,67	79,14
0,038	9,72	18,34	18,34	4,85	75,45
0,026	9,13	14,97	14,97	3,39	63,96
0,019	6,84	13,20	13,20	2,78	57,30
0,014	5,27	11,37	11,37	2,29	49,79
0,009	3,38	9,10	9,10	1,75	40,19
0,007	1,08	7,70	7,70	1,49	33,96

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	99,99	99,99	99,98	100,0
37,1	100,0	99,97	99,97	99,96	100,0
31,5	100,0	99,96	99,96	99,94	100,0
25,0	99,77	99,95	99,95	99,92	100,0
19,0	99,44	99,93	99,93	99,91	100,0
16,0	99,24	99,92	99,92	99,89	100,0
12,5	98,96	99,91	99,91	99,87	100,0
10,0	98,40	99,90	99,90	99,85	100,0
8,0	97,68	99,86	99,86	99,80	100,0
6,3	95,51	99,85	99,85	99,78	100,0
4,0	87,97	99,83	99,83	99,75	100,0
2,0	72,06	99,61	99,61	99,44	100,0
1,0	53,71	99,29	99,29	98,98	100,0
0,500	38,42	98,25	98,25	97,51	99,93
0,250	36,94	94,32	94,32	91,98	99,66
0,150	21,99	78,74	78,74	69,91	98,86
0,106	20,63	64,74	64,74	50,89	96,30
0,075	19,62	46,40	46,40	26,21	92,39
0,045	18,66	34,60	34,60	12,39	85,20
0,038	18,40	33,12	33,12	11,22	83,02
0,026	16,90	23,93	23,93	7,15	62,17
0,019	15,58	21,08	21,08	6,17	55,06
0,014	13,78	18,24	18,24	5,28	47,77
0,009	11,51	14,97	14,97	4,37	39,14
0,007	10,37	13,10	13,10	3,75	34,41

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
1,0	100,0	100,0	100,0
0,500	99,92	99,94	99,73
0,250	99,72	99,67	99,73
0,150	99,02	98,73	99,63
0,106	96,70	95,62	99,34
0,075	91,93	89,30	98,66
0,045	82,14	76,37	97,21
0,038	79,20	72,43	96,92
0,026	63,07	51,17	94,50
0,019	56,19	42,15	93,34
0,014	48,79	32,46	92,08
0,009	39,67	20,85	89,66
0,007	34,18	14,83	85,78

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I A e B	Alimentação	65,7	21,05	60,37	80,88	423	1993,7	3034,0	3759,0
	Overflow	31,7					381,2	1202,5	1341,1
	Underflow	88,0					1612,5	1831,5	2417,9
Classificação II B	Alimentação	60,6	16,29	48,53	69,49	228	1225,5	2022,0	2467,7
	Overflow	35,9					373,9	1040,6	1176,6
	Underflow	86,8					851,6	981,4	1291,1
Deslamagem	Alimentação	31,1	30,85	43,88	72,74	-	755,1	2427,2	2701,8
	Overflow	15,1					205,8	1362,1	1436,9
	Underflow	51,6					549,3	1065,1	1264,9

ADIÇÃO DE ÁGUA AO PROCESSO

Local	Água (t/h)
U/F Classificação I	107,5
Produto Moagem I	682,0
U/F Classificação II	166,0
Produto Moagem II	466,1
Alimentação Deslamagem	184,2

AMOSTRAGEM 2

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
50,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
37,1	98,32	99,99	99,99	99,99	100,00
31,5	97,99	99,99	99,99	99,99	100,00
25,0	97,30	99,99	99,99	99,99	100,00
19,0	96,25	99,99	99,99	99,98	100,00
16,0	95,42	99,98	99,98	99,98	100,00
12,5	93,71	99,98	99,98	99,97	100,00
10,0	90,28	99,98	99,98	99,97	100,00
8,0	87,25	99,96	99,96	99,95	100,00
6,3	80,89	99,95	99,95	99,93	100,00
4,0	69,22	99,88	99,88	99,85	100,00
2,0	52,74	99,61	99,61	99,50	100,00
1,0	40,58	99,13	99,13	98,88	100,00
0,500	30,64	96,10	96,10	94,99	99,95
0,250	22,35	85,76	85,76	81,98	98,98
0,150	17,39	65,62	65,62	56,61	97,14
0,106	14,95	52,59	52,59	42,06	89,42
0,075	13,71	38,56	38,56	26,30	81,42
0,045	12,75	24,73	24,73	12,07	68,97
0,038	11,90	22,70	22,70	10,41	65,65
0,026	10,41	18,07	18,07	7,29	55,72
0,019	9,06	15,90	15,90	6,12	50,06
0,014	7,28	13,21	13,21	4,41	43,95
0,009	5,19	10,46	10,46	3,09	36,21
0,007	4,06	8,82	8,82	2,40	31,26

Tamanho (mm)	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	99,99
25,0	99,99	99,99	100,0	99,99
19,0	99,99	99,99	99,99	99,99
16,0	99,99	99,99	99,99	99,99
12,5	99,99	99,99	99,99	99,98
10,0	99,99	99,99	99,99	99,98
8,0	99,98	99,98	99,98	99,98
6,3	99,90	99,90	99,89	99,98
4,0	99,70	99,70	99,64	99,98
2,0	98,78	98,78	98,53	99,97
1,0	96,83	96,83	96,19	99,97
0,500	91,92	91,92	90,28	99,90
0,250	78,64	78,64	74,29	99,81
0,150	56,87	56,87	48,11	99,46
0,106	39,56	39,56	27,64	97,47
0,075	28,61	28,61	15,29	93,29
0,045	19,57	19,57	6,97	80,77
0,038	18,04	18,04	5,95	76,74
0,026	14,38	14,38	3,92	65,15
0,019	12,85	12,85	3,40	58,70
0,014	11,17	11,17	2,91	51,25
0,009	9,10	9,10	2,36	41,79
0,007	7,78	7,78	2,00	35,81

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
63,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0
37,1	100,0	100,0	99,99
31,5	100,0	100,0	99,99
25,0	100,0	100,0	99,98
19,0	99,99	100,0	99,98
16,0	99,99	100,0	99,98
12,5	99,99	100,0	99,97
10,0	99,99	100,0	99,97
8,0	99,99	100,0	99,96
6,3	99,99	100,0	99,96
4,0	99,99	100,0	99,96
2,0	99,99	100,0	99,95
1,0	99,99	100,0	99,95
0,500	99,93	100,0	99,74
0,250	99,41	99,27	99,74
0,150	98,33	97,79	99,67
0,106	93,56	91,20	99,38
0,075	87,51	82,98	98,70
0,045	75,03	66,02	97,26
0,038	71,35	60,97	96,97
0,026	60,57	46,86	94,40
0,019	54,50	38,84	93,16
0,014	47,71	29,84	91,82
0,009	39,09	18,78	89,22
0,007	33,61	12,77	85,04

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	50,7	22,28	50,41	77,75	349	1764,9	3479,7	4121,4
	Overflow	22,8					392,7	1725,4	1868,2
	Underflow	78,2					1372,2	1754,3	2253,2
Classificação II A	Alimentação	58,5	24,16	58,37	82,63	476	2388,4	4082,0	4950,5
	Overflow	24,4					414,8	1699,3	1850,1
	Underflow	82,8					1973,6	2382,7	3100,3
Deslamagem	Alimentação	22,8	25,81	36,13	71,12	-	807,5	3544,8	3838,4
	Overflow	10,3					233,2	2264,0	2348,8
	Underflow	44,8					574,3	1280,8	1489,6

ADIÇÃO DE ÁGUA AO PROCESSO

Local	Água (t/h)
U/F Classificação I	177,7
Produto Moagem I	1112,0
U/F Classificação II	165,3
Produto Moagem II	1075,0
Alimentação Deslamagem	119,6

AMOSTRAGEM 3

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	98,53	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	98,53	100,0	100,0	99,99	100,0
25,0	98,53	99,99	99,99	99,99	100,0
19,0	97,24	99,99	99,99	99,99	100,0
16,0	96,34	99,99	99,99	99,99	100,0
12,5	95,06	99,99	99,99	99,99	100,0
10,0	92,40	99,99	99,99	99,98	100,0
8,0	89,19	99,99	99,99	99,98	100,0
6,3	85,19	99,98	99,98	99,98	100,0
4,0	72,28	99,93	99,93	99,91	100,0
2,0	57,57	99,78	99,78	99,72	100,0
1,0	45,51	99,21	99,21	98,98	100,0
0,500	34,72	96,69	96,69	95,77	100,0
0,250	23,07	86,62	86,62	82,94	99,86
0,150	16,53	53,14	53,14	40,34	99,19
0,106	14,41	43,93	43,93	29,20	96,94
0,075	12,81	29,61	29,61	12,91	89,71
0,045	11,18	21,14	21,14	5,72	76,64
0,038	10,65	19,31	19,31	4,59	72,28
0,026	9,44	15,78	15,78	2,67	62,99
0,019	8,37	13,92	13,92	2,09	56,54
0,014	6,80	11,90	11,90	1,53	49,28
0,009	5,05	9,60	9,60	0,96	40,77
0,007	4,04	8,15	8,15	0,58	35,46

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	94,80	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	91,06	100,0	100,0	100,0	99,99
31,5	90,57	100,0	100,0	100,0	99,99
25,0	89,19	100,0	100,0	100,0	99,99
19,0	87,71	100,0	100,0	100,0	99,99
16,0	86,58	100,0	100,0	100,0	99,99
12,5	84,37	100,0	100,0	100,0	99,98
10,0	81,48	100,0	100,0	100,0	99,98
8,0	77,16	99,99	99,99	100,0	99,98
6,3	71,77	99,99	99,99	100,0	99,98
4,0	64,17	99,89	99,89	99,86	99,97
2,0	51,49	99,58	99,58	99,45	99,96
1,0	40,07	98,77	98,77	98,39	99,94
0,500	29,83	95,97	95,97	94,68	99,93
0,250	19,77	83,06	83,06	77,65	99,59
0,150	14,14	55,94	55,94	42,52	96,95
0,106	12,36	41,32	41,32	25,37	90,08
0,075	10,93	28,94	28,94	12,91	77,92
0,045	9,49	21,69	21,69	7,96	63,65
0,038	8,90	19,87	19,87	6,83	59,72
0,026	7,91	16,41	16,41	4,87	51,67
0,019	6,99	14,67	14,67	4,30	46,33
0,014	5,80	12,68	12,68	3,60	40,38
0,009	4,32	10,37	10,37	2,88	33,21
0,007	3,46	8,90	8,90	2,50	28,41

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
63,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0
37,1	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	99,99
25,0	100,0	100,0	99,99
19,0	99,99	100,0	99,99
16,0	99,99	99,99	99,99
12,5	99,99	99,99	99,98
10,0	99,99	99,99	99,98
8,0	99,99	99,99	99,98
6,3	99,99	99,99	99,98
4,0	99,99	99,99	99,97
2,0	99,98	99,98	99,97
1,0	99,97	99,97	99,97
0,500	99,97	99,97	99,96
0,250	99,73	99,68	99,94
0,150	98,09	97,68	99,94
0,106	93,56	92,16	99,93
0,075	83,92	80,40	99,93
0,045	70,26	63,75	99,93
0,038	66,11	58,70	99,87
0,026	57,43	48,16	99,67
0,019	51,53	40,98	99,61
0,014	44,92	32,99	99,27
0,009	37,07	23,71	97,93
0,007	32,01	18,19	94,99

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	52,3	21,91	51,34	78,23	359	1977,6	3784,2	4503,4
	Overflow	23,4					430,5	1841,3	1997,9
	Underflow	79,6					1547,1	1942,9	2505,5
Classificação II B	Alimentação	56,5	23,84	52,94	75,35	305	1690,2	2991,6	3606,2
	Overflow	29,6					416,7	1407,8	1559,3
	Underflow	80,4					1273,5	1583,8	2046,9
Deslamagem	Alimentação	21,6	43,43	51,76	82,02	-	847,2	3924,0	4232,1
	Overflow	8,0					152,3	1892,9	1948,3
	Underflow	34,2					694,9	2031,2	2283,8

ADIÇÃO DE ÁGUA AO PROCESSO

Local	Água (t/h)
U/F Classificação I	180,7
Produto Moagem I	1185,0
U/F Classificação II	198,7
Produto Moagem II	749,9
Alimentação Deslamagem	263,9

ANEXO 3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE MODELOS

AMOSTRAGEM 2

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	98,79	99,95	99,95	99,94	100,0
37,1	98,33	99,93	99,93	99,91	100,0
31,5	97,98	99,92	99,92	99,90	100,0
25,0	97,30	99,90	99,90	99,88	100,0
19,0	96,18	99,88	99,88	99,84	100,0
16,0	95,53	99,86	99,86	99,83	100,0
12,5	93,78	99,84	99,84	99,79	100,0
10,0	91,07	99,80	99,80	99,75	100,0
8,0	86,44	99,76	99,76	99,69	100,0
6,3	80,85	99,71	99,71	99,62	100,0
4,0	69,09	99,60	99,60	99,48	100,0
2,0	52,74	99,35	99,35	99,16	100,0
1,0	40,57	98,59	98,59	98,19	100,0
0,500	30,63	95,13	95,13	93,75	100,0
0,250	22,34	81,40	81,40	76,15	99,84
0,150	17,38	61,44	61,44	51,15	97,56
0,106	14,94	47,57	47,57	34,71	92,69
0,075	13,71	36,99	36,99	23,17	85,50
0,045	12,72	26,71	26,71	13,44	73,30
0,038	11,90	24,07	24,07	11,28	68,95
0,026	10,40	19,44	19,44	7,93	59,82
0,019	9,01	16,46	16,46	6,11	52,78
0,014	7,30	14,01	14,01	4,81	46,27
0,009	5,17	11,21	11,21	3,54	38,08
0,007	4,06	9,91	9,91	3,03	34,00

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II B	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	99,59	99,98	99,98	99,98	100,0
37,1	98,50	99,95	99,95	99,94	100,0
31,5	98,01	99,94	99,94	99,92	100,0
25,0	97,70	99,93	99,93	99,91	100,0
19,0	96,92	99,91	99,91	99,89	100,0
16,0	96,36	99,90	99,90	99,88	100,0
12,5	94,78	99,87	99,87	99,85	100,0
10,0	92,30	99,85	99,85	99,82	100,0
8,0	87,62	99,80	99,80	99,76	100,0
6,3	81,77	99,75	99,75	99,70	100,0
4,0	72,27	99,66	99,66	99,59	100,0
2,0	56,87	99,44	99,44	99,32	100,0
1,0	44,15	98,73	98,73	98,47	100,0
0,500	33,20	95,41	95,41	94,46	100,0
0,250	23,72	81,93	81,93	78,21	100,0
0,150	17,92	60,44	60,44	52,33	99,91
0,106	15,58	43,11	43,11	31,68	98,57
0,075	14,26	30,23	30,23	17,37	92,70
0,045	11,84	20,23	20,23	8,50	77,22
0,038	11,14	18,23	18,23	7,17	71,96
0,026	9,64	14,79	14,79	5,27	61,03
0,019	8,29	12,58	12,58	4,27	52,95
0,014	6,72	10,75	10,75	3,53	45,80
0,009	4,73	8,61	8,61	2,75	37,03
0,007	3,64	7,59	7,59	2,40	32,73

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
1,0	100,0	100,0	100,0
0,500	100,0	100,0	100,0
0,250	99,93	99,92	100,0
0,150	98,86	98,69	100,0
0,106	95,89	95,28	100,0
0,075	89,46	87,89	100,0
0,045	75,52	71,88	99,97
0,038	70,67	66,32	99,90
0,026	60,55	54,78	99,38
0,019	52,94	46,22	98,12
0,014	46,07	38,69	95,66
0,009	37,54	29,80	89,55
0,007	33,33	25,69	84,67

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	57,3	25,6	59,2	84,2	531	2478,4	4323,7	5224,9
	Overflow	22,3					392,7	1764,9	1907,7
	Underflow	81,5					2085,7	2558,8	3317,2
Classificação II A	Alimentação	57,3	25,0	58,2	83,0	486	2431,2	4241,5	5125,6
	Overflow	23,4					414,8	1773,4	1924,2
	Underflow	81,7					2016,4	2468,1	3201,3
Deslamagem	Alimentação	21,7	37,7	48,4	87,0	-	807,5	3726,3	4020,0
	Overflow	5,4					104,7	1924,2	1962,2
	Underflow	39,0					702,8	1802,2	2057,7

ADIÇÃO DE ÁGUA AO PROCESSO

Local	Água (t/h)
U/F Classificação I	217,5
Produto Moagem I	1112
U/F Classificação II	182,6
Produto Moagem II	1132
Alimentação Deslamagem	187,7

AMOSTRAGEM 3**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)**

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	AL CLASS I	U/F CLASS I	O/F CLASS I
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	98,53	94,80	99,99	99,99	100,0
37,1	98,50	91,29	99,99	99,98	100,0
31,5	98,50	90,07	99,99	99,98	100,0
25,0	98,50	89,19	99,99	99,98	100,0
19,0	97,22	87,68	99,98	99,97	100,0
16,0	96,41	86,68	99,98	99,97	100,0
12,5	95,06	84,36	99,97	99,96	100,0
10,0	92,63	81,60	99,96	99,95	100,0
8,0	89,02	77,02	99,95	99,94	100,0
6,3	85,18	71,76	99,94	99,92	100,0
4,0	72,33	64,12	99,90	99,87	100,0
2,0	57,55	51,50	99,80	99,74	100,0
1,0	45,51	40,08	99,38	99,21	100,0
0,500	34,70	29,83	96,84	95,96	100,0
0,250	23,04	19,75	83,49	78,91	100,0
0,150	16,55	14,17	60,68	49,89	99,61
0,106	14,38	12,33	43,70	28,96	96,78
0,075	12,81	10,94	31,62	15,67	89,12
0,045	11,16	9,48	22,01	7,57	74,05
0,038	10,63	8,90	19,93	6,28	69,13
0,026	9,45	7,90	16,29	4,44	58,98
0,019	8,31	6,96	13,93	3,50	51,48
0,014	6,84	5,81	11,95	2,84	44,76
0,009	5,03	4,30	9,65	2,18	36,56
0,007	4,04	3,45	8,56	1,90	32,54

Tamanho (mm)	AL MO II	MO PROD II	AL CLASS II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	94,80	99,96	99,96	99,95	100,0
37,1	91,29	99,93	99,93	99,91	100,0
31,5	90,07	99,92	99,92	99,89	100,0
25,0	89,19	99,91	99,91	99,88	100,0
19,0	87,68	99,90	99,90	99,86	100,0
16,0	86,68	99,89	99,89	99,85	100,0
12,5	84,36	99,87	99,87	99,83	100,0
10,0	81,60	99,86	99,86	99,81	100,0
8,0	77,02	99,84	99,84	99,79	100,0
6,3	71,76	99,82	99,82	99,76	100,0
4,0	64,12	99,78	99,78	99,71	100,0
2,0	51,50	99,67	99,67	99,55	100,0
1,0	40,08	99,20	99,20	98,91	100,0
0,500	29,83	96,35	96,35	95,03	100,0
0,250	19,75	81,96	81,96	75,44	99,98
0,150	14,17	58,53	58,53	44,07	98,43
0,106	12,33	43,82	43,82	26,12	92,71
0,075	10,94	34,02	34,02	16,22	83,18
0,045	9,48	25,31	25,31	9,74	68,30
0,038	8,90	23,18	23,18	8,52	63,67
0,026	7,90	19,33	19,33	6,61	54,45
0,019	6,96	16,74	16,74	5,51	47,75
0,014	5,81	14,56	14,56	4,67	41,85
0,009	4,30	11,96	11,96	3,75	34,61
0,007	3,45	10,70	10,70	3,33	31,05

Tamanho (mm)	AL DESL.	U/F DESL.	O/F DESL.
1,0	100,0	100,0	100,0
0,500	100,0	100,0	100,0
0,250	99,99	99,99	100,0
0,150	99,03	98,94	100,0
0,106	94,77	94,27	100,0
0,075	86,20	84,89	100,0
0,045	71,22	68,48	100,0
0,038	66,44	63,25	100,0
0,026	56,75	52,64	99,97
0,019	49,64	44,87	99,77
0,014	43,33	38,02	99,03
0,009	35,60	29,85	95,96
0,007	31,81	26,01	92,64

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	51,0	15,6	47,6	78,3	361	1984,5	3891,1	4612,8
	Overflow	21,1					430,5	2040,3	2196,8
	Underflow	84,0					1554,0	1850,9	2416,0
Classificação II B	Alimentação	55,7	21,7	50,5	73,4	276	1568,4	2814,3	3384,6
	Overflow	29,9					416,7	1392,2	1543,8
	Underflow	81,0					1151,7	1422,0	1840,8
Deslamagem	Alimentação	19,9	43,6	53,1	91,3	-	847,2	4259,4	4567,5
	Overflow	3,7					73,9	1998,4	2025,3
	Underflow	34,2					773,3	2261,0	2542,2

ADIÇÃO DE ÁGUA AO PROCESSO

Local	Água (t/h)
U/F Classificação I	182,6
Produto Moagem I	1381
U/F Classificação II	182,6
Produto Moagem II	750,3
Alimentação Deslamagem	527,3

ANEXO 4 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOABILIDADE DE BOND

AMOSTRA: 15% N5W + 85% GRANULADO

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1974,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,264	kg
Produto Ideal (Z):	564,0	g
Densidade aparente:	2,82	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	1850	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	120	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	1,913	g / revolução

WI = 12,1 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	84,43	-
1,68	79,29	-
1,19	72,15	-
0,84	59,41	-
0,59	52,41	-
0,42	43,95	-
0,297	37,56	-
0,210	30,65	-
0,149	26,42	100,0
0,105	21,66	72,41
0,074	18,17	55,94
0,053	15,25	44,01
0,044	13,37	38,68
d₈₀ (mm)	1,85	0,12

AMOSTRA: 30% N5W + 70% GRANULADO

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1974,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,245	kg
Produto Ideal (Z):	564,0	g
Densidade aparente:	2,82	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	190	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	119	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	1,859	g / revolução

WI = 12,3 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	83,41	-
1,68	78,29	-
1,19	70,18	-
0,84	57,31	-
0,59	50,38	-
0,42	42,13	-
0,297	35,63	-
0,210	28,57	-
0,149	24,54	100,0
0,105	19,50	72,80
0,074	16,45	56,23
0,053	13,89	45,48
0,044	12,26	39,69
d₈₀ (mm)	1,90	0,12

AMOSTRA: N4E

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	2064,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,373	kg
Produto Ideal (Z):	590,0	g
Densidade aparente:	2,95	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	1300	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	128	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	3,428	g / revolução

WI = 8,4 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	87,43	-
1,68	84,05	-
1,19	79,20	-
0,84	70,72	-
0,59	65,99	-
0,42	59,50	-
0,297	53,37	-
0,210	44,56	-
0,149	37,33	100,0
0,105	28,73	66,72
0,074	23,16	49,42
0,053	17,00	35,38
0,044	15,01	28,94
d₈₀ (mm)	1,30	0,13

AMOSTRA: N4W CENTRAL

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1087,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,228	kg
Produto Ideal (Z):	596,0	g
Densidade aparente:	2,98	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	1850	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	120	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	1,913	g / revolução

WI = 18,1 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	87,25	-
1,68	82,53	-
1,19	75,30	-
0,84	62,59	-
0,59	54,45	-
0,42	42,18	-
0,297	32,45	-
0,210	26,18	-
0,149	22,82	100,0
0,105	19,20	75,95
0,074	16,39	57,65
0,053	13,84	42,25
0,044	11,87	34,48
d₈₀ (mm)	1,50	0,11

AMOSTRA: N4WN

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1979,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,263	kg
Produto Ideal (Z):	565,0	g
Densidade aparente:	2,84	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	1800	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	140	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	2,276	g / revolução

WI = 11,7 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	84,26	-
1,68	79,73	-
1,19	72,23	-
0,84	60,86	-
0,59	55,09	-
0,42	47,98	-
0,297	41,17	-
0,210	31,60	-
0,149	26,33	100,0
0,105	20,38	63,67
0,074	16,57	44,85
0,053	13,96	30,38
0,044	12,45	22,57
d₈₀ (mm)	1,80	0,14

AMOSTRA: N5W

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1866,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,252	kg
Produto Ideal (Z):	533,00	g
Densidade aparente:	2,66	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	2000	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	122	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	2,056	g / revolução

WI = 11,4 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	84,93	-
1,68	77,35	-
1,19	69,36	-
0,84	55,53	-
0,59	47,52	-
0,42	39,70	-
0,297	33,84	-
0,210	28,16	-
0,149	25,12	100,0
0,105	20,75	73,35
0,074	17,59	58,48
0,053	14,62	47,78
0,044	12,05	42,01
d₈₀ (mm)	2,00	0,12

AMOSTRA: SINTER FEED CARAJÁS (SFCK)

Malha do Teste:	150	micrometros
Massa Original: [MO]	1967,0	g
Fração da alimentação passante na Malha do Teste (P):	0,16	kg
Produto Ideal (Z):	562,00	g
Densidade aparente:	2,81	g/cm ³

CÁLCULO DO VALOR DO WI

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrometros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	2400	micrometros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	130	micrometros
Média dos Últimos Três Valores de gramas por revolução (Gbp):	1,552	g / revolução

WI = 14,6 kWh/t

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
3,33	100,0	-
2,38	79,76	-
1,68	77,35	-
1,19	62,11	-
0,84	46,96	-
0,59	39,42	-
0,42	30,88	-
0,297	24,42	-
0,210	19,42	-
0,149	15,97	100,0
0,105	11,73	66,07
0,074	9,22	49,85
0,053	7,49	24,68
0,044	6,35	12,57
d₈₀ (mm)	2,40	0,13

ANEXO 5 – RESULTADOS DO ENSAIO DE DWT

ENSAIO COMPLETO

AMOSTRA: ROM (50% N5W + 50% N4W CENTRAL)

Lote	Tamanho (mm)	Energia específica (kWh/t)	t ₁₀ (%)
1	63 x 53	0,408	53,8
2	63 x 53	0,256	47,2
3	63 x 53	0,104	34,0
4	45 x 37,5	1,026	62,8
5	45 x 37,5	0,263	47,8
6	45 x 37,5	0,108	37,8
7	31,5 x 26,5	2,527	63,2
8	31,5 x 26,5	1,016	57,8
9	31,5 x 26,5	0,260	42,2
10	22,4 x 19	2,526	61,0
11	22,4 x 19	1,015	53,2
12	22,4 x 19	0,254	43,7
13	16 x 13,2	2,532	63,8
14	16 x 13,2	1,014	54,0
15	16 x 13,2	0,263	46,3

ANEXO 6 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MOAGEM

TEMPO DE MOAGEM

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio			1	2	3	4	5
Tempo de moagem (min)			10	20	30	60	90
Dia da amostragem	28/2/2007						
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)						
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	98,3	100,0	99,6	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	96,3	100,0	98,6	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	94,5	100,0	98,3	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	91,0	98,3	97,6	99,9	100,0	100,0
10,0	100,0	85,6	96,6	96,8	99,9	100,0	100,0
8,0	100,0	80,6	95,4	96,4	99,8	100,0	100,0
6,3	100,0	74,9	94,4	96,1	99,7	100,0	100,0
4,0	100,0	65,7	92,6	95,5	99,5	100,0	100,0
2,0	100,0	53,1	91,0	95,1	99,2	100,0	100,0
1,0	100,0	43,5	89,8	94,9	99,2	100,0	100,0
0,5	100,0	35,6	87,0	94,4	97,0	100,0	99,8
0,250	99,8	27,1	74,8	91,4	93,3	99,7	99,8
0,150	99,5	21,9	56,4	75,9	86,1	99,2	99,7
0,106	98,0	19,4	49,4	64,4	73,3	96,8	99,3
0,075	94,1	18,6	44,6	57,1	67,2	90,6	98,4
0,045	79,8	15,7	33,2	44,2	54,2	75,9	86,9
0,038	75,8	14,3	-	42,0	-	-	80,7
0,026	64,7	12,4	-	35,8	-	-	67,7
0,019	56,5	10,8	-	30,8	-	-	58,4
0,014	48,8	9,2	-	26,0	-	-	50,2
0,009	39,4	7,2	-	19,8	-	-	40,2
0,007	33,4	6,0	-	15,9	-	-	33,4

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio			1	2	3	4	5
Dia da amostragem	28/2/2007						
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)						
Fe	67,02	67,17	67,26	67,30	67,26	67,13	67,33
SiO ₂	1,03	0,94	1,00	0,94	0,97	1,07	0,94
P	0,027	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	0,74	0,68	0,63	0,65	0,61	0,66	0,62
Mn	0,35	0,28	0,21	0,24	0,25	0,21	0,21
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
MgO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,019	0,01
TiO ₂	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,010	0,004	0,004
PPC	1,83	1,84	1,79	1,75	1,78	1,88	1,77
Área Específica (cm ² /g)	3900		2308	2433	2727	3343	4046

CONFIRMAÇÃO 90 MINUTOS – DIVERSOS DIAS DE AMOSTRAGEM

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	6			7			8		
Dia da amostragem	9/2/2007			28/2/2007			13/3/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)								
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	98,5	100,0	100,0	98,1	100,0
25,0	100,0	99,8	100,0	100,0	98,3	100,0	100,0	96,5	100,0
19,0	100,0	98,2	100,0	100,0	96,3	100,0	100,0	92,6	99,2
16,0	100,0	97,2	100,0	100,0	94,5	100,0	100,0	89,1	99,2
12,5	100,0	95,1	99,6	100,0	91,0	99,5	100,0	83,0	99,1
10,0	100,0	91,3	99,6	100,0	85,6	99,4	100,0	77,1	98,7
8,0	100,0	88,4	99,5	100,0	80,6	99,3	100,0	73,5	98,7
6,3	100,0	82,4	99,5	100,0	74,9	99,3	100,0	68,5	98,6
4,0	100,0	70,6	99,5	100,0	65,7	99,3	100,0	59,5	98,6
2,0	100,0	55,0	99,5	100,0	53,1	99,3	100,0	48,1	98,6
1,0	100,0	43,1	99,5	100,0	43,5	99,3	100,0	38,4	98,6
0,5	100,0	33,1	99,5	100,0	35,6	99,3	100,0	29,4	98,6
0,250	99,9	22,8	99,5	99,6	27,1	99,3	100,0	20,6	98,4
0,150	99,8	16,0	99,4	99,1	21,9	99,2	99,6	15,6	98,2
0,106	99,1	13,1	99,1	97,0	19,4	98,9	97,2	13,3	97,9
0,075	96,8	11,5	97,3	93,2	18,6	97,1	93,3	11,7	96,1
0,045	86,5	9,6	86,6	76,9	15,7	86,5	74,7	9,8	84,5
0,038	82,8	9,2	81,8	73,2	14,3	81,7	70,6	9,2	79,5
0,026	70,7	7,9	69,0	63,5	12,4	69,0	60,3	8,8	65,8
0,019	62,2	6,8	59,9	55,8	10,8	59,9	52,9	7,8	57,2
0,014	54,6	5,7	51,7	48,2	9,2	51,8	45,9	6,5	49,0
0,009	44,9	4,3	41,5	38,7	7,2	41,7	38,1	5,0	39,3
0,007	39,0	3,3	35,4	32,3	6,0	35,6	33,0	3,7	32,9

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	6			7			8		
Dia da amostragem	9/2/2007			28/2/2007			13/3/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)								
Fe	67,11	66,94	66,94	66,96	67,17	66,78	66,95	66,93	67,38
SiO ₂	1,13	1,00	1,00	1,07	0,94	1,39	1,30	1,20	0,91
P	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	0,77	0,85	0,85	0,64	0,68	0,81	0,76	0,75	0,59
Mn	0,20	0,28	0,28	0,25	0,28	0,44	0,38	0,40	0,27
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,01	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
TiO ₂	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
PPC	1,80	1,95	1,95	2,10	1,84	1,64	1,62	1,72	1,70
Área Específica (cm ² /g)	4691		4000	3672		4138	4078		4800

CONFIRMAÇÃO 90 MINUTOS – DIFERENTES FRENTES DE LAVRA

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	9		10		11		12	
Frente de lavra	N4E		N4WN		N4W Central		N5W	
Amostra	ROM	Produto	ROM	Produto	ROM	Produto	ROM	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	100,0
31,5	99,6	100,0	97,8	100,0	100,0	100,0	98,6	100,0
25,0	98,8	100,0	96,6	100,0	99,7	100,0	98,6	100,0
19,0	97,0	100,0	93,7	100,0	97,9	100,0	97,6	100,0
16,0	96,1	100,0	91,4	100,0	96,8	100,0	97,1	100,0
12,5	94,3	100,0	86,7	100,0	94,7	100,0	96,4	100,0
10,0	91,2	100,0	80,0	100,0	91,6	100,0	94,8	100,0
8,0	88,5	100,0	75,0	100,0	88,7	100,0	92,9	100,0
6,3	84,3	100,0	68,2	100,0	84,9	100,0	89,7	100,0
4,0	75,3	100,0	56,6	100,0	75,9	100,0	81,3	100,0
2,0	64,7	100,0	44,3	100,0	63,8	100,0	66,0	100,0
1,0	55,9	100,0	35,5	100,0	52,7	100,0	48,3	100,0
0,5	47,2	100,0	26,8	100,0	36,7	100,0	34,0	100,0
0,250	36,5	100,0	18,5	100,0	22,9	100,0	23,3	100,0
0,150	27,0	100,0	13,4	100,0	17,5	100,0	17,8	100,0
0,106	22,5	99,9	11,7	99,5	15,6	99,8	15,9	99,8
0,075	19,3	98,4	10,5	96,4	14,0	96,0	14,2	97,4
0,045	16,1	87,6	8,9	83,5	11,7	81,8	11,9	87,4
0,038	15,1	81,9	8,3	78,4	10,9	75,9	11,2	83,5
0,026	13,2	66,0	7,3	65,1	9,7	62,4	9,7	69,6
0,019	11,3	55,8	6,0	56,1	8,3	53,6	8,1	60,8
0,014	9,5	47,2	4,8	48,8	6,9	46,4	6,6	53,3
0,009	7,1	38,0	3,6	41,2	5,3	38,5	4,8	44,7
0,007	5,4	32,3	2,9	36,7	4,2	33,6	3,8	38,9

RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	9		10		11		12	
Frente de lavra	N4E		N4WN		N4W Central		N5W	
Amostra	ROM	Produto	ROM	Produto	ROM	Produto	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)							
Fe	68,41	68,11	68,71	68,09	67,84	67,65	67,30	67,13
SiO ₂	0,59	0,65	0,53	0,72	0,80	0,69	0,65	0,67
P	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03
Al ₂ O ₃	0,51	0,54	0,23	0,42	0,38	0,39	0,48	0,52
Mn	0,35	0,37	0,15	0,23	0,08	0,14	0,82	0,74
CaO	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01
MgO	0,07	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,09	0,08
TiO ₂	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	0,03	0,04	0,04
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01
PPC	0,51	0,79	0,68	1,06	1,61	1,89	1,36	1,67
Área Específica (cm ² /g)	3750		4138		3750		4444	

CONFIRMAÇÃO 90 MINUTOS – DIVERSOS DIAS DE AMOSTRAGEM

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	13			14		
Dia da amostragem	25/4/2007			2/5/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)					
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	99,7	100,0
25,0	100,0	99,3	100,0	100,0	99,3	100,0
19,0	100,0	98,1	100,0	100,0	97,3	100,0
16,0	100,0	95,4	100,0	100,0	93,7	100,0
12,5	100,0	91,1	100,0	100,0	88,1	100,0
10,0	100,0	84,2	100,0	100,0	81,3	100,0
8,0	100,0	79,3	100,0	100,0	76,7	100,0
6,3	100,0	74,4	100,0	100,0	72,2	100,0
4,0	100,0	64,6	100,0	100,0	63,8	100,0
2,0	100,0	51,0	100,0	100,0	51,2	100,0
1,0	100,0	37,3	100,0	100,0	39,5	100,0
0,5	100,0	27,0	100,0	100,0	29,5	100,0
0,250	100,0	18,8	100,0	100,0	20,9	100,0
0,150	99,6	13,8	99,9	99,9	15,5	99,9
0,106	98,1	11,9	99,4	99,7	13,3	99,6
0,075	89,1	10,3	96,2	95,1	11,7	97,3
0,045	74,7	8,8	85,2	82,9	9,9	86,2
0,038	70,4	8,4	80,4	78,2	9,4	81,2
0,026	58,9	7,2	66,3	66,7	7,8	66,6
0,019	52,0	6,3	57,4	58,3	6,6	57,5
0,014	45,6	5,4	49,8	50,3	5,5	49,9
0,009	37,5	4,2	41,1	40,6	4,1	41,3
0,007	32,0	3,5	35,3	34,3	3,2	35,2

Ensaio	15			16		
Dia da amostragem	08/05/2007			17/05/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)					
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	99,9	100,0	100,0	99,2	100,0
19,0	100,0	99,8	100,0	100,0	96,1	100,0
16,0	100,0	99,6	100,0	100,0	93,7	100,0
12,5	100,0	98,4	100,0	100,0	87,9	100,0
10,0	100,0	95,7	100,0	100,0	80,7	100,0
8,0	100,0	92,4	100,0	100,0	75,6	100,0
6,3	100,0	84,5	100,0	100,0	69,1	100,0
4,0	100,0	73,4	100,0	100,0	61,7	100,0
2,0	100,0	56,5	100,0	100,0	48,9	100,0
1,0	100,0	43,7	100,0	100,0	37,1	100,0
0,5	100,0	33,1	100,0	100,0	27,6	100,0
0,250	99,9	23,0	100,0	100,0	19,5	100,0
0,150	99,7	16,6	100,0	100,0	14,6	100,0
0,106	98,8	14,0	99,8	99,2	12,7	99,7
0,075	95,2	12,2	97,4	96,1	11,3	97,6
0,045	87,6	10,3	86,5	84,4	9,7	87,2
0,038	84,5	9,9	81,3	80,4	9,2	82,5
0,026	72,5	8,0	66,7	69,0	7,8	68,9
0,019	63,0	6,8	57,8	61,4	6,6	60,0
0,014	53,5	5,4	50,3	54,6	5,5	52,2
0,009	42,4	3,9	41,6	46,3	4,1	42,9
0,007	36,2	3,1	35,7	41,3	3,3	36,8

RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	13			14		
Dia da amostragem	25/4/2007			2/5/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)					
Fe	66,53	66,33	66,57	66,87	66,88	67,13
SiO ₂	0,96	1,54	0,92	0,93	0,87	0,90
P	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	1,01	0,93	0,88	0,96	0,82	0,84
Mn	0,54	0,48	0,47	0,50	0,72	0,44
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
MgO	0,07	0,07	0,08	0,05	0,05	0,03
TiO ₂	0,05	0,05	0,00	0,04	0,04	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
PPC	2,00	1,85	2,22	1,67	1,58	1,55
Área Específica (cm ² /g)	3871		4286	4000		4800

Ensaio	15			16		
Dia da amostragem	8/5/2007			17/5/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	OF CLASS	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)					
Fe	67,19	66,99	66,49	65,76	65,51	66,83
SiO ₂	0,84	1,00	1,02	1,41	1,48	1,10
P	0,03	0,03	0,03	0,07	0,07	0,04
Al ₂ O ₃	0,81	0,97	1,01	1,63	1,56	0,83
Mn	0,51	0,44	0,70	0,72	0,99	0,56
CaO	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
MgO	0,05	0,07	0,05	0,04	0,04	0,03
TiO ₂	0,04	0,04	0,04	0,10	0,10	0,04
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,45	1,47	1,82	1,67	1,69	1,62
Área Específica (cm ² /g)	4000		3750	4615		5000

PORCENTAGEM DE SÓLIDOS

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	17	18	19	20	21	22		
% de sólidos	68				70			
Dia da amostragem	13/03/2007							
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	96,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	92,6	100,0	100,0	98,2	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	89,1	100,0	100,0	98,2	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	83,0	99,6	100,0	98,2	99,0	99,5	100,0
10,0	100,0	77,1	99,6	99,8	97,9	98,9	99,4	100,0
8,0	100,0	73,5	99,5	99,5	97,7	98,7	99,4	100,0
6,3	100,0	68,5	99,5	99,4	97,4	98,6	99,3	100,0
4,0	100,0	59,5	99,0	99,4	97,4	98,6	99,3	100,0
2,0	100,0	48,1	98,4	99,4	97,3	98,6	99,0	99,4
1,0	100,0	38,4	98,4	99,4	97,3	98,6	99,0	99,4
0,5	100,0	29,4	98,4	99,4	97,3	98,6	99,0	99,4
0,250	100,0	20,6	98,4	99,3	97,2	98,6	98,9	99,2
0,150	99,6	15,6	98,2	99,0	96,8	98,4	98,6	98,9
0,106	97,2	13,3	96,7	97,6	95,2	97,4	97,5	97,7
0,075	93,3	11,7	92,6	93,6	90,9	94,0	93,9	93,8
0,045	74,7	9,8	78,1	79,4	76,3	80,7	80,1	79,5
0,038	70,6	9,2	73,6	74,3	71,8	75,6	74,7	73,8
0,026	60,3	8,8	61,4	62,3	59,3	62,7	62,1	61,6
0,019	52,9	7,8	52,9	54,0	50,9	55,3	54,1	52,9
0,014	45,9	6,5	45,1	46,3	43,2	47,2	46,1	45,0
0,009	38,1	5,0	36,3	37,6	34,6	38,1	36,9	35,7
0,007	33,0	3,7	31,5	32,8	29,6	33,4	32,1	30,9

Ensaio			23	24	25	26	27	28
% de sólidos				72			74	
Dia da amostragem	13/03/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	96,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	89,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	77,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	73,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	68,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	59,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	48,1	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0
1,0	100,0	38,4	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0
0,5	100,0	29,4	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0
0,250	100,0	20,6	99,9	100,0	99,9	99,9	99,9	100,0
0,150	99,6	15,6	99,7	99,7	99,6	99,7	99,7	99,8
0,106	97,2	13,3	98,6	98,6	98,6	98,8	98,7	98,9
0,075	93,3	11,7	95,3	95,2	95,1	95,7	95,7	95,7
0,045	74,7	9,8	81,6	81,1	81,3	82,2	82,2	81,9
0,038	70,6	9,2	76,0	75,0	75,9	76,6	76,6	76,2
0,026	60,3	8,8	63,4	63,4	63,2	63,8	64,3	63,4
0,019	52,9	7,8	54,7	54,9	54,4	55,3	55,8	54,8
0,014	45,9	6,5	46,8	46,7	46,3	47,4	47,7	46,8
0,009	38,1	5,0	37,4	37,6	36,8	38,0	38,3	37,6
0,007	33,0	3,7	32,3	32,3	31,4	32,8	33,1	32,5

Ensaio			29	30	31	32	33	34
% de sólidos				76			78,57	
Dia da amostragem	13/03/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	96,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	89,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	83,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	77,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	73,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	68,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	59,5	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	48,1	99,9	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	38,4	99,9	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	29,4	99,9	99,8	100,0	100,0	99,9	100,0
0,250	100,0	20,6	99,7	99,7	100,0	100,0	99,8	99,9
0,150	99,6	15,6	99,5	99,7	100,0	100,0	99,8	99,9
0,106	97,2	13,3	98,9	99,3	99,6	99,9	99,6	99,7
0,075	93,3	11,7	96,3	96,5	96,5	97,2	97,0	97,4
0,045	74,7	9,8	83,4	85,1	84,6	85,6	85,5	86,4
0,038	70,6	9,2	77,9	79,4	79,0	80,2	79,9	81,1
0,026	60,3	8,8	65,7	66,8	66,2	66,9	67,0	73,4
0,019	52,9	7,8	56,5	57,9	57,6	58,3	58,3	59,4
0,014	45,9	6,5	48,2	49,5	49,3	50,2	50,2	50,9
0,009	38,1	5,0	38,7	39,8	39,8	40,8	40,6	41,5
0,007	33,0	3,7	33,1	34,6	34,6	35,4	35,2	36,1

Ensaio	35		36	37	
% de sólidos			80		
Dia da amostragem	13/03/2007				
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)				
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,1	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	96,5	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	89,1	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	83,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	77,1	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	73,5	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	68,5	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	59,5	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	48,1	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	38,4	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	29,4	100,0	99,9	99,7
0,250	100,0	20,6	99,9	99,7	99,5
0,150	99,6	15,6	99,9	99,7	99,5
0,106	97,2	13,3	99,7	99,4	99,3
0,075	93,3	11,7	97,8	97,4	97,4
0,045	74,7	9,8	87,9	87,1	87,3
0,038	70,6	9,2	82,6	81,7	81,6
0,026	60,3	8,8	78,9	69,6	69,6
0,019	52,9	7,8	62,1	60,8	60,8
0,014	45,9	6,5	53,4	52,4	52,5
0,009	38,1	5,0	43,7	42,8	42,9
0,007	33,0	3,7	38,4	37,5	37,6

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	17	18	19	20	21	22
% de sólidos		68			70	
Dia da amostragem	13/03/2007					
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)					
Fe	66,95	66,93	66,98	67,01	66,86	67,03
SiO ₂	1,30	1,20	1,27	1,27	1,23	1,33
P	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,76	0,75	0,69	0,76	0,69	0,69
Mn	0,38	0,40	0,42	0,30	0,34	0,39
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
MgO	0,02	0,01	0,02	0,02	0,09	0,02
TiO ₂	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,62	1,72	1,62	1,67	1,87	1,51
Área Específica (cm ² /g)	4078		4000	4286	4000	4138

Ensaio	23	24	25	26	27	28
% de sólidos		72			74	
Dia da amostragem	13/03/2007					
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)					
Fe	66,95	66,93	67,15	67,03	66,60	67,00
SiO ₂	1,30	1,20	1,23	1,18	1,58	1,37
P	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,76	0,75	0,67	0,70	0,85	0,77
Mn	0,38	0,40	0,31	0,35	0,39	0,35
CaO	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01
MgO	0,02	0,01	0,09	0,08	0,07	0,07
TiO ₂	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,62	1,72	1,49	1,66	1,68	1,45
Área Específica (cm ² /g)	4078		4286	4000	4444	4286

Ensaio	29		30	31	32	33	34
% de sólidos			76			78,57	
Dia da amostragem	13/03/2007						
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)						
Fe	66,95	66,93	66,90	67,28	67,10	67,01	67,21
SiO ₂	1,30	1,20	1,31	1,25	1,33	1,44	1,27
P	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,76	0,75	0,77	0,63	0,67	0,72	0,64
Mn	0,38	0,40	0,43	0,33	0,34	0,40	0,36
CaO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
MgO	0,02	0,01	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
TiO ₂	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,62	1,72	1,53	1,34	1,46	1,34	1,35
Área Específica (cm ² /g)	4078		4444	4444	4286	4615	4286

Ensaio	35		36	37
% de sólidos			80	
Dia da amostragem	13/03/2007			
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)			
Fe	66,95	66,93	67,14	66,56
SiO ₂	1,30	1,20	1,24	1,41
P	0,02	0,03	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,76	0,75	0,71	0,75
Mn	0,38	0,40	0,36	0,37
CaO	0,01	0,01	0,02	0,35
MgO	0,02	0,01	0,08	0,13
TiO ₂	0,03	0,04	0,03	0,04
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,62	1,72	1,41	1,62
Área Específica (cm ² /g)	4078		4615	4800

PORCENTAGEM DE GRANULADO

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio					38		39		40	
% de NP2/SFCK					5/95		10/90		15/85	
Dia da amostragem			01/03/2007							
Amostra	Meta	ROM	SFCK	Granulado	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.
Abertura (mm)		Porcentagem Passante Acumulada (%)								
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	98,3	100,0	96,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	96,3	100,0	83,0	99,1	100,0	100,0	100,0	96,3	100,0
16,0	100,0	94,5	100,0	69,4	98,6	100,0	97,9	100,0	93,2	100,0
12,5	100,0	91,0	99,9	44,1	95,4	99,8	95,7	99,0	89,5	99,7
10,0	100,0	85,6	98,6	22,3	91,7	99,8	90,7	98,5	84,2	99,3
8,0	100,0	80,6	94,1	11,5	88,1	99,8	87,6	98,5	80,0	99,2
6,3	100,0	74,9	87,8	6,6	81,3	99,7	81,0	98,5	72,5	99,1
4,0	100,0	65,7	74,4	3,4	69,3	99,7	68,0	98,1	58,6	99,1
2,0	100,0	53,1	56,4	2,6	52,4	99,7	51,6	98,0	43,5	99,1
1,0	100,0	43,5	43,0	2,3	39,6	99,7	38,9	97,9	32,8	99,1
0,5	100,0	35,6	32,2	2,0	29,4	99,7	29,0	97,9	24,5	99,0
0,250	99,8	27,1	21,3	1,7	19,1	99,6	19,3	97,8	16,1	98,9
0,150	99,5	21,9	12,9	1,4	11,2	99,5	11,7	97,7	9,7	98,8
0,106	98,0	19,4	6,4	1,0	8,7	99,1	9,2	96,9	7,7	98,4
0,075	94,1	18,6	4,1	0,7	8,4	97,8	7,9	94,2	6,5	96,2
0,045	79,8	15,7	-	-	6,1	83,9	6,5	79,8	5,3	84,4
0,038	75,8	14,3	-	-	5,8	78,6	6,2	74,8	5,0	79,5
0,026	64,7	12,4	-	-	4,9	66,9	5,3	62,3	4,3	67,5
0,019	56,5	10,8	-	-	4,3	58,0	4,5	54,0	3,7	58,4
0,014	48,8	9,2	-	-	3,6	49,6	3,8	45,9	3,1	50,0
0,009	39,4	7,2	-	-	2,8	39,5	2,9	37,0	2,4	40,0
0,007	33,4	6,0	-	-	2,0	34,2	2,5	31,7	1,9	33,8

Ensaio					41		42	
% de NP2/SFCK					20/80		30/70	
Dia da amostragem			01/03/2007					
Amostra	Meta	ROM	SFCK	Granulado	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.
Abertura (mm)		Porcentagem Passante Acumulada (%)						
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	98,3	100,0	96,5	100,0	100,0	98,5	100,0
19,0	100,0	96,3	100,0	83,0	98,1	100,0	90,0	100,0
16,0	100,0	94,5	100,0	69,4	93,4	100,0	88,4	100,0
12,5	100,0	91,0	99,9	44,1	87,6	100,0	82,2	99,5
10,0	100,0	85,6	98,6	22,3	81,2	99,9	72,8	99,1
8,0	100,0	80,6	94,1	11,5	77,5	99,8	68,2	98,8
6,3	100,0	74,9	87,8	6,6	71,1	99,8	62,1	98,8
4,0	100,0	65,7	74,4	3,4	59,4	99,8	50,8	98,8
2,0	100,0	53,1	56,4	2,6	45,1	99,8	38,0	98,8
1,0	100,0	43,5	43,0	2,3	34,4	99,8	28,8	98,8
0,5	100,0	35,6	32,2	2,0	25,6	99,7	21,5	98,8
0,250	99,8	27,1	21,3	1,7	16,6	99,7	14,2	98,7
0,150	99,5	21,9	12,9	1,4	9,8	99,6	8,5	98,6
0,106	98,0	19,4	6,4	1,0	7,6	99,4	6,5	98,2
0,075	94,1	18,6	4,1	0,7	6,5	99,4	5,9	96,1
0,045	79,8	15,7	-	-	5,3	89,2	4,5	84,2
0,038	75,8	14,3	-	-	5,1	84,4	4,3	79,4
0,026	64,7	12,4	-	-	4,5	72,6	3,6	67,4
0,019	56,5	10,8	-	-	3,6	63,1	3,1	57,9
0,014	48,8	9,2	-	-	3,0	54,2	2,6	50,5
0,009	39,4	7,2	-	-	2,3	43,4	2,0	41,4
0,007	33,4	6,0	-	-	1,9	37,3	1,6	35,5

Ensaio					43		44	
% de NP2/SFCK					40/60		50/50	
Dia da amostragem			01/03/2007					
Amostra	Meta	ROM	SFCK	Granulado	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.
Abertura (mm)		Porcentagem Passante Acumulada (%)						
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	98,3	100,0	96,5	98,7	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	96,3	100,0	83,0	95,3	100,0	90,5	100,0
16,0	100,0	94,5	100,0	69,4	89,4	100,0	82,9	100,0
12,5	100,0	91,0	99,9	44,1	79,6	99,4	69,3	99,0
10,0	100,0	85,6	98,6	22,3	69,2	98,8	56,1	98,3
8,0	100,0	80,6	94,1	11,5	63,5	98,7	50,3	98,0
6,3	100,0	74,9	87,8	6,6	57,0	98,6	44,7	97,9
4,0	100,0	65,7	74,4	3,4	46,5	98,6	37,2	97,9
2,0	100,0	53,1	56,4	2,6	35,0	98,6	28,1	97,8
1,0	100,0	43,5	43,0	2,3	26,8	98,6	21,7	97,8
0,5	100,0	35,6	32,2	2,0	20,4	98,5	16,3	97,8
0,250	99,8	27,1	21,3	1,7	13,9	98,5	10,8	97,7
0,150	99,5	21,9	12,9	1,4	8,8	98,3	6,5	97,5
0,106	98,0	19,4	6,4	1,0	7,0	97,8	5,1	97,1
0,075	94,1	18,6	4,1	0,7	6,1	96,2	4,4	95,6
0,045	79,8	15,7	-	-	5,0	84,2	3,5	85,2
0,038	75,8	14,3	-	-	4,8	79,4	3,3	80,6
0,026	64,7	12,4	-	-	4,1	67,1	2,8	68,7
0,019	56,5	10,8	-	-	3,5	57,9	2,4	59,6
0,014	48,8	9,2	-	-	2,9	49,6	1,9	50,9
0,009	39,4	7,2	-	-	2,2	39,8	1,4	40,9
0,007	33,4	6,0	-	-	1,8	33,3	1,2	34,5

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio					38	39		40		41		
% de NP2/SFCK					5/95	10/90		15/85		20/80		
Dia da amostragem	01/03/2007											
Amostra	Meta	SFCK	Granulado	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	
Elementos	Teor (%)											
Fe	67,02	66,96	66,31	66,89	66,75	67,04	67,01	67,04	66,84	66,87	66,93	
SiO ₂	1,03	0,98	1,19	1,00	1,02	1,03	0,95	0,96	0,98	0,99	0,98	
P	0,03	0,04	0,055	0,05	0,04	0,041	0,038	0,042	0,043	0,046	0,04	
Al2O ₃	0,74	0,90	1,12	0,92	0,98	0,9	0,88	0,91	0,94	0,91	0,90	
Mn	0,35	0,19	0,16	0,25	0,24	0,18	0,22	0,21	0,24	0,22	0,22	
CaO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	
MgO	0,02	0,03	0,06	0,05	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,04	
TiO ₂	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,06	
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	
PPC	1,83	1,95	2,39	1,89	2,04	1,80	1,89	1,83	2,01	2,00	1,94	
Área Específica (cm ² /g)	3900						4000		4286		4444	

Ensaio					42	43		44	
% de NP2/SFCK					30/70	40/60		50/50	
Dia da amostragem	01/03/2007								
Amostra	Meta	SFCK	Granulado	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.	Alim.	Prod.
Elementos	Teor (%)								
Fe	67,02	66,96	66,31	66,75	66,81	66,56	66,86	66,53	66,79
SiO ₂	1,03	0,98	1,19	1,02	1,03	1,12	1,00	1,24	1,09
P	0,03	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Al ₂ O ₃	0,74	0,90	1,12	1,02	0,99	1,15	0,93	1,08	0,94
Mn	0,35	0,19	0,16	0,21	0,21	0,19	0,26	0,18	0,23
CaO	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,02	0,03	0,06	0,02	0,05	0,04	0,04	0,08	0,06
TiO ₂	0,03	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,83	1,95	2,39	2,07	1,98	2,10	1,94	2,05	1,95
Área Específica (cm ² /g)	3900					4286	4000		4444

TOP SIZE DAS BOLAS**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)**

Ensaio	45	46	47	48	49	50		
Top size (mm)	50	50	50	60	60	60		
Dia da amostragem	29/05/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	96,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	93,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	90,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	87,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	81,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	72,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	57,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	42,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	30,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,250	100,0	22,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	100,0	17,3	99,7	99,7	99,6	99,1	99,8	99,7
0,106	99,7	15,8	99,3	99,5	99,3	98,7	99,6	99,3
0,075	98,8	14,5	98,0	98,9	98,4	96,3	98,0	97,6
0,045	94,0	13,0	90,1	93,6	91,1	86,2	89,9	89,2
0,038	90,0	12,3	85,8	88,9	87,0	80,9	85,0	85,7
0,026	76,6	10,1	79,8	82,6	76,8	68,9	78,5	73,3
0,019	67,4	8,6	60,7	65,9	63,5	60,8	60,3	62,7
0,014	54,8	7,0	51,9	57,1	54,4	53,4	51,6	54,3
0,009	44,9	5,3	42,0	46,8	44,5	44,7	42,0	44,8
0,007	39,4	4,4	36,3	40,7	38,4	39,7	36,0	38,7

Ensaio			51	52	53	54	55	56
Top size (mm)			75	75	75	80	80	80
Dia da amostragem	29/05/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	99,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	97,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	96,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	93,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	90,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	87,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	81,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	72,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	57,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	42,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	30,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,250	100,0	22,0	100,0	100,0	100,0	99,7	99,6	100,0
0,150	100,0	17,3	99,5	99,5	99,5	98,9	97,9	99,6
0,106	99,7	15,8	98,0	97,0	98,1	96,6	96,1	97,4
0,075	98,8	14,5	93,6	90,8	93,4	89,8	90,4	91,1
0,045	94,0	13,0	83,7	79,0	82,3	74,9	77,1	79,0
0,038	90,0	12,3	81,1	75,4	78,4	70,1	72,6	75,3
0,026	76,6	10,1	61,0	62,9	60,8	57,4	57,9	62,5
0,019	67,4	8,6	53,9	57,0	54,0	51,2	50,9	56,2
0,014	54,8	7,0	47,2	50,6	46,8	44,3	43,9	49,8
0,009	44,9	5,3	39,0	43,8	38,5	36,5	35,3	41,9
0,007	39,4	4,4	34,6	39,5	33,8	31,9	30,4	31,1

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	45		46	47	48	49	50
Bitola (mm)	50		50	50	60	60	60
Dia da amostragem	29/05/2007						
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)						
Fe	66,84	67,04	67,20	67,17	67,17	67,03	66,96
SiO ₂	0,75	0,73	0,84	0,83	0,84	0,86	0,91
P	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
Al ₂ O ₃	0,79	0,65	0,68	0,68	0,68	0,78	0,75
Mn	1,00	1,01	0,61	0,64	0,61	0,62	0,75
CaO	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01
MgO	0,04	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
TiO ₂	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
K ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
PPC	1,40	1,27	1,45	1,46	1,48	1,55	1,48
Área Específica (cm ² /g)	4615		4615	5217	4615	5000	4444

Ensaio	51		52	53	54	55	56
Bitola (mm)	75		75	75	80	80	80
Dia da amostragem	29/05/2007						
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)						
Fe	66,84	67,04	67,06	67,11	67,10	67,17	67,17
SiO ₂	0,75	0,73	0,89	0,83	0,87	0,86	0,82
P	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	0,79	0,65	0,75	0,72	0,77	0,73	0,73
Mn	1,00	1,01	0,59	0,62	0,57	0,55	0,57
CaO	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
MgO	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04
TiO ₂	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
K ₂ O	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PPC	1,40	1,27	1,52	1,51	1,49	1,49	1,49
Área Específica (cm ² /g)	4615		4286	4138	4000	4286	4000

ROTAÇÃO

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	57	58	59	60	61	62		
Rotação (rpm)	58	58	58	54	54	54		
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90		
Dia da amostragem	08/02/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	95,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	95,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	94,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	94,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	94,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	90,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	85,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	78,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	62,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	47,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	33,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,250	99,8	23,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	99,5	16,6	100,0	99,4	100,0	100,0	100,0	100,0
0,106	98,1	14,4	99,3	98,7	99,4	99,6	99,5	99,6
0,075	95,0	13,0	99,0	98,4	99,0	98,2	99,3	99,5
0,045	79,7	11,2	83,4	81,8	82,9	83,5	81,0	83,6
0,038	76,0	10,7	77,0	75,5	76,7	77,3	74,3	77,7
0,026	65,1	9,2	61,1	60,9	59,7	62,4	58,1	60,7
0,019	56,0	8,0	53,4	53,2	52,2	54,0	50,8	53,2
0,014	50,4	6,7	46,2	46,2	45,3	46,3	43,6	46,1
0,009	41,8	5,1	38,6	38,8	38,0	38,4	36,2	38,3
0,007	35,7	4,2	34,2	34,5	33,7	34,0	31,7	34,1

Ensaio	63	64	65		
Rotação (rpm)	50	50	50		
Tempo (min)	90	90	90		
Dia da amostragem	08/02/2007				
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)				
50,0	100,0	97,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	95,8	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	95,2	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	94,9	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	94,8	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	94,3	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	90,6	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	85,5	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	78,6	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	62,9	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	47,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	33,5	100,0	100,0	100,0
0,250	99,8	23,0	100,0	100,0	100,0
0,150	99,5	16,6	100,0	100,0	100,0
0,106	98,1	14,4	98,6	99,4	99,3
0,075	95,0	13,0	91,6	95,3	94,2
0,045	79,7	11,2	75,2	82,0	77,5
0,038	76,0	10,7	69,3	75,9	72,2
0,026	65,1	9,2	54,8	60,0	58,0
0,019	56,0	8,0	47,8	52,6	50,9
0,014	50,4	6,7	41,1	45,4	44,2
0,009	41,8	5,1	34,2	38,0	36,9
0,007	35,7	4,2	30,0	33,3	33,1

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	57	58	59	60	61	62
Rotação (rpm)	58	58	58	54	54	54
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90
Dia da amostragem	08/02/2007					
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)					
Fe	66,85	66,88	67,78	67,75	67,79	67,71
SiO ₂	1,01	1,00	0,75	0,75	0,76	0,77
P	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Al ₂ O ₃	0,82	0,88	0,56	0,56	0,54	0,61
Mn	0,71	0,61	0,45	0,47	0,46	0,46
CaO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
TiO ₂	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
K ₂ O	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
PPC	1,52	1,57	1,08	1,10	1,07	1,10
Área Específica (cm ² /g)	3636		3333	3529	3871	4000

Ensaio	63	64	65
Rotação (rpm)	50	50	50
Tempo (min)	90	90	90
Dia da amostragem	08/02/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)		
Fe	66,85	66,88	67,79
SiO ₂	1,01	1,00	0,81
P	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,82	0,88	0,61
Mn	0,71	0,61	0,45
CaO	0,02	0,01	0,01
MgO	0,04	0,03	0,03
TiO ₂	0,03	0,04	0,02
K ₂ O	0,01	0,02	0,01
PPC	1,52	1,57	0,98
Área Específica (cm ² /g)	3636	2818	3069

GRAU DE ENCHIMENTO

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	66	67	68	69	70	71		
Grau de enchimento (%)	32	32	32	35	35	35		
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90		
Dia da amostragem	08/02/2007							
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)							
50,0	100,0	97,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	95,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	95,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	94,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	94,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	94,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	90,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	85,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	78,6	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	62,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	47,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	33,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,250	99,8	23,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
0,150	99,5	16,6	100,0	100,0	100,0	100,0	99,4	100,0
0,106	98,1	14,4	99,5	99,4	99,4	99,3	98,7	99,4
0,075	95,0	13,0	95,7	95,1	94,8	99,0	98,4	99,0
0,045	79,7	11,2	82,0	81,6	80,5	83,4	81,8	82,9
0,038	76,0	10,7	75,4	74,1	73,9	77,0	75,5	76,7
0,026	65,1	9,2	60,9	60,2	59,6	61,1	60,9	59,7
0,019	56,0	8,0	53,0	53,0	52,2	53,4	53,2	52,2
0,014	51,1	6,7	45,6	45,7	44,8	46,2	46,2	45,3
0,009	41,8	5,1	38,2	38,6	37,5	38,6	38,8	38,0
0,007	35,7	4,2	33,5	34,2	33,3	34,2	34,5	33,7

Ensaio	72	73	74		
Grau de enchimento (%)	38	38	38		
Tempo (min)	90	90	90		
Dia da amostragem	08/02/2007				
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)				
50,0	100,0	97,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	95,8	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	95,5	100,0	100,0	100,0
25,0	100,0	95,2	100,0	100,0	100,0
19,0	100,0	94,9	100,0	100,0	100,0
16,0	100,0	94,8	100,0	100,0	100,0
12,5	100,0	94,3	100,0	100,0	100,0
10,0	100,0	92,6	100,0	100,0	100,0
8,0	100,0	90,6	100,0	100,0	100,0
6,3	100,0	85,5	100,0	100,0	100,0
4,0	100,0	78,6	100,0	100,0	100,0
2,0	100,0	62,9	100,0	100,0	100,0
1,0	100,0	47,0	100,0	100,0	100,0
0,5	100,0	33,5	100,0	100,0	100,0
0,250	99,8	23,0	100,0	100,0	100,0
0,150	99,5	16,6	100,0	100,0	100,0
0,106	98,1	14,4	99,6	98,0	99,7
0,075	95,0	13,0	95,4	97,2	97,5
0,045	79,7	11,2	85,1	89,0	89,3
0,038	76,0	10,7	76,2	80,5	81,2
0,026	65,1	9,2	62,2	65,2	64,9
0,019	56,0	8,0	54,3	57,2	56,8
0,014	51,1	6,7	46,7	49,4	48,8
0,009	41,8	5,1	38,9	41,5	40,9
0,007	35,7	4,2	34,7	36,7	36,2

ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	66	67	68	69	70	71
Carga de bolas (kg)	32	32	32	35	35	35
Tempo (min)	90	90	90	90	90	90
Dia da amostragem	08/02/2007					
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor(%)					
Fe	66,85	66,88	67,79	67,84	67,83	67,78
SiO ₂	1,01	1,00	0,82	0,79	0,81	0,75
P	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Al ₂ O ₃	0,82	0,88	0,51	0,51	0,50	0,56
Mn	0,71	0,61	0,47	0,45	0,45	0,45
CaO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
TiO ₂	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03
K ₂ O	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
PPC	1,52	1,57	1,03	1,02	1,02	1,08
Área Específica (cm ² /g)	3636		4615	3636	3636	4000
						3750
						3871

Ensaio	72	73	74
Carga de bolas (kg)	38	38	38
Tempo (min)	90	90	90
Dia da amostragem	08/02/2007		
Amostra	OF CLASS	ROM	Produto
Elementos	Teor (%)		
Fe	66,85	66,88	66,10
SiO ₂	1,01	1,00	0,79
P	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,82	0,88	0,58
Mn	0,71	0,61	0,44
CaO	0,02	0,01	0,01
MgO	0,04	0,03	0,03
TiO ₂	0,03	0,04	0,02
K ₂ O	0,01	0,02	0,01
PPC	1,52	1,57	3,46
Área Específica (cm ² /g)	3636		5000
			4000
			4615

ANEXO 7 – ANÁLISE DOS ENSAIOS DE MOAGEM

CONFIRMAÇÃO DO TEMPO DE MOAGEM

Ensaio	% sólidos	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
6	90	0,89	0,00	6,46	0,36	0,24	4,39	12,34
7	90	0,01	0,93	0,45	1,73	0,38	1,40	4,90
8	90	1,25	1,02	6,18	1,13	2,61	1,39	13,57
9	90	1,31	0,03	2,44	1,50	2,39	1,37	9,04
10	90	0,76	0,95	9,50	1,10	0,89	1,75	14,96
11	90	0,25	0,28	6,56	0,06	0,07	1,15	8,37
12	90	0,04	0,57	8,53	1,10	0,75	2,36	13,36
13	90	0,73	0,91	8,54	0,63	1,37	0,98	13,16
14	90	1,41	1,01	6,92	0,97	2,95	1,85	15,10
15	90	0,40	0,27	3,62	1,67	0,94	0,22	7,12
16	90	0,13	0,14	8,41	0,67	1,23	1,31	11,88

PORCENTAGEM DE SÓLIDOS – 1ª ANÁLISE

Ensaio	% sólidos	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
17	68	0,46	0,45	1,77	1,95	0,69	0,00	5,32
18	68	0,06	0,62	1,44	1,15	1,02	0,41	4,71
19	68	1,03	0,21	7,31	1,95	0,14	0,82	11,45
20	70	0,11	0,80	0,67	1,55	1,39	0,82	5,34
21	70	0,27	0,72	1,18	1,95	1,20	0,41	5,72
22	70	0,64	0,64	1,69	1,15	1,06	0,00	5,18
23	72	0,22	0,92	5,03	1,15	1,61	0,65	9,58
24	72	0,22	0,84	5,05	1,95	1,45	0,65	10,16
25	72	0,48	0,88	5,00	0,76	1,55	0,53	9,19
26	74	0,05	0,99	5,66	1,15	1,76	0,88	10,50
27	74	0,02	1,00	5,47	1,15	1,76	1,00	10,41
28	74	0,15	0,96	5,97	1,15	1,67	0,65	10,54
29	76	0,02	1,16	6,20	0,76	2,08	1,18	11,39
30	76	0,48	1,39	7,39	0,76	2,43	1,59	14,03
31	76	0,48	1,32	8,58	1,15	2,33	1,53	15,39
32	78,6	0,72	1,45	9,52	0,04	2,59	1,82	16,14
33	78,6	0,66	1,44	8,58	1,15	2,53	1,82	16,19
34	78,6	0,93	1,55	9,05	0,04	2,96	2,12	16,66
35	80	1,62	1,76	8,83	0,36	4,31	2,94	19,82
36	80	1,37	1,65	7,87	0,04	2,96	2,59	16,47
37	80	1,41	1,67	7,64	0,36	2,94	2,65	16,67

PORCENTAGEM DE SÓLIDOS – 2ª ANÁLISE

Ensaio	% sólidos	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
17	68	1,18	0,41	29,36	0,41	1,96	2,89	36,22
18	68	0,81	0,25	18,62	0,29	1,53	2,36	23,85
19	68	1,70	0,64	47,88	0,41	2,66	3,95	57,24
20	70	0,65	0,09	21,22	0,06	1,05	1,83	24,91
21	70	1,00	0,16	19,50	0,41	1,30	2,36	24,73
22	70	1,34	0,24	17,78	0,29	1,48	2,89	24,01
23	72	0,96	0,02	6,62	0,29	0,77	2,06	10,72
24	72	0,96	0,05	6,56	0,41	0,98	2,06	11,00
25	72	1,20	0,02	6,73	0,63	0,85	2,21	11,64
26	74	0,80	0,09	4,53	0,29	0,57	1,75	8,03
27	74	0,74	0,10	5,16	0,29	0,57	1,60	8,45
28	74	0,89	0,05	3,47	0,29	0,70	2,06	7,46
29	76	1,02	0,24	4,33	0,63	0,17	1,38	7,77
30	76	0,59	0,45	6,42	0,63	0,28	1,60	9,98
31	76	0,31	0,39	5,24	0,29	0,16	0,92	7,30
32	78,6	0,09	0,51	8,40	1,33	0,48	0,54	11,34
33	78,6	0,14	0,50	5,25	0,29	0,41	0,54	7,12
34	78,6	0,11	0,60	6,84	1,33	0,96	0,16	10,00
35	80	0,75	0,79	6,08	0,98	2,70	0,90	12,20
36	80	0,51	0,69	2,86	1,33	0,96	0,44	6,80
37	80	0,55	0,71	2,11	0,98	0,94	0,52	5,81

PORCENTAGEM DE GRANULADO (NP2)

Ensaio	% NP2	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
38	5	0,24	0,52	5,35	0,90	56,59	57,32	120,92
39	10	0,51	0,00	5,38	0,25	0,03	1,10	7,28
40	15	0,11	0,57	1,82	0,90	18,22	0,53	22,16
41	20	1,16	1,18	7,19	1,22	2,79	1,95	15,48
42	30	0,63	0,55	1,00	0,90	1,44	0,73	5,25
43	40	0,02	0,55	0,76	0,25	1,44	0,39	3,42
44	50	0,33	0,67	4,44	1,22	1,44	0,87	8,97

TAMANHO DE BOLAS

Ensaio	Top size bolas (mm)	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
45	50	0,56	0,42	13,73	0,00	0,94	0,93	16,57
46	50	0,60	0,04	8,98	1,15	1,52	1,19	13,49
47	50	0,00	0,31	13,70	0,00	0,01	0,17	14,19
48	60	0,33	0,83	36,96	0,77	2,68	0,00	41,57
49	60	0,62	0,43	4,10	0,39	0,28	1,02	6,83
50	60	0,07	0,51	13,54	0,38	0,89	0,26	15,65
51	75	1,00	1,09	62,09	0,77	2,78	3,56	71,29
52	75	0,28	1,59	98,29	1,15	6,06	1,44	108,81
53	75	1,20	1,24	56,18	1,54	3,99	3,64	67,79
54	80	1,70	2,03	109,92	0,77	8,09	5,25	127,75
55	80	2,09	1,80	128,11	1,15	7,09	5,51	145,75
56	80	0,26	1,59	84,32	1,54	6,06	2,03	95,80

ROTAÇÃO

Ensaio	Rotação (rpm)	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
57	58	0,42	0,47	6,53	0,30	0,89	2,69	11,31
58	58	0,34	0,26	2,90	0,61	0,49	2,77	7,37
59	58	0,55	0,40	6,96	0,30	0,78	3,31	12,30
60	54	0,47	0,48	7,96	0,91	0,93	2,54	13,29
61	54	1,12	0,17	7,44	0,30	0,27	4,15	13,45
62	54	0,45	0,49	7,96	0,61	1,00	2,77	13,28
63	50	1,60	0,56	2,63	2,90	1,36	6,15	15,21
64	50	0,67	0,29	6,84	1,85	0,56	3,15	13,36
65	50	0,73	0,28	6,32	0,30	0,62	4,08	12,32

GRAU DE ENCHIMENTO

Ensaio	Grau de enchimento (%)	SPD ₁	SPD ₂	SPD ₃	SPD ₄	SPD ₅	SPD ₆	SPD _{total}
66	32	0,62	0,29	7,37	2,12	0,51	2,92	13,83
67	32	0,42	0,24	6,84	0,00	0,38	2,92	10,80
68	32	0,67	0,10	6,84	0,00	0,13	3,38	11,13
69	35	0,42	0,47	1,27	0,91	0,89	2,69	6,65
70	35	0,34	0,26	2,90	0,30	0,49	2,77	7,07
71	35	0,55	0,40	6,96	0,61	0,78	3,31	12,60
72	38	0,28	0,68	7,89	2,73	0,96	2,31	14,84
73	38	0,28	1,17	0,53	0,91	1,67	1,00	5,55
74	38	0,14	1,20	8,42	2,12	1,80	1,31	14,99

ANEXO 8 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PELO ENSAIO DE PADRÃO

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Ensaio	75	76	77	78	79	80
Minério	N4W Central			N4E		
Amostra	ROM	Produto	Produto	ROM	Produto	Produto
Abertura (mm)	Porcentagem Passante Acumulada (%)					
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	100,0
25,0	99,7	100,0	100,0	98,8	100,0	100,0
19,0	97,9	100,0	100,0	97,0	100,0	100,0
16,0	96,8	100,0	100,0	96,1	100,0	100,0
12,5	94,7	100,0	100,0	94,3	100,0	100,0
10,0	91,6	100,0	100,0	91,2	100,0	100,0
8,0	88,7	100,0	100,0	88,5	100,0	100,0
6,3	84,9	100,0	100,0	84,3	100,0	100,0
4,0	75,9	100,0	100,0	75,3	100,0	100,0
2,0	63,8	100,0	100,0	64,7	100,0	100,0
1,0	52,7	100,0	100,0	55,9	100,0	100,0
0,5	36,7	100,0	100,0	47,2	100,0	100,0
0,250	22,9	100,0	100,0	36,5	100,0	100,0
0,150	17,5	100,0	100,0	27,0	100,0	100,0
0,106	15,6	99,8	99,7	22,5	100,0	99,9
0,075	14,0	96,5	96,3	19,3	98,8	98,6
0,045	11,7	83,8	83,7	16,1	89,9	89,9
0,038	10,9	77,9	77,3	15,1	83,6	84,6
0,026	9,7	63,6	63,6	13,2	68,6	67,1
0,019	8,3	54,7	55,1	11,3	58,4	57,2
0,014	6,9	47,8	48,0	9,5	49,7	48,8
0,009	5,3	39,8	40,1	7,1	39,6	39,0
0,007	4,2	34,4	34,6	5,4	33,5	32,9

Ensaio	81	82	83	84	85	86		
Minério	N4WN			N5W				
Amostra	ROM	Produto	Produto	Produto	ROM	Produto	Produto	Produto
Abertura (mm)		Teor (%)						
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,5	100,0	100,0	100,0	100,0	99,1	100,0	100,0	100,0
31,5	97,8	100,0	100,0	100,0	98,6	100,0	100,0	100,0
25,0	96,6	100,0	100,0	100,0	98,6	100,0	100,0	100,0
19,0	93,7	100,0	100,0	100,0	97,6	100,0	100,0	100,0
16,0	91,4	100,0	100,0	100,0	97,1	100,0	100,0	100,0
12,5	86,7	100,0	100,0	100,0	96,4	100,0	100,0	100,0
10,0	80,0	100,0	100,0	100,0	94,8	100,0	100,0	100,0
8,0	75,0	100,0	100,0	100,0	92,9	100,0	100,0	100,0
6,3	68,2	100,0	100,0	100,0	89,7	100,0	100,0	100,0
4,0	56,6	100,0	100,0	100,0	81,3	100,0	100,0	100,0
2,0	44,3	100,0	100,0	100,0	66,0	100,0	100,0	100,0
1,0	35,5	100,0	100,0	100,0	48,3	100,0	100,0	100,0
0,5	26,8	100,0	100,0	100,0	34,0	100,0	100,0	100,0
0,250	18,5	100,0	100,0	100,0	23,3	100,0	100,0	100,0
0,150	13,4	100,0	100,0	100,0	17,8	100,0	100,0	100,0
0,106	11,7	99,8	99,9	99,8	15,9	99,9	99,8	99,7
0,075	10,5	97,2	97,5	96,1	14,2	97,6	98,1	97,6
0,045	8,9	85,9	87,3	83,0	11,9	88,9	90,2	89,2
0,038	8,3	79,8	82,3	77,3	11,2	84,2	85,8	84,7
0,026	7,3	65,6	67,1	62,2	9,7	70,8	72,1	71,3
0,019	6,0	56,8	58,3	53,6	8,1	62,5	63,3	62,7
0,014	4,8	49,6	51,1	47,2	6,6	55,0	55,6	55,3
0,009	3,6	41,8	43,3	39,8	4,8	46,2	46,7	46,7
0,007	2,9	36,9	38,2	35,1	3,8	40,3	40,7	40,7

RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA E ÁREA ESPECÍFICA

Ensaio	75	76	77	78	79	80		
Minério	N4W Central				N4E			
Amostra	ROM	Produto	Produto	Produto	ROM	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)							
Fe	67,84	67,65	67,64	67,65	68,41	68,20	68,17	68,12
SiO ₂	0,80	0,68	0,68	0,69	0,59	0,65	0,67	0,64
P	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	0,38	0,44	0,44	0,44	0,51	0,55	0,58	0,59
Mn	0,08	0,15	0,15	0,15	0,35	0,38	0,38	0,41
CaO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01
MgO	0,07	0,05	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
TiO ₂	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00	0,03	0,03	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PPC	1,61	1,85	1,85	1,83	0,51	0,64	0,63	0,71
Área Específica (cm ² /g)	3529	3636	3871		3750	3636	3529	

Ensaio	81	82	83	84	85	86		
Minério	N4WN			N5W				
Amostra	ROM	Produto	Produto	Produto	ROM	Produto	Produto	Produto
Elementos	Teor (%)							
Fe	68,71	68,37	68,31	68,29	67,30	67,12	67,11	67,15
SiO ₂	0,53	0,57	0,54	0,55	0,65	0,63	0,63	0,64
P	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	0,23	0,36	0,32	0,32	0,48	0,54	0,53	0,51
Mn	0,15	0,17	0,19	0,16	0,82	0,85	0,87	0,86
CaO	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,07	0,02	0,02	0,03	0,09	0,04	0,04	0,03
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
PPC	0,68	1,01	1,14	1,19	1,36	1,64	1,63	1,60
Área Específica (cm ² /g)	4286	4000	3871	4615	5217	4444		

ANEXO 9 – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PELO *JKSimMet*

AMOSTRA: N5W

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL MO II	MO PROD II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	99,73	100,0	100,0	100,0	99,6	100,0	100,0	100,0
37,1	99,04	100,0	100,0	100,0	99,10	100,0	100,0	100,0
31,5	98,79	100,0	100,0	100,0	98,61	100,0	100,0	100,0
25,0	98,60	100,0	100,0	100,0	97,40	100,0	99,94	100,0
19,0	97,61	100,0	99,95	100,0	94,45	99,92	99,90	100,0
16,0	97,09	99,95	99,94	100,0	92,32	99,90	99,87	100,0
12,5	96,43	99,94	99,93	100,0	87,61	99,86	99,82	100,0
10,0	95,06	99,93	99,92	100,0	81,94	99,83	99,77	100,0
8,0	92,66	99,92	99,90	100,0	74,82	99,79	99,71	100,0
6,3	89,69	99,91	99,88	100,0	68,96	99,76	99,67	100,0
4,0	81,28	99,88	99,84	100,0	57,32	99,69	99,58	100,0
2,0	65,99	99,78	99,71	100,0	45,08	99,56	99,40	100,0
1,0	48,31	99,32	99,12	100,0	36,34	99,10	98,78	100,0
0,500	34,00	96,64	95,69	100,0	33,95	96,90	95,81	100,0
0,250	23,28	83,77	79,23	100,0	23,30	83,09	77,13	100,0
0,150	17,82	62,09	51,57	99,75	17,81	60,66	47,13	98,95
0,106	15,88	45,28	30,66	97,54	15,88	45,76	28,61	94,32
0,075	14,21	32,81	16,65	90,63	14,20	35,49	17,82	85,57
0,045	11,91	22,72	7,93	75,66	11,90	26,31	10,61	70,81
0,038	11,22	20,58	6,57	70,70	11,21	24,14	9,29	66,23
0,026	9,70	16,83	4,65	60,40	9,69	20,16	7,21	56,85
0,019	8,11	14,36	3,66	52,63	8,10	17,42	5,99	49,82
0,014	6,62	12,37	2,98	45,93	6,61	15,17	5,09	43,77
0,009	4,80	10,07	2,31	37,79	4,79	12,53	4,11	36,43
0,007	3,82	8,98	2,02	33,80	3,81	11,26	3,66	32,83

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	49,7	15,96	46,85	78,17	358	2558,6	5153,3	6083,8
	<i>Overflow</i>	20,4					410,0	2010,8	2159,9
	<i>Underflow</i>	82,9					2148,6	2593,4	3374,7
Classificação II B	Alimentação	54,4	22,75	50,54	73,88	283	2087,0	3839,2	4598,1
	<i>Overflow</i>	28,7					390,0	1358,4	1500,2
	<i>Underflow</i>	79,5					1697,0	2135,7	2752,7

AMOSTRA: N4W CENTRAL**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)**

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL MO II	MO PROD II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
37,1	99,99	100,0	100,0	100,0	99,99	100,0	100,0	100,0
31,5	99,97	100,0	100,0	100,0	99,97	100,0	100,0	100,0
25,0	99,86	100,0	100,0	100,0	99,86	100,0	100,0	100,0
19,0	99,39	100,0	99,99	100,0	99,39	100,0	99,99	100,0
16,0	98,71	99,99	99,98	100,0	98,71	99,99	99,98	100,0
12,5	96,54	99,97	99,96	100,0	96,54	99,97	99,96	100,0
10,0	94,50	99,96	99,95	100,0	94,50	99,96	99,94	100,0
8,0	91,61	99,94	99,93	100,0	91,61	99,94	99,92	100,0
6,3	88,70	99,93	99,91	100,0	88,70	99,92	99,90	100,0
4,0	84,87	99,91	99,88	100,0	84,87	99,90	99,87	100,0
2,0	75,90	99,84	99,79	100,0	75,90	99,83	99,78	100,0
1,0	63,82	99,49	99,37	100,0	63,82	99,47	99,33	100,0
0,500	52,70	97,30	96,75	100,0	52,70	97,21	96,55	100,0
0,250	36,66	83,44	80,16	100,0	36,66	82,92	78,97	100,0
0,150	22,92	55,51	46,86	99,60	22,92	54,52	44,23	99,16
0,106	17,49	35,56	23,58	96,24	17,49	35,94	22,44	94,29
0,075	15,64	24,13	11,57	87,97	15,64	25,74	12,05	85,16
0,045	13,98	16,32	5,27	72,44	13,98	18,27	6,34	70,01
0,038	11,88	14,34	4,11	66,28	11,88	16,21	5,17	64,10
0,026	10,83	11,60	2,81	56,18	10,83	13,30	3,79	54,54
0,019	9,72	9,87	2,19	48,85	9,72	11,41	3,07	47,60
0,014	8,36	8,44	1,76	42,35	8,36	9,82	2,53	41,44
0,009	6,89	6,84	1,35	34,69	6,89	8,03	2,00	34,17
0,007	5,35	5,97	1,15	30,42	5,35	7,04	1,73	30,10

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I B	Alimentação	50,0	14,41	49,02	83,58	509	3383,8	6762,1	7992,6
	Overflow	16,1					330,0	2047,1	2167,1
	Underflow	85,3					3053,8	3579,6	4690,1
Classificação II B	Alimentação	52,6	18,49	51,51	81,25	433	2910,4	5532,0	6590,3
	Overflow	20,3					310,0	1524,1	1636,8
	Underflow	83,0					2600,4	3133,4	4079,0

AMOSTRA: N4WN**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)**

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL MO II	MO PROD II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	99,13	99,98	99,97	100,0	99,13	99,98	99,97	100,0
37,1	98,37	99,96	99,95	100,0	98,37	99,96	99,95	100,0
31,5	97,82	99,95	99,94	100,0	97,82	99,95	99,94	100,0
25,0	96,60	99,93	99,92	100,0	96,60	99,93	99,92	100,0
19,0	93,64	99,90	99,88	100,0	93,64	99,90	99,88	100,0
16,0	91,53	99,88	99,85	100,0	91,53	99,88	99,85	100,0
12,5	86,81	99,84	99,80	100,0	86,81	99,84	99,80	100,0
10,0	81,14	99,81	99,76	100,0	81,14	99,81	99,76	100,0
8,0	74,03	99,77	99,71	100,0	74,03	99,77	99,71	100,0
6,3	68,16	99,74	99,67	100,0	68,16	99,74	99,67	100,0
4,0	56,52	99,68	99,59	100,0	56,52	99,68	99,58	100,0
2,0	44,31	99,55	99,43	100,0	44,31	99,55	99,41	100,0
1,0	35,51	99,11	98,87	100,0	35,51	99,09	98,80	100,0
0,500	26,82	96,50	95,54	100,0	26,82	96,37	95,17	100,0
0,250	18,50	83,51	78,96	100,0	18,50	82,82	77,13	99,99
0,150	13,44	61,04	50,39	99,67	13,44	59,95	46,96	99,04
0,106	11,71	43,98	29,32	97,02	11,71	44,50	27,88	94,48
0,075	10,53	31,85	15,93	89,54	10,53	34,07	16,93	85,67
0,045	8,93	22,11	7,72	74,25	8,93	24,97	9,80	70,65
0,038	8,35	19,99	6,41	69,21	8,35	22,82	8,51	65,92
0,026	7,31	16,33	4,57	58,98	7,31	18,97	6,53	56,42
0,019	6,02	13,91	3,61	51,28	6,02	16,33	5,39	49,30
0,014	4,84	11,97	2,95	44,70	4,84	14,18	4,55	43,21
0,009	3,62	9,78	2,30	36,91	3,62	11,72	3,67	36,00
0,007	2,93	8,74	2,03	33,12	2,93	10,55	3,28	32,48

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I	Alimentação	50,2	16,49	47,54	78,37	363	2574,0	5129,5	6065,5
	Overflow	20,7					400,0	1933,3	2078,8
	Underflow	82,7					2174,0	2628,1	3418,7
Classificação II	Alimentação	54,0	21,90	50,59	75,05	301	2184,5	4046,8	4841,1
	Overflow	27,3					380,0	1394,0	1532,2
	Underflow	80,1					1804,5	2253,3	2909,5

AMOSTRA: N4E**DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PASSANTE ACUMULADO (%)**

Tamanho (mm)	AL MO I	MO PROD I	U/F CLASS I	O/F CLASS I	AL MO II	MO PROD II	U/F CLASS II	O/F CLASS II
63,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
50,0	99,97	100,0	100,0	100,0	99,98	100,0	100,0	100,0
37,1	99,80	100,0	100,0	100,0	99,84	100,0	100,0	100,0
31,5	99,55	100,0	99,99	100,0	99,59	100,0	99,99	100,0
25,0	98,78	99,99	99,98	100,0	98,79	99,99	99,97	100,0
19,0	97,03	99,97	99,96	100,0	97,02	99,97	99,94	100,0
16,0	96,04	99,96	99,95	100,0	96,06	99,96	99,93	100,0
12,5	94,33	99,95	99,93	100,0	94,36	99,95	99,91	100,0
10,0	91,77	99,94	99,91	100,0	91,77	99,94	99,89	100,0
8,0	88,01	99,92	99,88	100,0	87,97	99,92	99,86	100,0
6,3	84,29	99,90	99,86	100,0	84,27	99,90	99,83	100,0
4,0	75,26	99,86	99,81	100,0	75,25	99,86	99,77	100,0
2,0	64,65	99,77	99,69	100,0	64,69	99,77	99,64	100,0
1,0	55,94	99,45	99,26	100,0	55,90	99,43	99,16	100,0
0,500	47,23	97,48	96,60	100,0	47,20	97,38	96,20	100,0
0,250	36,44	86,48	81,74	100,0	36,47	85,92	79,71	99,98
0,150	27,03	65,05	52,93	99,63	27,02	64,41	49,29	98,64
0,106	22,46	48,34	31,28	96,90	22,48	49,83	30,56	93,54
0,075	19,34	36,34	17,61	89,74	19,30	39,76	19,86	84,93
0,045	16,08	26,34	9,06	75,58	16,09	30,51	12,57	71,21
0,038	15,10	24,09	7,66	70,91	15,11	28,22	11,16	66,92
0,026	13,16	20,09	5,63	61,29	13,18	23,99	8,91	58,21
0,019	11,29	17,40	4,55	54,01	11,28	21,03	7,55	51,62
0,014	9,52	15,20	3,79	47,68	9,52	18,57	6,51	45,91
0,009	7,13	12,57	3,01	39,77	7,07	15,57	5,35	38,73
0,007	5,41	11,21	2,64	35,59	5,41	14,02	4,78	34,96

RECUPERAÇÕES, CARGA CIRCULANTE E VAZÕES

Bateria de ciclonagem	Fluxo	% sólidos	Ra (%)	Rp (%)	Rs (%)	CC (%)	Vazão		
							sólidos (t/h)	água (t/h)	polpa (m³/h)
Classificação I	Alimentação	52,2	15,75	46,15	74,02	285	2249,7	4313,1	5131,2
	Overflow	25,2					540,0	2146,3	2342,6
	Underflow	83,7					1709,7	2043,4	2665,1
Classificação II	Alimentação	56,5	22,67	49,12	69,45	227	1863,9	3296,6	3974,3
	Overflow	34,0					500,0	1472,8	1654,6
	Underflow	79,9					1363,9	1706,1	2202,1