

RONEY ALVARENGA LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE
BAUXITA DA ALUMAR**

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

**CONSULTA
FD-5116**

**São Paulo
2008**

OK

RONEY ALVARENGA LIMA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE MOAGEM DE
BAUXITA DA ALUMAR**

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

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Homero Delboni Junior

São Paulo
2008

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus que me impulsionou em direção à realização de mais uma etapa da minha vida; à minha mãe pelas cobranças ao telefone e ao meu pai que ficaria orgulhoso deste feito.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, pela "eterna" cobrança, sempre questionando quando finalizaria o mestrado.

À Alcoa, especialmente aos amigos engenheiros de processos da Interface que, por várias vezes, tiveram paciência em me explicar o processo Bayer. Aos engenheiros Denis Nicoli (Alcoa Austrália) e Luiz Rocha (ALUMAR) que me forneceram diversas informações, dados técnicos e excelentes debates sobre o assunto.

Ao gerente de comissionamento e processos do projeto de expansão da refinaria Carlos Eduardo Neves, por dar todo apoio necessário para realização deste mestrado.

À ALUMAR, em especial ao superintendente de manutenção Luis Augusto Santos por me dar informações referentes a essa área e apoio durante a aprovação da empresa.

Ao Professor Homero Delboni Jr., pelo carinho, capacitação técnica e acreditar no meu trabalho, ajudando de forma incomparável, sempre me motivando a desenvolver o melhor caminho e pensando em me dar não só a melhor formação teórica, mas principalmente pensando nas aplicações práticas.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Petróleo da EPUSP, pelas aulas ao longo do Mestrado e pela severidade nas cobranças.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo que representa o atual circuito de moagem da ALUMAR. Este modelo teve por base 52 amostragens realizadas no circuito industrial estudado por um período de dois meses. O modelo desenvolvido foi empregado para análise de desempenho do circuito atual e indicou ser um recurso bastante útil para estabelecimento de cenários de operação e ajustes para obtenção do produto especificado. O mesmo modelo serviu de base para simulação e análise de desempenho da nova linha de moagem da ALUMAR. Sob a ótica da abordagem energética de Bond/Rowland o circuito atual da ALUMAR apresenta desempenho considerado excelente.

Palavras-chave: Cominuição. Modelo. Simulação.

ABSTRACT

In this work was developed a model which represents the existing ALUMAR grinding circuit. This model was based on 52 samples collected from the industrial circuit in a period of two months. The developed model was applied to analyze the existing circuit performance being a very useful resource for establishing different operational scenarios and adjustments in order to achieve the correct product specification required by the process. The same model was used for performance analysis and simulation of ALUMAR's future grinding circuit. Under Bond/Rowland's energetic approach, ALUMAR's existing grinding circuit presents an excellent performance.

Key-words: Comminution. Modeling. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 – Amostrador de polpas	23
Figura 3.2 – JK Drop Weight Tester	25
Figura 3.3 – Ultrafast Loace Cell – UFLC	26
Figura 3.4 – Estágio de quebra para moinho de barras	28
Figura 3.5 – Função Seleção (S) do modelo do moinho de barras	30
Figura 3.6 – Fluxos mássicos das partículas	34
Figura 3.7 – Distribuição típica do quociente r/d^*	35
Figura 3.8 – Diagrama do processo Bayer	50
Figura 3.9 – Ilustração de um moinho bi-cônico	54
Figura 3.10 – Ilustração de um moinho compeb	55
Figura 3.11 – Ilustração de um moinho rodpeb	56
Figura 3.12 – Foto da usina de moagem da refinaria de Pinjarra (Austrália).....	61
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do fluxo de processo – Refinaria da ALUMAR	62
Figura 4.2 – Desenho esquemático do sistema de alimentação de bauxita da ALUMAR	65
Figura 4.3 – Diagrama de blocos do fluxo de processo da bauxita – Refinaria da ALUMAR	68
Figura 4.4 – Escopo básico do projeto de expansão da Refinaria da ALUMAR	70
Figura 4.5 – Fluxograma do circuito de moagem da ALUMAR após a expansão da refinaria	72
Figura 5.1 – Fluxograma do circuito de moagem – linha 41	74
Figura 5.2 – Foto do pátio de bauxita recebida por navios e estocada em pilhas	75
Figura 5.3 – Foto interna da câmara de barras do moinho 025-MO-41	79
Figura 5.4 – Foto interna da câmara de bolas do moinho 025-MO-41	79
Figura 6.1 – Distribuição granulométrica média da alimentação do moinho	81
Figura 6.2 – Distribuição granulométrica média do produto do moinho	85
Figura 6.3 – Circuito considerado no modelo para representar a moagem da ALUMAR	86
Figura 6.4 – Função seleção (S) utilizada no modelo que representa o compartimento de barras do moinho da ALUMAR	89
Figura 6.5 – Distribuição dos parâmetros r/d^* utilizados no modelo que representa o compartimento de bolas do moinho da ALUMAR	90
Figura 6.6 – Distribuições granulométricas resultantes do modelo integrado dos moinhos da ALUMAR	92
Figura 6.7 – Modelo integrado para moinho rodpeb da ALUMAR	92

Figura 6.8 – Distribuições granulométricas do Caso Base	97
Figura 6.9 – Modelo do Caso Base	97
Figura 6.10 – Simulação 1 – redução da carga de barras	98
Figura 6.11 – Modelo do Caso Base e Simulação 1	100
Figura 6.12 – Simulação 2 – redução da carga de bolas	101
Figura 6.13 – Modelo do Caso Base e Simulação 2	103
Figura 6.14 – Simulação 3 – redução da carga de barras e bolas	104
Figura 6.15 – Modelo do Caso Base e Simulação 3	106
Figura 6.16 – Simulação 4 – aumento na granulometria de alimentação do moinho	107
Figura 6.17 – Modelo do Caso Base e Simulação 4	109
Figura 6.18 – Simulação 5 – redução na granulometria de alimentação do moinho	110
Figura 6.19 – Modelo do Caso Base e Simulação 5	112
Figura 6.20 – Caso Base do novo circuito de moagem da ALUMAR	113
Figura 6.21 – Simulação do novo circuito de moagem da ALUMAR – aumento da vazão de sólidos (capacidade máxima)	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação entre ordenada normal e nível de confiança	20
Tabela 3.2 – WI médios de alguns minérios e materiais (kWh/t curta)	42
Tabela 3.3 – Fator de influência do circuito aberto	43
Tabela 3.4 – Reserva e produção mundial de bauxita	52
Tabela 4.1 – Composição média da bauxita recebida na ALUMAR	63
Tabela 4.2 – Característica dos moinhos 025-MO-41 e 025-MO-51 da ALUMAR	66
Tabela 4.3 – Característica dos moinhos de barras 025-MO-21 e 025-MO-31	72
Tabela 4.4 – Característica dos moinhos de bolas 025-MO-22 e 025-MO-32	73
Tabela 6.1 – Distribuição granulométrica da bauxita consumida na alimentação da moagem	80
Tabela 6.2 – Resultados do Wlbarras	82
Tabela 6.3 – Resultados do Wlbolas	82
Tabela 6.4 – Dados das amostragens do produto do moinho	83
Tabela 6.5 – Relação entre ordenada central e nível de confiança	87
Tabela 6.6 – Parâmetros associados à calibração do moinho de barras	88
Tabela 6.7 – Taxas de quebra r/d^* determinados para calibração do modelo do moinho de bolas	90
Tabela 6.8 – Distribuição granulométrica dos fluxos presentes no modelo integrado	91
Tabela 6.9 – Distribuição granulométrica dos fluxos presentes no Caso Base	96
Tabela 6.10 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 1	99
Tabela 6.11 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 2	102
Tabela 6.12 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 3	105
Tabela 6.13 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 4	108
Tabela 6.14 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 5	111
Tabela 6.15 – Dados e distribuições granulométricas do Caso Base do novo circuito de de moagem da ALUMAR	115
Tabela 6.16 – Resultados das simulações realizadas considerando um aumento da da vazão de sólidos na alimentação do circuito	117
Tabela 6.17 – Valores de WI_o , WI_{oc} e eficiência associados ao circuito de moagem da ALUMAR	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 AMOSTRAGEM	16
3.1.1 O tamanho da amostra	19
3.1.2 Técnicas de amostragem	21
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO QUANTO À FRAGMENTAÇÃO	23
3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE COMINUIÇÃO	26
3.3.1 Modelo Matricial (<i>Matrix Model</i>) – aplicação à moinhos de barras	27
3.3.2 Modelo Misturador perfeito (Perfect Mixing Model) – moinhos de bolas	33
3.3.3 Calibração dos modelos	38
3.3.3.1 Calibração do modelo do moinho de barras	39
3.3.3.2 Calibração do modelo do moinho de bolas	40
3.4 MÉTODO DE BOND	40
3.4.1 Eficiência energética (Bond/Rowland)	46
3.4.2 Potência consumida pelos moinhos	47
3.4.3 As limitações do Método de Bond	48
3.5 BAUXITA E CIRCUITOS DE MOAGEM	49
3.5.1 Bauxita no mundo	52
3.5.2 Bauxita no Brasil	52
3.5.3 Moagem de Bauxita no mundo	53
3.5.3.1 Moinhos Bi-cônicos	54
3.5.3.2 Moinhos Multi-câmaras (<i>compeb</i>)	55
3.5.3.3 Moinhos Dupla-câmara (<i>rod-peb</i>)	55
3.5.3.4 Moinhos de barras	57
3.5.3.5 Moinhos SAG	57
3.5.4 Histórico da moagem de bauxita na Alcoa	58
4 OPERAÇÃO INDUSTRIAL DA REFINARIA DA ALUMAR	62
4.1 RECEBIMENTO DE BAUXITA E ESTOCAGEM	63
4.2 CIRCUITO DE MOAGEM	64

4.2.1 Sistema de alimentação de bauxita	65
4.2.2 Moinhos e bombeamento de produto moído	66
4.3 EXPANSÃO DA ALUMAR – PROJETO ALREFU2	69
4.3.1 Novo circuito de moagem da ALUMAR	71
5 MATERIAIS E MÉTODOS	74
5.1 ALIMENTAÇÃO DO MOINHO	75
5.2 PRODUTO DO MOINHO	76
5.2.1 Determinação da concentração de sólidos na polpa (g/l)	76
5.2.2 Distribuição granulométrica	77
5.2.3 WI de barras e bolas	77
5.3 DIMENSÕES INTERNAS DO MOINHO.....	78
5.4 VOLUME DE CORPOS MOEDORES	78
6 RESULTADOS	80
6.1 RESULTADOS RELATIVOS AO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS.....	80
6.1.1 Distribuição granulométrica e umidade da alimentação	80
6.1.2 WI_{BARRAS} E WI_{BOLAS}	82
6.1.3 Amostras do produto do moinho	85
6.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	85
6.2.1 Modelo da seção de barras	87
6.2.2 Modelo da seção de bolas	89
6.2.3 Modelo integrado	91
6.2.4 Potência dos moinhos	93
6.2.4.1 <i>Potência absorvida pela câmara de barras</i>	93
6.2.4.2 <i>Potência absorvida pela câmara de bolas</i>	93
6.2.4.3 <i>Potência total do moinho estudado</i>	94
6.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES	95
6.3.1 Variações de parâmetros operacionais do Caso Base	95
6.3.1.1 <i>Simulação 1 – Carga de barras</i>	98
6.3.1.2 <i>Simulação 2 – Carga de bolas</i>	101
6.3.1.3 <i>Simulação 3 – Carga de barras e bolas</i>	103
6.3.1.4 <i>Simulação 4 – Granulometria de alimentação mais grossa</i>	107
6.3.1.5 <i>Simulação 5 – Granulometria de alimentação mais fina</i>	110
6.3.2 Novo circuito de moagem da ALUMAR	112

6.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (BOND/ROWLAND)	116
7 SUMÁRIOS E CONCLUSÕES	118
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APÊNDICE A – Lista de moinhos que operam em circuitos de cominuição de bauxita	123
APÊNDICE B – Cálculo do valor de T80	125
APÊNDICE C – Cálculo da eficiência de moagem do compartimento de barras e bolas	126
ANEXO A – Tabela de Richards: Massa da amostra para diferentes granulometrias (kg)	128
ANEXO B – Procedimento de amostragem da ALUMAR na área de moagem	129
ANEXO C – Resultado dos testes de WI de barras e bolas do material amostrado	142

1 INTRODUÇÃO

O modelamento matemático de processos minerais não é um assunto recente e já no final dos anos 70 foram colocados no mercado os primeiros softwares de simulação. Inicialmente estes modelos eram utilizados para fins de projeto e otimização. Com o avanço da computação, o desenvolvimento desta tecnologia ocorreu de maneira natural, com o aprimoramento dos modelos matemáticos. Houve também o desenvolvimento de simuladores comerciais mais acessíveis.

Um modelo matemático é uma expressão ou um conjunto de equações que visa representar um processo físico e/ou químico. Pode-se definir basicamente três tipos de modelos: os teóricos, os empíricos e os fenomenológicos.

Os modelos teóricos têm por base os princípios estabelecidos cientificamente, pelas leis da física e da química (ou físico-química), como por exemplo, os fenômenos de transporte. Já os modelos empíricos são mais simples e foram desenvolvidos através de regressões entre dados experimentais e os parâmetros selecionados. Esses normalmente expressam o desempenho do processo fazendo uso do método de regressão linear calculando, por exemplo, a distribuição granulométrica do produto de uma operação de moagem, sob determinada condição operacional. Os modelos mais robustos são aqueles que representam processos particulares com um grande número de dados colecionados industrialmente.

Os modelos fenomenológicos são desenvolvidos a partir da descrição do processo em termos de parâmetros criados para representá-lo. Atualmente há modelos fenomenológicos poderosos, constituindo uma representação realista do processo. Nesta categoria, houve o maior desenvolvimento de trabalhos nos últimos anos.

Segundo Luz; Sampaio e Almeida (2004), simulação é qualquer procedimento usado para modelar um processo, sem ter que operá-lo. A simulação computacional é utilizada com frequência na indústria mineral mundial, ajudando os profissionais da área na adoção de procedimentos que melhoram o desempenho de circuitos de beneficiamento e reduzem seu custo operacional. Atualmente são bastante

utilizados modelos matemáticos para representar a operação de etapas de britagem, moagem, classificação, separação gravítica, flotação, entre outros, conforme informado por Laguitton e Flament (1984).

A combinação do aquecimento da economia mundial e sua globalização com a crescente demanda por recursos cada vez mais escassos, resulta atualmente na busca por excelência nas operações mineiras, direcionando os esforços no sentido de melhorar o desempenho, a produtividade e a confiabilidade de usinas de beneficiamento de minério.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho descreve em detalhes o processo de aplicação de modelagem matemática e simulação ao circuito industrial de moagem de bauxita da ALUMAR, localizada em São Luis, MA. O objetivo principal foi a obtenção de um modelo que representasse o sistema de moagem utilizando moinhos dupla câmara.

O modelo desenvolvido foi empregado para análise de desempenho do circuito atual, bem como para estabelecimento de cenários de melhoria de índices técnicos e econômicos da operação estudada.

Além disso, o modelo desenvolvido foi empregado para prever o desempenho da futura linha de moagem em fase de implantação na ALUMAR.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AMOSTRAGEM

A amostragem é uma atividade fundamental em áreas como a avaliação de depósitos minerais, análise de processos, comercialização dos produtos, entre outros. Uma amostragem mal conduzida pode resultar em distorção dos resultados, com conseqüências potenciais em áreas técnicas e econômicas de empreendimentos mineiros.

Amostragens industriais consistem em obter dados e amostras de um circuito durante certo período de forma a representar tal operação.

Amostra é uma quantidade representativa do todo que se deseja amostrar. Normalmente não é uma tarefa fácil, pois os erros se acumulam desde a coleta da amostra quanto no processamento da mesma. Segundo Luz; Sampaio e Almeida (2004), diversos são os erros que podem contribuir com o erro total da amostra, sendo este definido pelo somatório dos erros provenientes das etapas de amostragem propriamente dita (E_a) e da preparação da amostra primária (E_{pr}).

O erro da amostragem propriamente dita (E_a) é representado pela somatória de sete erros independentes.

- **E: Erro fundamental**

Resultante da heterogeneidade de constituição do material. Depende fundamentalmente da massa da amostra e do tipo de material amostrado. Mesmo em condições ideais de amostragem esse erro não pode ser evitado e sim minimizado. Para isso, a amostra tomada de um dado universo deverá apresentar a massa mínima calculada para obtenção de um erro conhecido com uma dada confiança estatística.

- **E_D : Erro de ponderação**

Resultante da não uniformidade da densidade ou da vazão do material. Advém de alterações na densidade ou na vazão da polpa durante o período da coleta de uma amostra em uma instalação contínua de tratamento de minério. Para minimização desse erro, a operação da planta deve manter os fluxos regulados da forma mais constante possível.

- **E_I : Erro de integração**

Resultante do grau de heterogeneidade de distribuição de material. Para minimização desse erro deve-se realizar a amostragem em fluxos estáveis onde o minério apresenta composição constante. Caso tais hipóteses não sejam possíveis, deve-se aumentar o número de alíquotas necessárias à composição da amostra primária.

- **E_P : Erro de periodicidade**

Resultante de variações periódicas da qualidade do material amostrado. Para minimização deste erro deve-se evitar conduzir a coleta de incrementos na mesma periodicidade do processo.

- **E_S : Erro de segregação**

Resultante da heterogeneidade de distribuição localizada do material. Pode ser decorrente da formação de agregados do material antes de se efetuar a amostragem. Pode ser minimizado através de uma eficiente homogeneização do lote a ser amostrado.

- **E_E : Erro de delimitação**

Resultante da configuração incorreta da delimitação da dimensão dos incrementos em termos de volume. Pode ser reduzido utilizando-se de ferramentas adequadas para o manuseio de amostras.

- **E_G : Erro de agrupamento**

Resultante da operação de tomada de incrementos, sendo dependente da forma de obtenção da amostra e recipientes utilizados na coleta de amostras.

Já o erro resultante da preparação da amostra primária (E_{pr}) é representado pela somatória de outros cinco erros independentes:

- **E_{PA} : Erro de perda**

Erro causado pela perda de partículas durante a amostragem.

- **E_{CO} : Erro de contaminação**

Erro causado pela contaminação da amostra por materiais estranhos.

- **E_A : Erro de alteração**

Erro resultante da alteração da característica a ser determinada pela amostra.

- **E_{NO} : Erros não intencionais do operador**

São erros relacionados à amostragem não intencional dos operadores como, por exemplo, misturar amostras diferentes.

- **E_{IO} : erros intencionais do operador**

Erros intencionais do operador (sabotagem), por exemplo, modificar a amostra, alterando o teor ou outro parâmetro importante.

Os erros relacionados à técnica de amostragem são evitados, empregando-se corretamente o que as técnicas recomendam: quarteamento, homogeneização e secagem. Quanto aos erros de operação, sua redução será recorrente da destreza, do cuidado do operador ao realizar a amostragem e do nível de treinamento.

Visando sempre minimizar os erros de amostragem, deve-se ter um plano de amostragem bem definido e após consolidado e em uso, é importante criar meios de avaliação que verifiquem sua conformidade ao que foi planejado. Um bom plano de amostragem deve definir o método de retirada da amostra primária, o tamanho desta amostra e o tratamento que mesma terá.

3.1.1 O tamanho da amostra

Napier-Munn et al. (1999) ressalta que se pudesse escolher o tamanho da amostra para representar seu processo em estudo, escolheria a maior possível, desde que isso aumentasse a confiabilidade do resultado final. Porém, com o objetivo de redução de custos cada vez mais desafiador nas empresas, a escolha do tamanho da amostra deve ser um consenso entre as partes econômicas e a confiança do resultado.

Pierre Gy (1976) elaborou uma teoria muito importante sobre amostragem, que permite estimar os erros associados às amostras. Compreende a definição do tamanho mínimo de amostra primária que garanta um nível de confiança requerido. Baseado em sua teoria, Barbery (1972) derivou uma expressão para determinar o tamanho dessa amostra primária:

$$M = \frac{f \rho d_m^3}{v^2 P} \quad (1)$$

onde,

M = massa da amostra requerida (g);

f = fator de forma das partículas ($0 < f < 1$);

ρ = densidade do material (g/cm^3);

d_m = tamanho médio do intervalo granulométrico de interesse (cm);

P = proporção de material esperada no intervalo granulométrico de interesse; e

v = desvio padrão do número de partículas no intervalo granulométrico de interesse.

O fator de forma é dado por:

$$f = \frac{M}{\rho d_m^3} \quad (2)$$

Quanto mais próximo o parâmetro f estiver de zero, maior a prevalência de duas dimensões sobre a terceira, quanto mais próximo de um, mais esférica será a

partícula considerada. Para a maioria dos minérios o valor do parâmetro f está entre 0,3 e 0,7. Luz; Sampaio e Almeida (2004, p. 48) afirmam que, na prática f pode ser considerado como uma constante igual a 0,5.

d_m^3 pode ser calculado da seguinte forma:

$$d_m^3 = \frac{d_1^3 + d_2^3}{2} \quad (3)$$

Onde d_1 e d_2 são os tamanhos limite do intervalo de interesse, que segundo Napier-Munn et al. (1999, p. 98), pode-se considerar um intervalo onde a proporção de material dentro dele seja igual a 5% isto é, $P = 5\%$.

v pode ser determinado a partir da precisão e da confiança que se deseja:

$$v = \phi / z \quad (4)$$

onde ϕ representa a precisão escolhida e z a ordenada normal para o nível de confiança requerido. Um nível de confiança de 90% ($z = 1,64$) pode ser considerado adequado para amostragem em geral.

Napier-Munn et al. (1999, p. 99) utiliza a referência apresentada na tabela 3.1 para relacionar o nível de confiança com a ordenada z :

Tabela 3.1 – Relação entre ordenada normal e nível de confiança

Nível de confiança (%)	z
50	0,6745
80	1,2816
90	1,6449
95	1,9600
99	2,5758
99,9	3,2905

Luz; Sampaio e Almeida (2004, p.49) sugerem a utilização da tabela de Richards, mostrada no anexo A, como alternativa à técnica de Gy.

3.1.2 Técnicas de amostragem

No presente trabalho foi dado enfoque às técnicas de amostragem em sólidos sobre transportadores de correia e polpa de produto de moinhos, por fazer parte da etapa experimental do mesmo.

As amostras de transportadores de correia podem ser obtidas de forma manual ou automática. Sempre que seja possível o acesso ao final da correia, deve-se amostrar de forma incremental este ponto, sendo que o instrumento utilizado nessa coleta deverá permitir o corte do fluxo completo de material passante. Caso não seja possível, pode-se utilizar um amostrador automático giratório ou *cross belt*, posicionado em algum ponto do transportador ou até mesmo fazer uma amostragem manual (Grigorieff, 2002).

Segundo Gondim (2007), amostradores giratórios têm como desvantagem coletar incrementos muito acima do requerido por normas específicas. Além disso, quando a quantidade de material transportado pela correia é muito alta, não é recomendável o emprego de amostradores giratórios, porque atravessam o fluxo da correia em movimento, exigindo muita potência do motor.

A largura entre bordas do cortador, geralmente, não é menor que 100 mm e a quantidade de amostra colhida é determinada pela seguinte relação:

$$m_i = \frac{G.a}{3,6.v_b} \quad (5)$$

onde,

m_i = massa do incremento (kg);

G = vazão de material (t/h);

a = abertura mínima entre bordas do cortador (m); e

v_b = velocidade máxima da correia (m/s).

Já em amostragens manuais é necessário parar a correia transportadora. Após tomar as medidas de segurança, deve-se determinar comprimento necessário para tomada da amostra, considerando a forma de carregamento da correia e a sua velocidade. Em caso de carregamento descontínuo o comprimento da amostra deve incluir no mínimo quatro descontinuidades, além de que com o aumento da velocidade da correia, aumenta-se o comprimento da amostra (informação verbal)¹.

Para coleta de amostras em correias utiliza-se um gabarito formado por duas placas de metal ou madeira, com sua posição inferior apresentando a mesma conformação da correia, conforme NBR 8291. O incremento recolhido deve ser composto por todo o material contido entre as placas. Este processo de amostragem é extremamente útil para testar a acuracidade dos amostradores industriais e quando, na falta de amostradores automáticos, tornam-se instrumentos antes de um silo ou pilha pulmão.

Segundo Napier-Munn et al. (1999), a amostragem de polpas em circuito de moagem normalmente é feita de forma manual. Sua forma varia com o tamanho das partículas presentes. É comum, porém não apropriado, o uso de baldes ou balança *Marcy* para coletas.

Para partículas com tamanho menor que 3,3 mm, a abertura entre bordas do amostrador não deve ser menor que 10 mm. Já para as partículas com tamanho maior que 3,3 mm, a abertura entre bordas do cortador não deve ser menor que três vezes o tamanho máximo.

Em alguns circuitos de moagem, em função da dificuldade de acesso aos pontos de coleta, são utilizadas tubulações flexíveis de 50 – 75 mm de diâmetro para desviar parte dos fluxos de polpa e melhorar as condições de amostragem (Napier-Munn et al., 1999, p. 102).

¹ Informação fornecida pela consultora Maria Lúcia Magalhães de Oliveira no Treinamento de Engenheiro de Processos da Refinaria da ALUMAR, São Luis, em fevereiro de 2007.

Outro fator que dificulta a coleta de amostras em circuitos de moagem é a necessidade de tomar incrementos em fluxos acima de 100 t/h. Esta situação muitas vezes resulta na perda de partículas, pois a pressão da linha faz espirrar a polpa no recipiente. Uma boa alternativa é utilizar o amostrador recomendado por Napier-Munn et al. (1999, p. 102), como mostra a figura 3.1.

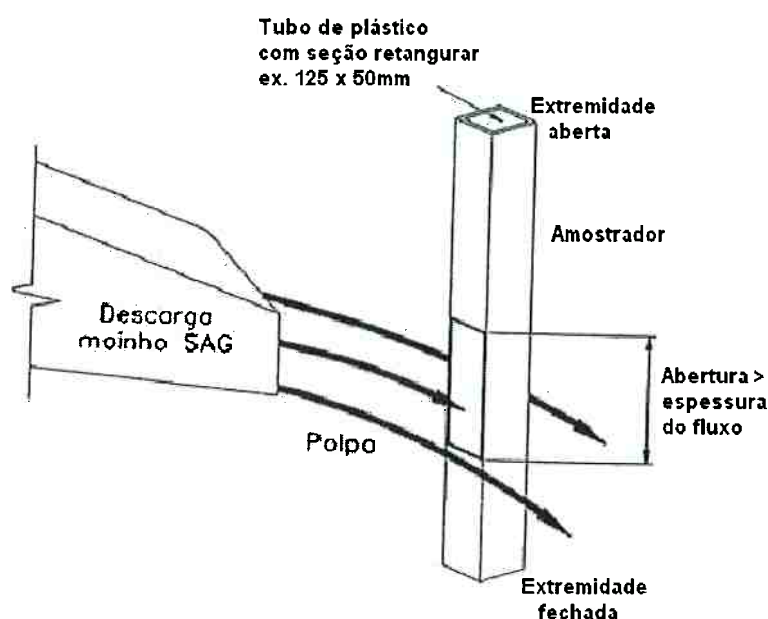


Figura 3.1 – Amostrador de polpas (extraída de Napier-Munn et al., 1999)

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO QUANTO À FRAGMENTAÇÃO

A operação de fragmentação é aplicada a diversos estágios de processamento dos minérios, desde a mina, até a sua adequação ao processo industrial subsequente. A energia despendida nos processos de fragmentação é o principal fator que modula os custos de operação e investimentos em circuitos industriais de moagem.

No processo de moagem ocorre a fragmentação fina, onde o objetivo é obter um produto adequado à concentração ou qualquer outro processo industrial: lixiviação, pelotização, digestão, combustão etc. Uma grande parte de energia gasta no

processamento de minérios é absorvida pela fragmentação e isso acarreta em custos operacionais altos.

Segundo Naschenveng (2003), as informações necessárias para alimentação da maioria dos modelos de cominuição são traduzidas pela parametrização da relação entre a energia aplicada e a fragmentação resultante. As demais variáveis dos modelos representam as características dos equipamentos e/ou dos fenômenos que ali ocorrem.

A metodologia adotada pelo JKMRRC - *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*, empregada em diversos países do mundo, incorpora equipamentos especiais para execução de ensaios de caracterização. Pesquisadores desenvolveram procedimentos para estimar, a partir de quebras controladas sobre partículas individuais, a sua função característica que represente as características de fragmentação de amostras.

Atualmente são mais freqüentes dois tipos de equipamentos para ensaios sobre partículas individuais que utilizam o impacto como mecanismo de quebra. Um deles é o duplo pêndulo, no qual um pêndulo de impacto é solto de uma altura conhecida, impactando sobre a partícula presa ao pêndulo em balanço. Apesar de ser um equipamento simples para estimar a energia utilizada na quebra de partículas, sua operação e resultados obtidos possuem limitações. Além de consumir muito tempo para a sua operação, o dispositivo é restrito a determinados valores de energia e tamanhos de partículas.

As limitações acima levaram a desenvolver o *Drop Weight Tester* (figura 3.2) no qual a partícula que fica sobre uma superfície rígida é atingida por um peso em queda livre. Nesse ensaio, partículas de variados tamanhos são fragmentados individualmente sob diversos níveis de energia. Os produtos fragmentados são posteriormente peneirados para que seja estimado o parâmetro selecionado para representar tal fragmentação.

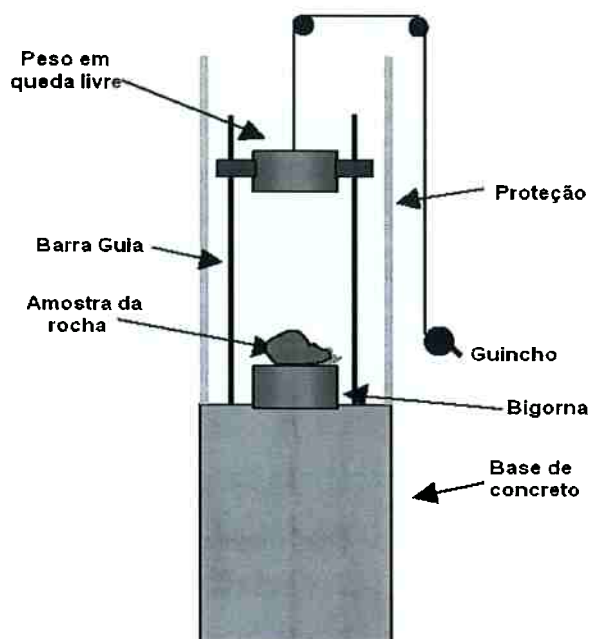


Figura 3.2 – JK Drop Weight Tester

A necessidade de aplicações cada vez mais específicas e precisas vêm levando os diversos centros mundiais de pesquisa a desenvolverem equipamentos cada vez mais confiáveis no que diz respeito aos ensaios de quebra. Chierigati (2001) apresenta uma boa discussão sobre testes realizados utilizando uma Célula de Carga Ultra-Rápida ou *Ultrafast Load Cell* (UFLC), debatendo experimentos feitos por Hoffler e Herbst (1990) e Bourgeois, et al. (1992).

Ao mesmo passo, Tavares e Lima (2006) também descrevem o uso da UFLC evidenciando que, além de permitir mostrar a relação entre a energia de impacto e a fragmentação resultante (como faz o pendulo duplo e o DWT), a UFLC ainda permite a medida precisa da resistência e da energia específica de fratura primária de partículas individuais.

A figura 3.3 mostra um esquema da UFLC e suas diversas partes, onde 1 representa a barra da célula de carga de impacto; 2 – impactor; 3 – eletroímã; 4 – Dispositivo para posicionamento do impactor; 5 – Caixa de coleta de fragmentos; 6 – Sistema laser / foto-diodo.

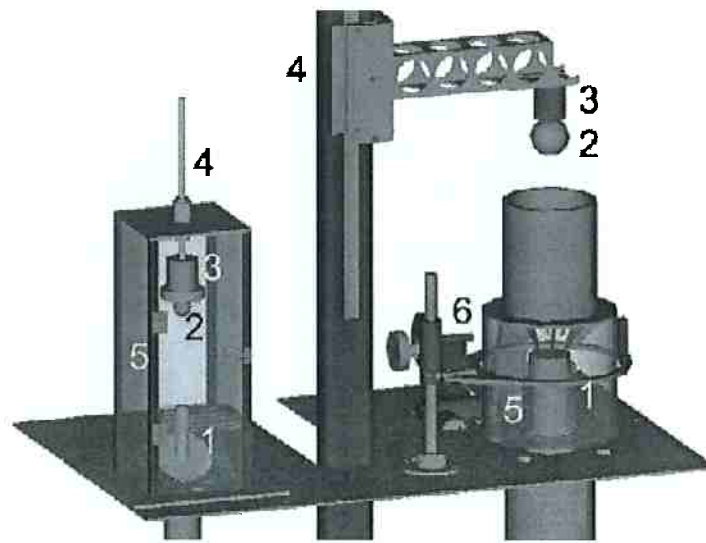


Figura 3.3 – *Ultrafast Load cell* – UFLC

3.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE COMINUIÇÃO

Os modelos para cominuição, especificamente na moagem, são divididos em duas classes principais:

- Aqueles que consideram a cominuição como uma transformação entre a alimentação e distribuição granulométrica do produto, considerando: (a) caracterização do material e (b) a representação dos processos de fragmentação através de variáveis fenomenológicas como taxa de quebra, por exemplo.
- Aqueles que consideram cada elemento dentro do processo, com detalhes do processo de fragmentação, levando em consideração a mecânica newtoniana, as interações entre partículas do minério e elementos do equipamento. Estes requerem uma grande capacidade computacional para simulação, pois considera um número substancial de variáveis. Tais modelos são chamados de Modelos Fundamentais, cujo exemplo é o que se emprega a técnica dos elementos discretos (DEM – *Discrete Element Method*).

É importante considerar também os modelos empíricos, que segundo Girolamo (1997), são derivados inteiramente da observação de dados de saída em resposta à procura da melhor expressão que os correlacione. Estes modelos são bastante úteis para desenvolvimento de modelos teóricos.

Os modelos fenomenológicos são largamente utilizados nas diversas indústrias e centros de pesquisa no mundo. Neste contexto serão apresentados os modelos matriciais (aplicados a moinhos de barras) com base no conceito de que tais modelos utilizam como arcabouço um balanço de massas para as diversas faixas granulométricas, onde a cominuição é tratada com base em eventos de quebra que ocorrem em partículas de classes granulométricas distintas. Os mesmos levam em consideração os seguintes conceitos básicos:

- a) Velocidade específica de quebra de partícula (*Breakage Rate*): Parâmetro referente à probabilidade de uma partícula sofrer cominuição. Durante um processo de cominuição, observa-se que uma fração do material sofre redução de tamanho, enquanto o restante não é cominuído. Como salienta Girolamo (1997), este comportamento está diretamente ligado ao mecanismo principal de quebra e que prevalece no moinho considerado.
- b) Função Quebra (*Appearance Function*): A função quebra representa as características de fragmentação do material, ou seja, a relação entre energia aplicada e fragmentação resultante. Assume-se assim que os valores da função quebra são relacionados às características do minério, podendo ser estimados através de ensaios de laboratório.
- c) Função Classificação (*Discharge Function*): Representa a existência, em muitos equipamentos, de um mecanismo de classificação, onde cada fração granulométrica é submetida a algum processo de classificação, sendo comum ocorrer em moinhos de barras e moinhos com diafragma.

3.3.1 Modelo Matricial (*Matrix Model*) – aplicação a moinhos de barras

Este modelo foi proposto por Whiten (1976) e dada a sua estrutura relativamente simples e lógica é bastante aplicada aos modelamentos de moinhos de barras.

A característica principal de operação de moinhos de barras é que os mesmos produzem uma cominuição preferencial das partículas mais grossas. Segundo Chaves (1999), durante a operação normal, junto à entrada do moinho, as barras se separam abrindo o feixe entre elas. Como junto à descarga o tamanho das partículas é menor, o feixe de barras fica mais fechado, fazendo com que seu volume e espaço tenham um formato afunilado. Isso é responsável por um efeito de classificação interna, o que força as partículas mais grossas sofrerem diversos eventos de cominuição, até serem progressivamente eliminadas. Callcott e Lynch (1964) propuseram que o estágio de quebra dentro de um moinho de barras pode ser entendido através da consideração de três funções matriciais: a de classificação C, a de quebra A e a de seleção S (figura 3.4).

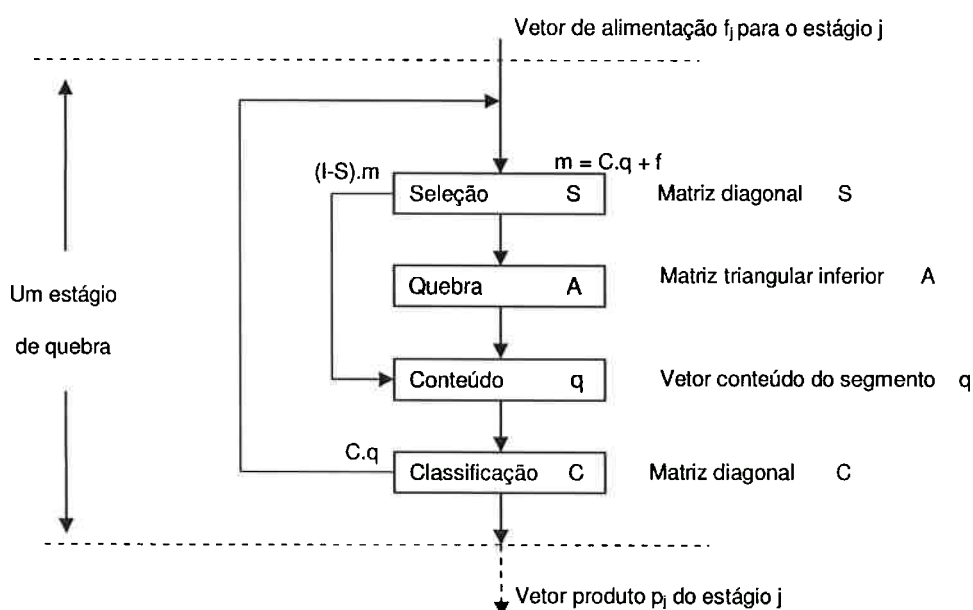


Figura 3.4 – Estágio de quebra para moinho de barras (extraída de Napier-Munn et al., 1999)

De acordo com a figura 3.4, pode-se escrever as seguintes expressões:

$$p = (I - C).q \quad (6)$$

$$q = (I - S).m + A.S.m \quad (7)$$

$$m = c.q + f \quad (8)$$

Realizando substituições e rearranjos das expressões acima pode-se igualar o produto (p) conforme se segue:

$$p = (I - C). (I - S + A.S). [I - C. (I - S + A.S)]^{-1} .f \quad (9)$$

ou

$$p = X_j . f_j \quad (10)$$

onde X_j é o estágio de quebra, desde que A, S e C possam ser assumidos como constante para todos os estágios.

A modelagem matemática é realizada via função seleção (S) e descrita por três parâmetros: intersecção (IN), inclinação (SL) e ponto de intersecção (XC). A figura 3.5 representa um modelo desenvolvido por Whiten (1972), ilustrando o valor para granulometria abaixo da qual as partículas têm um valor constante de probabilidade de quebra e acima da qual elas são sempre quebradas. As partículas com granulometria entre K_1 e K_2 apresentam valores de probabilidade de seleção situados entre o valor associado a K_1 e 1 (associado a K_2). Os valores intermediários aumentam de forma linear com o aumento da granulometria da partícula.

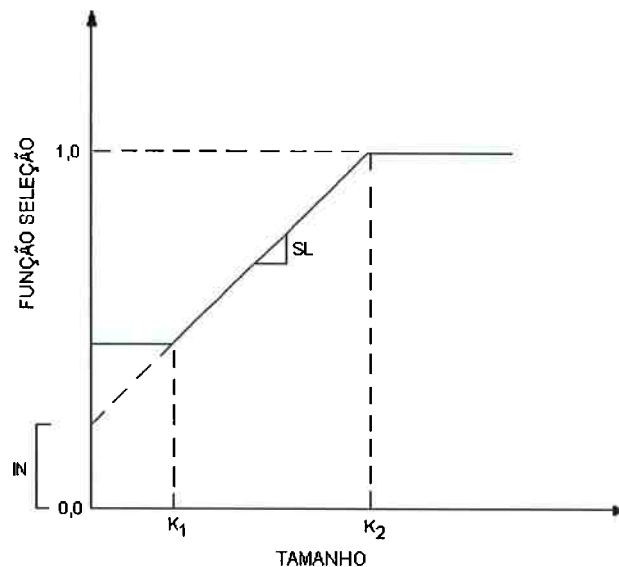


Figura 3.5 – Função seleção (do modelo de moinho de barras (extraída de Napier-Munn et al., 1999)

Segundo Napier-Munn et al. (1999), a função de quebra (A) permanece invariável descrevendo o processo de fragmentação independente do estágio de quebra.

Baseados ainda na premissa de que um moinho de barras pode ser modelado como uma série de zonas de moagem onde ocorrem simultaneamente eventos de cominuição e classificação, Callcott e Lynch (1964) definiram o estágio de quebra para o moinho de barras, como sendo o intervalo necessário para eliminar o maior intervalo granulométrico da alimentação. Considerando que o interior do moinho contém v estágios de quebra, o modelo se transforma em:

$$p = ((I - C). (I - S + A.S). [I - C. (I - S + A.S)]^{-1})^v . f \quad (11)$$

O número de estágios de quebra está geralmente associado à vazão de alimentação. Segundo Napier-Munn et al. (1999), para a maioria dos moinhos de barras, constatou-se que o produto da vazão de alimentação multiplicada pela função do número de estágios de quebra é aproximadamente constante, denominada MC (*Mill Constant*).

$$MC = \text{vazão de alimentação} \cdot v^{1,5} \quad (12)$$

onde v representa o número de estágios de quebra e a vazão de alimentação é dada em t/h.

Após a modelagem, um moinho de barras que opera com um determinado tipo de minério, pode ser simulado para diferentes dimensões e condições operacionais. Os fatores de escala que interagem com o modelo, conforme Napier-Munn et al. (1999) são os seguintes:

- **MC – Mill Constant**

Os fatores determinantes da constante MC são as dimensões do moinho e as suas condições operacionais. Pode-se simular esta constante utilizando a seguinte expressão:

$$\frac{MC_{SIM}}{MC_{AJUST}} = \underbrace{\left(\frac{D_{SIM}}{D_{AJUST}}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{L_{SIM}}{L_{AJUST}}\right)}_{\text{Dimensões do moinho}} \cdot \underbrace{\left(\frac{1-LF_{SIM}}{1-LF_{AJUST}}\right) \cdot \left(\frac{LF_{SIM}}{LF_{AJUST}}\right)}_{\text{Enchimento do moinho}} \cdot \underbrace{\left(\frac{fC_{sSIM}}{fC_{sAJUST}}\right)}_{\text{Velocidade crítica}} \quad (13)$$

D equivale ao diâmetro do moinho (m), L o comprimento (m), LF o grau de enchimento do moinho com barras (% do volume interno) e fC_s representa a fração da velocidade crítica (%). O índice *AJUST* é relacionado às condições para as quais o modelo foi calibrado enquanto *SIM* representa as condições simuladas.

Estes fatores devem ser aplicados à constante MC do moinho original (MC_{AJUST}) para estimar o valor de MC do moinho simulado (MC_{SIM}), desde que obedecem as seguintes características do moinho:

- a) $1,2 < L/D < 1,6$ e comprimento;
- b) $L < 7$ metros;
- c) $30\% < LF < 45\%$;
- d) $50\% < fC_s < 80\%$.

Ou seja, as variáveis simuladas devem estar limitadas a valores da prática industrial corrente.

- **Efeito do WI – Work Index**

Embora a resistência do minério à moagem (WI) deva ser representada por uma função específica (como *appearance function*), o modelo de Whiten incorpora a variação de resistência, representado pelo WI de Bond, na função seleção, como se segue:

$$\left(\frac{S_{SIM}}{S_{AJUST}} \right) = \left(\frac{WI_{AJUST}}{WI_{SIM}} \right)^{0.8} \quad (14)$$

Após os procedimentos criados pelo JKMRC (duplo-pêndulo e *Drop Weight Tester*) definindo valores para WI, as funções de quebra específica do minério passaram a ser utilizadas como fator de escala para competência do material.

- **Efeito dos estágios de quebra**

Para simular o número de estágios de quebra v , aplica-se a seguinte relação empírica:

$$v_{SIM} = \left(\frac{MC_{AJUST}}{Q_{SIM}} \right)^{2/3} + \ln \left(\frac{F_{90\ AJUST}}{F_{90\ SIM}} \right) / \ln \sqrt{2} \quad (15)$$

Onde Q representa a vazão de alimentação do moinho e F_{90} a malha da peneira em que 90% do material é passante.

Em moinhos de barras com baixa vazão de alimentação, o fator F_{90} é insignificante. Ele se torna importante em cenários em que o moinho opera próximo à sua capacidade máxima. Na prática elimina-se a dependência do fator F_{90} na calibração e simulação de modelos considerando o valor simulado para F_{90} ao valor medido.

De acordo com os fatores descritos acima, observa-se que as variáveis interagem no modelo sob diversas formas, como a vazão de alimentação que tem relação com o

número de estágios de quebra; condições operacionais, dimensões do moinho e a constante MC que se relacionam entre si; resistência do minério à moagem que atua sobre a função seleção.

3.3.2 Modelo Misturador Perfeito (*Perfect Mixing Model*) – moinho de bolas

O Modelo Misturador Perfeito (PMM) representa a fragmentação que ocorre em equipamentos de cominuição, sob regimes estacionários de operação. Trata-se assim de uma estrutura que pode ser adaptada e modulada a qualquer equipamento de cominuição.

Os desenvolvimentos de Whiten (1976) tiveram por base o modelo de balanço populacional mediante o emprego de estrutura matricial que inclui, basicamente, na equação de balanço de massas global para a operação que se busca representar.

Embora não haja limitações, o modelo PMM não é empregado para representar operações de moinho de barras, uma vez que não foi objeto de parametrizações para tal fim. Por outro alcançou grande emprego na representação de moinhos de bolas e moinho AG/SAG.

No modelo PMM a premissa principal é de que o conteúdo do moinho está perfeitamente misturado, a carga do moinho está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga, d_i , para cada faixa granulométrica.

$$p_i = d_i s_i \quad (16)$$

A forma mais comum da expressão do PMM é a seguinte:

$$f_i - p_i + \sum_{j=1}^{i-1} r_j s_j a_{ij} - r_i s_i (1 - a_{ii}) = 0 \quad (17)$$

Os vetores f_i , p_i e s_i representam, respectivamente, a taxa de alimentação do moinho, a taxa de descarga do moinho e o conteúdo interno do moinho (carga) em cada intervalo granulométrico. A variável a_{ij} representa a fração retida na malha i proveniente da malha j , após um evento de fragmentação, e o parâmetro r_i corresponde à frequência desses eventos para a i -ésima faixa de tamanhos.

Na figura 3.6 estão representados esquematicamente os fluxos mássicos correspondentes às partículas encaminhadas a uma determinada fração granulométrica e dela descarregadas.

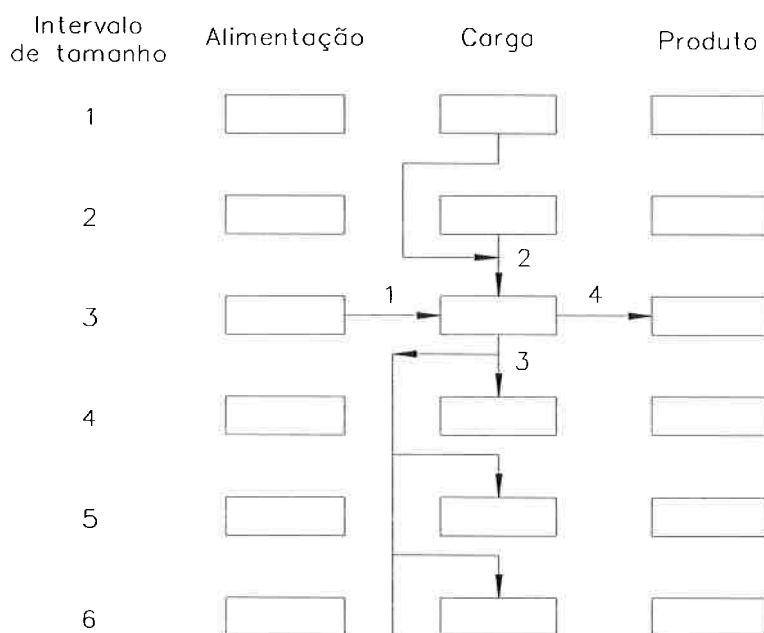


Figura 3.6 – Fluxos mássicos das partículas (extraída de Deboni Jr., 2006)

Segundo Delboni Jr. (2006), uma limitação de ordem prática importante, sob o ponto de vista da modelagem matemática, é a impossibilidade de se quantificar diretamente a distribuição granulométrica do minério contido na câmara interna de moagem de moinhos de bolas. Para tanto, as equações (19) e (20) citadas anteriormente podem ser modificadas (eliminando a variável s_i) para possibilitar a aplicação no caso específico de modelagem de moinhos de bolas, de forma a condensar e permitir a normalização dos parâmetros taxa de quebra e descarga.

$$f_i - p_i \left(1 + \frac{r_i}{d_i} (1 - a_{ii}) \right) + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \left(\frac{r_j}{d_j} \right) p_j = 0 \quad (18)$$

Sendo assim, é possível afirmar que as vazões de alimentação e do produto de um moinho de bolas estão relacionadas pelo quociente r/d , para uma função de quebra particular. Este quociente pode ser calculado por meio de amostragens da alimentação e produto da moagem, bem como através de uma função taxa de fragmentação adequada. A figura 3.7 mostra uma distribuição típica do quociente r/d .

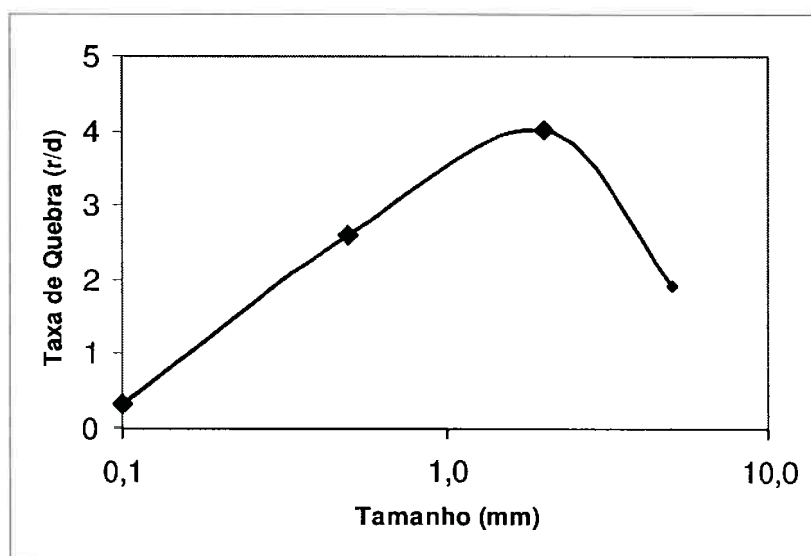


Figura 3.7 – Distribuição típica do quociente r/d (extraída de Deboni Jr., 2006)

Para normalizar o modelo em relação ao tempo de residência, recalcula-se o parâmetro r_i/d_i ou d_i em termos do volume do moinho e taxa de alimentação, independente portanto das dimensões ou condições operacionais do mesmo, sendo que as expressões a seguir mostram o tratamento descrito:

$$\frac{r_i}{d_i} = \frac{r_i}{d_i^*} \cdot \left(\frac{D^2 L}{4 Q} \right) \quad (19)$$

e

$$d_i^* = d_i \cdot \left(\frac{D^2 L}{4 Q} \right) \quad (20)$$

onde,

- D = diâmetro interno do moinho (m);
 L = comprimento interno do moinho (m); e
 Q = vazão volumétrica de alimentação do moinho (m³/h).

Segundo Delboni Jr. (2006), o modelo matemático da operação de moinhos de bolas pode ser definido a partir das características do minério (*appearance function*) e características do equipamento (r/d^*). Pela dificuldade de determinar experimentalmente a distribuição da carga dentro do moinho (parâmetro S), não é possível separar a função r/d^* de seus componentes. Dessa forma, r/d^* é determinada por rotinas numéricas contidas em programas computacionais, utilizando o método *spline function*, através de um certo número de pontos (três ou quatro) visando cobrir toda a faixa granulométrica estudada.

Para calibração do modelo é importante que sejam feitas amostragens, pois o parâmetro r/d^* não é função somente do equipamento, mas também do binômio equipamento/minério processado. Quando não é possível realizar-se a amostragem, como por exemplo, em projetos novos, deve-se empregar valores de operações similares.

Após definidos os valores do parâmetro r/d^* e as características do minério (a_{ij}), o modelo estará calibrado, pronto portanto para etapas de simulação. A partir de ajuste de modelos (r/d^*_{AJUS}), os valores serão então calculados para as diferentes simulações (r/d^*_{SIM}). No caso de moinhos de bolas, é utilizada a seguinte expressão:

$$\left(\frac{r_i}{d_i^*} \right)_{SIM} = (FATOR \ DE \ ESCALA) \cdot \left(\frac{r_i}{d_i^*} \right)_{AJUS} \quad (21)$$

Neste caso, Delboni Jr. (2006) aponta os cinco fatores de escala relativos às variáveis de operação que influenciam no parâmetro r/d^* , conforme a seguir:

- **F_A: Efeito do diâmetro (D) do moinho:**

$$F_A = \sqrt{\left(\frac{D_{SIM}}{D_{AJUS}}\right)} \quad (22)$$

- **F_B: Efeito do grau de enchimento (GE) do moinho – *Load Fraction***

$$F_B = \left[\frac{(1 - GE_{SIM}) GE_{SIM}}{(1 - GE_{AJUS}) GE_{AJUS}} \right] \quad (23)$$

- **F_C: Efeito da velocidade (velocidade em % da Velocidade Crítica) do Moinho – *Critical Velocity***

$$F_C = \left(\frac{Vel_{SIM}}{Vel_{AJUST}} \right) \quad (24)$$

O fator de correção acima é válido para variações da velocidade do moinho (Vm) dentro dos seguintes limites, $55\% C_s < V_m < 78\% C_s$, onde C_s corresponde ao valor da velocidade crítica do moinho.

- **F_D: Efeito da variação das características de moabilidade do minério – *Work Index (WI)***

$$F_D = \left(\frac{WI_{AJUST}}{WI_{SIM}} \right)^{0,8} \quad (25)$$

- **F_E: Efeito do diâmetro (D_b) de bolas**

$$X_{max} = K D_b^2 \quad (26)$$

X_{\max} = tamanho de partícula no qual ocorre a máxima taxa de quebra (mm);

D_b = diâmetro de bola (mm); e

K = constante (aproximadamente $4,4 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$).

Os valores de correção são os seguintes:

$$F_E = \left(\frac{D_{b\text{SIM}}}{D_{b\text{AJUST}}} \right)^2 \quad \text{para } X > X_{\max} \quad (27)$$

$$F_E = \left[\frac{\left(\frac{1}{D_{b\text{SIM}}} \right)}{\left(\frac{1}{D_{b\text{AJUST}}} \right)} \right] \quad \text{para } X < X_{\max} \quad (28)$$

3.3.3 Calibração de modelos

Os procedimentos de ajuste ou calibração do modelo de moinhos consistem em calcular as constantes envolvidas com base nos valores experimentais dos parâmetros utilizados pelo modelo, assim como das demais condições de operação dos testes, sendo um exercício de refinamento constante, que nunca deve perder de vista a qualidade dos dados experimentais e sua influência nos resultados. Delboni (1987) reforça que a estratégia de baixar a qualquer custo o desvio atribuído ao ajuste do modelo pode conduzir a erros grosseiros, que serão seguramente trasladados para simulações posteriores.

A qualidade dos ajustes é estimada através do desvio padrão global dos valores calculados pelo modelo ajustado em relação aos valores iniciais. Numericamente o desvio padrão global (SD) é calculado pela raiz quadrada do quociente da divisão da somatória dos erros ponderados pelo número de valores estimados, conforme a expressão a seguir.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(\frac{Exp_i - Calc_i}{\sigma_i} \right)^2}{n}} \quad (29)$$

Para os trabalhos realizados no caso da ALUMAR, a qualidade dos ajustes foi avaliada através do SD global, que representa a soma dos erros devidos às variáveis medidas, nesse caso os erros são devidos a distribuições granulométricas de alimentação da câmara de barras e produto da câmara de bolas, porcentagens de sólidos (Cw_j) e vazões (Qs_k).

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(\frac{x_{ei} - x_{ci}}{\sigma_i} \right)^2 F, P + \sum_j^3 \left(\frac{Cw_{ej} - Cw_{cj}}{\sigma_j} \right)^2 + \sum_k^3 \left(\frac{Qs_{ek} - Qs_{ck}}{\sigma_k} \right)^2}{n + 3 + 3}} \quad (30)$$

3.3.3.1 Calibração do modelo de moinho de barras

O modelo de operação de moinho de barras empregado no presente trabalho incluiu como parâmetros os dados de *top size* de alimentação, a constante do moinho (MC), determinada pela taxa de moagem e número de estágios de quebra; e as variáveis que representam a função seleção XC, SL e IN.

Pela forma da sua função classificação, os modelos de moinho de barras são difíceis de se calibrar. O parâmetro mais simples de estimar é o número de estágios de quebra, pois é efetivamente definido como o número de malhas da série $\sqrt{2}$ removidas entre a alimentação e o produto. Segundo Napier-Munn (1999) o valor de granulometria máxima do produto do moinho pode ser adotado como sendo 1,0 e, considerando que o moinho de barras não é um bom equipamento para redução granulométrica de partículas mais finas, considera-se que XC tenha um valor inicial de 0,1. Dessa forma, assumindo um valor selecionado de 0 a XC é possível calcular os pontos SL e IN.

3.3.3.2 Calibração do modelo de moinho de bolas

A calibração de modelos de moinhos de bolas é basicamente calcular o valor de r/d^* para cada fração granulométrica que podem ser definidos pelo teste de caracterização do minério. Nesta etapa ficam definidos os valores de três nós da função r/d^* utilizando o método *spline function* para cobrir toda a faixa granulométrica.

3.4 MÉTODO DE BOND

Em 1952, Fred C. Bond postulou uma lei empírica, conhecida como “3ª lei da fragmentação”, afirmando que a energia gasta para realizar a fragmentação de algum minério é proporcional ao tamanho da crista de trinca gerada no esforço mecânico aplicado. Bond defende que “a energia consumida para fragmentação de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do seu tamanho”. O “tamanho” neste caso foi considerado como igual a abertura da peneira pela qual passam 80% do material. A expressão que Bond propôs foi a seguinte:

$$W = 10 WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (31)$$

e

$$\text{Pot} = T \cdot W \quad (32)$$

onde,

W = quantidade específica de trabalho consumida (kWh/st);

WI = *Work Index* – índice de trabalho (kWh/st);

P_{80} = abertura na qual passam 80% do produto (μm);

F_{80} = abertura na qual passam 80% da alimentação (μm);

T = vazão de alimentação nova do circuito (t/h); e

Pot = potência consumida (kW).

O índice WI, ou *Work Index*, expressa a resistência do material à fragmentação e, segundo Bond, traduz a quantidade de energia, em kWh/st, necessária para reduzir o material de tamanho 'infinito' a 80% do passante em 100 μm .

A aplicação do método de Bond no cálculo da energia consumida em instalações de moagem se difundiu largamente nos últimos 50 anos, sendo que a determinação experimental do WI é prática usual e consiste em um índice de comparação entre minérios. A determinação do WI pode ser feita utilizando-se um moinho padrão (conforme NBR 11376 ABNT), calculando-se o índice de moabilidade (Mob) conforme se segue:

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} Mob^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \cdot 1,102 \quad \text{p/ moinho de bolas} \quad (33)$$

$$WI = \frac{44,5}{Am^{0,23} Mob^{0,625} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)} \cdot 1,102 \quad \text{p/ moinho de barras} \quad (34)$$

onde,

WI = *Work Index* - índice de moabilidade (kWh/t);

Am = abertura da malha teste (μm);

P = abertura da peneira onde passam 80% da massa do produto (μm);

F = abertura da peneira onde passam 80% da massa da alimentação (μm);

Mob = Índice de moabilidade; e

1,102 = fator de conversão de tonelada curta para tonelada métrica.

A tabela 3.2 mostra os WI médios de alguns minérios após testes práticos realizados.

Tabela 3.2 – WI médios de alguns minérios e materiais (Kwh/t curta)

	Moinho de barras			Moinho de bolas		
	Nº testes	Média	Intervalo	Nº testes	Média	Intervalo
Alumina	3	12,2	9-17	6	17,9	7-34
Bauxita	33	10,8	2-20	29	14,5	1-31
Argila	4	12,5	6-18	11	10,8	4-23
Carvão	4	9,8	8-12	6	15,4	13-18
Coque	7	16,9	12-24	4	33,5	29-40
Minério de cobre	396	14,3	4-34	769	12,8	4-30
Minério de ouro	42	15,2	8-29	183	14,6	3-42
Hematita	64	12,5	5-22	116	11,1	2-31
Limonita	12	9,3	9-3	20	9,0	5-19
Calcário	84	13,7	7-50	177	9,9	4-36
Pirita	3	8,7	8-10	6	10,1	7-13
Quartzo	1	14,4	-	13	14,4	11-21
Areia silicosa	14	13,0	3-33	45	23,8	9-50

Fonte: Rowland Jr., C.A. Teste para seleção de circuitos de cominuição. Beraldo, J. L. – Moagem de minérios em moinhos Tubulares

Após alguns estudos sobre a aplicabilidade da “3ª lei da fragmentação” a moinhos industriais, C. Rowland verificou a necessidade de se introduzir novos fatores de correção além daqueles levados em consideração por Bond, sendo que atualmente, para o dimensionamento de um moinho, deve-se utilizar a seguinte expressão revisada:

$$W = 10 WI \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) EF_i \quad (35)$$

Onde EF_i representa o somatório dos fatores de correção de Rowland, como a seguir:

- **EF₁: Moagem a seco**

Usa-se fator igual a 1,3 e exprime o fato de a moagem a seco apresentar menor eficiência que a moagem a úmido.

- **EF₂: Circuito aberto em moinho de bolas**

Considera-se que a moagem em circuito aberto consome mais energia do que em trabalho em circuito fechado para conseguir produto com a mesma especificação. Este fator de ineficiência é determinado pela porcentagem retida na malha de controle, conforme tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Fator de ineficiência do circuito aberto

% passante na malha de referência (micron)	Fator de ineficiência
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
98	1,70

Fonte: Beraldo, J.L., Moagem de minérios em moinhos tubulares

- **EF₃: Fator do diâmetro do moinho**

A eficiência do moinho cresce com o aumento do diâmetro até 3,81 m, representado pela expressão (36) e acima do qual a eficiência se mantém constante assumindo valor de 0,914.

$$EF_3 = \left(\frac{2,44}{D} \right)^{0,2} \quad (36)$$

- **EF₄: Fator de oversize (material grosso)**

Este fator deve ser aplicado quando a alimentação contém partículas muito grandes para serem moídas de forma eficiente e deve ser empregado tanto aos moinhos de bolas quanto aos moinhos de barras. O tamanho ótimo de alimentação (F_o) é definido pelas expressões (37) e (38), aplicadas respectivamente aos moinhos de

bolas e barras. Já a expressão (39) define o valor de EF_4 , sendo R_r representado pela razão entre F (d_{80} da alimentação) e P (d_{80} do produto).

$$F_o = 16000 \cdot \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad (37)$$

$$F_o = 4000 \cdot \left(\frac{13}{WI} \right)^{0,5} \quad (38)$$

$$EF_4 = \frac{R_r + (WI - 7) \left(\frac{F - F_o}{F_o} \right)}{R_r} \quad (39)$$

- **EF₅: Material fino**

Este fator foi estabelecido por Bond para produtos com mais de 80% passantes em 74 μ m e pode ser calculado pela expressão (40), onde P é o tamanho do produto em micrômetros.

$$EF_5 = \left(\frac{P + 10,3}{1,145 \cdot P} \right) \quad (40)$$

- **EF₆: Relação de redução de moinho de barras**

É aplicado a moinho de barras, em circuito aberto, sempre que a relação de redução estiver fora do intervalo $R_{r0} - 2 \leq R_r \leq R_{r0} + 2$, sendo R_{r0} a relação de redução ótima definida pela expressão (41):

$$R_{r0} = 8 + \frac{5 \cdot L}{D} \quad (41)$$

onde,

L = comprimento das barras;

D = diâmetro do moinho interno ao revestimento.

A equação (42) deve então ser aplicada para cálculo do fator EF_6 sempre que o WI do minério seja superior a 7 kWh/st.

$$EF_6 = 1 + \frac{(R_r - R_0)}{150} \quad (42)$$

- **EF₇: Baixa relação de redução em moinho de bolas**

Aplica-se este fator quando a relação de redução em moinhos de bolas é menor que 6, raro em moinho de bolas a não ser quando se apresentam em operação de remoagem. EF_7 é definido pela seguinte equação:

$$EF_7 = \frac{2 \cdot (R_r - 1,35) + 0,26}{2 \cdot (R_r - 1,35)} \quad (43)$$

- **EF₈: Moagem em moinho de barras**

Este fator deve ser aplicado de acordo com a preparação da alimentação do moinho, como segue abaixo:

a) Para moinho de barras em circuito único, aberto:

- Com alimentação do moinho proveniente de um circuito de britagem em circuito aberto, $EF_8 = 1,4$

- Com alimentação do moinho proveniente de um circuito de britagem em circuito fechado, $EF_8 = 1,2$

b) Para moinho de barras em circuito barra/bolas:

- Com alimentação do moinho proveniente de um circuito de britagem em circuito aberto, $EF_8 = 1,2$

- Com alimentação do moinho proveniente de um circuito de britagem em circuito fechado, $EF_8 = 1,0$

3.4.1 Eficiência energética (Bond / Rowland)

Segundo Beraldo apud Rowland (1987), a eficiência energética de um circuito de moagem deve ser estimada com base no WI operacional (WI_o), determinado pela seguinte relação:

$$WI_o = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F}}\right)} \quad (44)$$

Onde,

WI_o = WI operacional (KWh/t);

W = consumo específico de energia (KWh/t);

P = malha em que passam 80% do produto (mm); e

F = malha em que passam 80% da alimentação (mm).

Com a aplicação dos fatores de Rowland, conforme descritos anteriormente, ao WI_o obtém-se o *Work Index* operacional corrigido (WI_{oc}):

$$WI_{oc} = \frac{WI_o}{EF_i} \quad (45)$$

Assim, de acordo com Rowland, a eficiência do processo de moagem pode ser determinada pela relação WI_{oc}/WI , sendo este último determinado em ensaio de laboratório com amostra da alimentação da instalação industrial. A relação é portanto a seguinte:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{WI}{WI_{oc}} \quad (46)$$

Beraldo (1987) ressalta que o valor de eficiência energética pode ser utilizado para registro de desempenho de moagem, comparação de circuitos alternativos paralelos

em trabalhos de otimização e até comparação de condições diversas em um mesmo circuito de moagem.

3.4.2 Potência absorvida pelos moinhos

Bond desenvolveu também expressões para cálculo de potências consumidas por moinho de barras e bolas. Tais expressões, descritas por Beraldo (1987), são as seguintes:

$$\text{Barras:} \quad KWR = 1,752.D^{0,34}.(6,3 - 5,4.V_p)C_s \quad (47)$$

$$\text{Bolas:} \quad KWB = 4,879.D^{0,3}.(3,2 - 3.V_p)C_s \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10.C_s}}\right) + S_s \quad (48)$$

Onde,

KWR = potência consumida por moinho de barras, por tonelada de barras (KW/t);

KWB = potência consumida por moinho de bolas, por tonelada de bolas (KW/t);

D = diâmetro interno do moinho (m);

V_p = fração do volume do moinho ocupado pela carga;

C_s = fração da velocidade crítica; e

S_s = fator de correção para o tamanho de bolas.

Segundo Rowland, em moinhos maiores que 3,3 m de diâmetro, o tamanho das bolas afeta o consumo de potência de acordo com a seguinte expressão:

$$S_s = 1,103 \left(\frac{B - 12,5D}{50,8} \right) \quad (49)$$

Onde,

B = diâmetro máximo das bolas (mm);

S_s = só deve ser considerado quando o diâmetro das bolas for menor que 1/80 do diâmetro do moinho. Portanto, S_s será sempre negativo.

Estas três fórmulas citadas anteriormente representam o consumo de potência por massa unitária de corpos moedores para moagem a úmido, em moinho tipo *overflow*, servindo também para cálculo da potência de moinho multicâmara, onde a potência total consumida pelo moinho é a soma das potências de cada câmara.

Para moinhos de diafragma devem-se multiplicar os valores calculados pelos seguintes fatores:

Moinho de diafragma a úmido: fatores de 1,148 a 1,16

Moinho de diafragma a seco: fator 1,08

3.4.3 As limitações do Método de Bond

Austin e Brame (1983) e Herbst e Fuerstenau (1980) estudaram limitações do teste de Bond. A primeira delas é sobre a expressão (31), a qual Bond afirma ser uma “lei universal”. Segundos estes autores, o método ignora o fato de que a distribuição granulométrica do produto e a energia específica de cominuição associada são diferentes. A experiência em sua utilização tem demonstrado que o método de Bond:

- Tende a apresentar desvios na previsão do que realmente acontece em circuito fechado quando a vazão de alimentação aumenta, a menos que o desempenho do classificador seja ajustado para enfrentar novas condições;
- Não é apropriado para sistemas onde as distribuições granulométricas da alimentação e do produto variam muito;
- Não é um bom método de previsão para moagem de rochas de frações mais grossas;
- É incerto para partículas com características incomuns de peneiramento (forma incomum);
- A relação da raiz quadrada adotada na expressão (31) não é sempre válida.

Mesmo com os problemas acima citados, o método de Bond possui duas principais vantagens: ele é bastante simples e funciona em diversas circunstâncias com grau

de precisão razoável, desde que os fatores de correção estejam fundamentados em uma extensa base de dados industriais.

3.5 BAUXITA E CIRCUITOS DE MOAGEM

A bauxita recebeu esse nome da região de *Les Baux*, situada no sul da França, onde foi identificada pela primeira vez pelo químico francês P. Berthier, em 1821. A bauxita é um minério de origem laterítica, formada próximo à superfície pela ação do intemperismo químico sobre rochas aluminosas, que constituem o substrato do terreno. Segundo Damasceno (2006), as condições fisiográficas, clima, morfologia da região e a natureza das “rochas-mãe”, em especial aquelas isentas ou com pouco quartzo livre, são fatores que favorecem a acumulação de bauxita de boa qualidade.

Considera-se minério para uso metalúrgico a bauxita com teor superior a 40% de Al_2O_3 aproveitável ou disponível, o que significa óxidos de alumínio recuperáveis no processo Bayer, que é a rota de extração largamente utilizada na obtenção da alumina. Os contaminantes devem apresentar baixos teores: no máximo 4 a 5% de sílica reativa (silicatos), além de outras especificações para ferro e titânio. Do ponto de vista mineral, a bauxita é constituída por uma mistura de óxidos mono, bi e tri-hidratados de alumínio denominados, respectivamente, diásporo, bohemita e gibsita. Os minérios geologicamente mais recentes possuem alto conteúdo de gibsita, e são os que apresentam maior interesse comercial por ser o seu processo de extração mais econômico.

A caulinita, um silicato de alumínio, é frequentemente associada à bauxita, pois forma-se no mesmo ambiente de laterização, constituindo-se na principal impureza de bauxitas, pois acarreta em dificuldades no processo Bayer. A bauxita é portanto caracterizada pelo teor de Al_2O_3 disponível, o que corresponde ao conteúdo de óxidos recuperáveis no citado processo. Entretanto, atenção especial deve ser devotada à sílica presente na bauxita, que não deve se apresentar sob a forma de silicatos (Damasceno, 1988).

O segmento mínero-metalúrgico da bauxita se caracteriza por três etapas: a mineração de bauxita, realizada em minas à céu aberto em jazidas pouco profundas ou situadas na superfície; a transformação da bauxita em alumina e a obtenção do alumínio. A alumina é um produto intermediário e destina-se principalmente à produção do alumínio. Pode ser também aplicada em fins não-metalúrgicos como em abrasivos, refratários ou indústrias químicas.

O processo Bayer está baseado na extração hidrometalúrgica de óxido de alumínio (Al_2O_3) contido em bauxitas. A metodologia para tal extração foi desenvolvida e divulgada pelo austríaco Karl Joseph Bayer, sendo patenteado em 1887 como Processo Bayer. O diagrama do processo é mostrado abaixo na Figura 3.8.

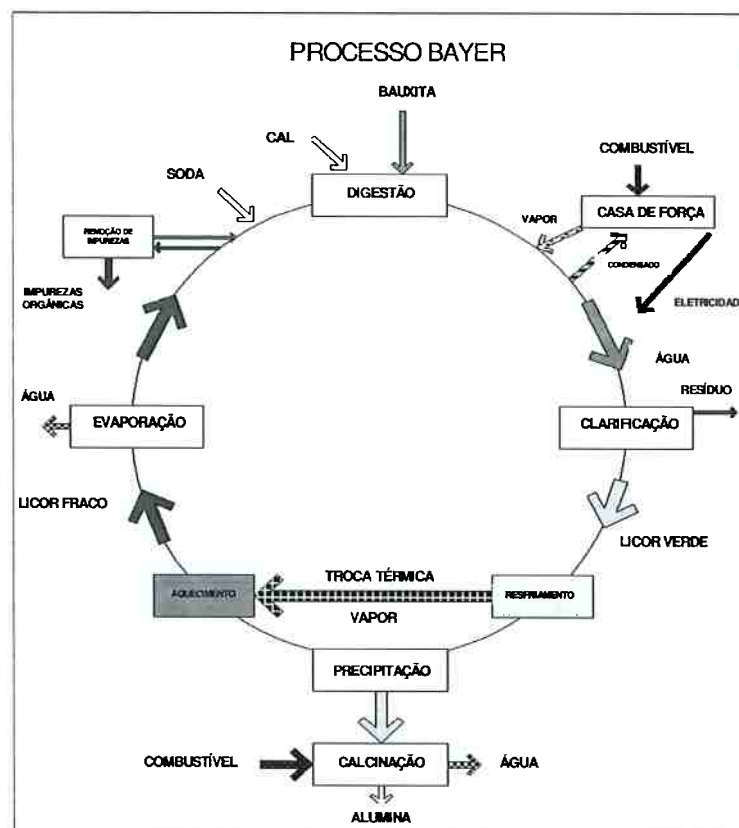
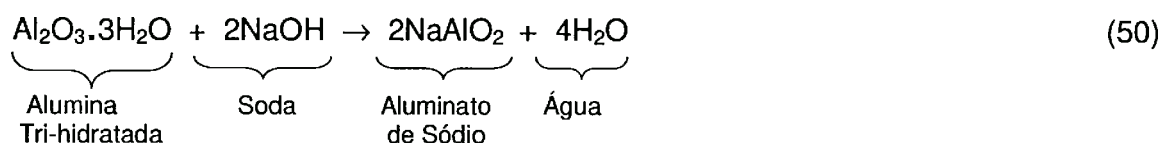


Figura 3.8 – Diagrama do processo Bayer

Para reagir com a alumina e separá-la de outros componentes do minério de bauxita, o Processo Bayer emprega uma solução de soda cáustica aquecida. A parte

desejável do minério é extraída pelo tratamento com uma solução aquosa em processo hidrometalúrgico.

No processo Bayer, a alumina da bauxita moída, misturada com uma solução de soda cáustica (NaOH), reage, tornando possível sua remoção da mistura, segundo a seguinte reação química:



A alumina presente na bauxita está sob a forma do tri-hidrato $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (gibbsita), sendo conhecida como hidrato. A reação acima ocorre nos digestores, sendo a reação básica do processo Bayer.

Como a solubilidade do hidrato em soda cáustica aumenta com a temperatura, a reação pode ser facilmente reversível pelo resfriamento da solução, recuperando a alumina. Esta reação ocorre em precipitadores e pode ser verificada segundo a expressão abaixo:



A última etapa da refinaria, que já não faz parte do processo Bayer, consiste na eliminação da água de cristalização do hidrato. Para isso, o hidrato é aquecido a cerca de 1000°C em calcinadores. Essa fase é chamada de calcinação, e a reação envolvida é:



A partir desse ponto, a alumina deixa o processo de refino e segue para obtenção do alumínio metálico em cubas eletrolíticas (unidade da Redução) ou para seu uso final.

3.5.1 Bauxita no mundo

As reservas mundiais de bauxita, segundo as informações de 2006, são estimadas em $33,4 \times 10^9$ t localizados principalmente em Guiné ($8,6 \times 10^9$ t) e Austrália ($7,9 \times 10^9$ t), sendo que estes dois países são responsáveis por quase 50% do total mundial, conforme mostra a tabela 3.4. As reservas brasileiras são estimadas em $3,5 \times 10^9$ t (95% de bauxita metalúrgica), cerca de 10% do total mundial. A produção mundial de bauxita em 2006 foi 3,7% superior a de 2005, passando de 171 milhões t para 178 milhões t. O Brasil produziu 22 milhões t em 2006, correspondendo a um aumento de 5% frente à 2005 (USGS, 2006).

Tabela 3.4 – Reserva e produção mundial de bauxita

Países	Reservas (10^9 t)		Produção (10^9 t)		
	2006	%	2005	2006	%
Brasil	3.540	10,6	22.034	22.055	12,4
Austrália	7.900	23,6	60.000	61.400	34,5
China	2.300	6,9	18.000	20.000	11,3
Guiana	900	2,7	1.500	1.500	0,8
Guiné	8.600	25,7	15.000	15.200	8,6
Índia	1.400	4,2	12.000	13.000	7,3
Jamaica	2.500	7,5	14.100	14.900	8,4
Rússia	250	0,8	6.400	7.200	4,1
Suriname	600	1,8	4.580	4.800	2,7
Venezuela	350	1,1	5.900	6.000	3,4
Outros países	5.050	15,1	11.870	11.720	6,5
TOTAL	33.390	100	171.384	177.775	100

Fontes: DNPM-DIRIN e USGS: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries – 2006.

3.5.2 Bauxita no Brasil

Como mencionado anteriormente, o Brasil se destaca como detentor de grandes reservas de bauxita. Na região do Baixo Amazonas estão localizadas 95% das reservas. A produção atual aproxima-se dos 22 milhões t/ano, o que coloca o país

como segundo produtor mundial, respondendo por 12,4% do total mundial em 2006. A distribuição da produção de bauxita metalúrgica no Brasil por empresa atualmente é a seguinte: MRN (78%), CBA – Companhia Brasileira de Alumínio (11%), Alcoa (5%) e Novelis (2%), enquanto que a não metalúrgica responde por 4%, cujo principal produtor foi a Mineração Curimbaba, instalada em Minas Gerais.

Em 2007 a Vale produziu os primeiros lotes de minério em sua mina de bauxita em Paragominas (PA), com capacidade inicial de produção de 4,5 milhões t/ano de produto. Em 2008 está prevista a entrada em operação da segunda linha de moagem em Paragominas, elevando a capacidade nominal do complexo para 9,0 milhões t/ano. O transporte da bauxita moída até Barcarena, Pará, é efetuado por mineroduto, com extensão aproximada de 260 km.

A Alcoa prevê, para 2009, a entrada em operação de mais uma mina de bauxita no Pará (município de Juruti), com capacidade inicial de 2,6 milhões t/ano e projeto futuro para 12 milhões t/ano.

3.5.3 Moagem de Bauxita no mundo

A etapa de moagem de bauxita, no caso das refinarias de alumina, tem como objetivo reduzir a granulometria do minério a uma faixa considerada adequada para extração da alumina presente na bauxita.

Em todo o mundo é muito comum que as refinarias de alumina recebam a bauxita via correias transportadora de longas distâncias, trens ou navios. Na grande maioria dos casos, a planta de moagem de bauxita opera no regime das refinarias de alumina, e não nas minas. Devido a isso a polpa que circula no moinho contém via de regra soda cáustica, como forma de iniciar a lixiviação dos minerais do minério (gibbsita, bohemita e diásporo) já nessa etapa.

Nota-se variações importantes de configuração e sistemas de moagem para as instalações industriais de moagem de bauxita. O apêndice A traz uma lista com quase 100 moinhos instalados nos mais diversos circuitos de moagem de bauxita no mundo.

3.5.3.1 Moinhos bi-cônicos

Em circuitos industriais de moagem de bauxita com capacidades inferiores a 500 t/h, normalmente são encontrados moinhos bi-cônicos operando em configuração aberta. A figura 3.9 ilustra um moinho bi-cônico. A descarga é feita por *overflow* ou grelha. O formato bi-cônico do moinho exerce uma função classificadora em seu interior, resultando em maior eficiência e menor consumo de energia. São mais encontrados em moagem de bauxita para uso refratário, por exemplo, em instalações da *Norton Company*, *Carborundum Co.* e *Carbo Ceramics* nos Estados Unidos, além de alguns circuitos de moagem de bauxita para refino de alumina da década de 40, como é o caso da Alcan e Alcoa, no Canadá e Jamaica .

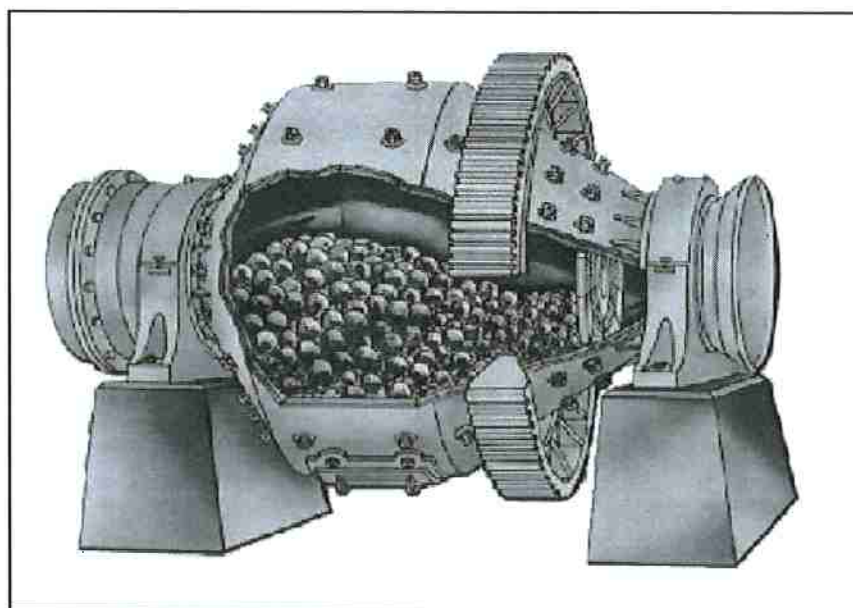


Figura 3.9 – Ilustração de um moinho bi-cônico

3.5.3.2 Moinhos multi-câmaras (compeb)

Moinhos multi-câmaras (compeb) são aqueles em que as diversas câmaras são preenchidas com corpos moedores de mesma forma, geralmente bolas, conforme ilustra a figura 3.10.

Em algumas refinarias de alumina no Japão são encontrados moinhos de bauxita do tipo multi-câmaras dotados de grelhas, como é o caso da *Mitsui Aluminun* (8' x 25' – 1000 HP) e *Nihon Light Metal* (8' x 35' – 1000 HP).

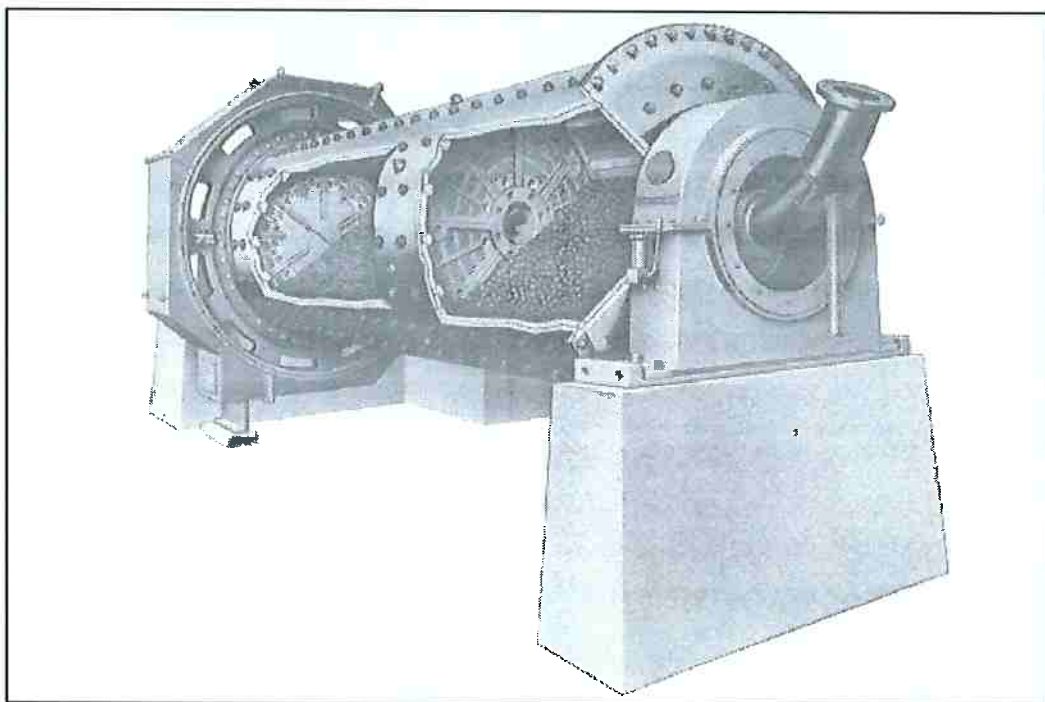


Figura 3.10 – Ilustração de um moinho compeb

3.5.3.3 Moinhos dupla-câmara (rodpeb)

Circuitos abertos com moinhos dupla-câmara (figura 3.11), utilizando barras como corpos moedores na primeira câmara e bolas na segunda, estão entre os mais utilizados para moagem de bauxita. Todas as grandes empresas no Brasil (Alcoa,

Vale e CBA) que operam circuitos de moagem de bauxita utilizam moinhos rodpeb (11'x 39' – 2000 HP) desde os anos 80. Várias refinarias de alumina no mundo, como a Alcan (12' x 47,5' – 3000 HP), no Canadá; *Queensland Aluminum Ltd* (9' x 38' – 1500 HP e 11' x 37' – 2250HP), na Austrália; *Alumina Contractors* e *Aughnish Alumina* (11' x 44' – 2700 HP) na Irlanda; além da *Suralco*, pertencente ao grupo Alcoa (14' x 46,4' – 4290 HP), no Suriname, também utilizam este tipo de equipamento.

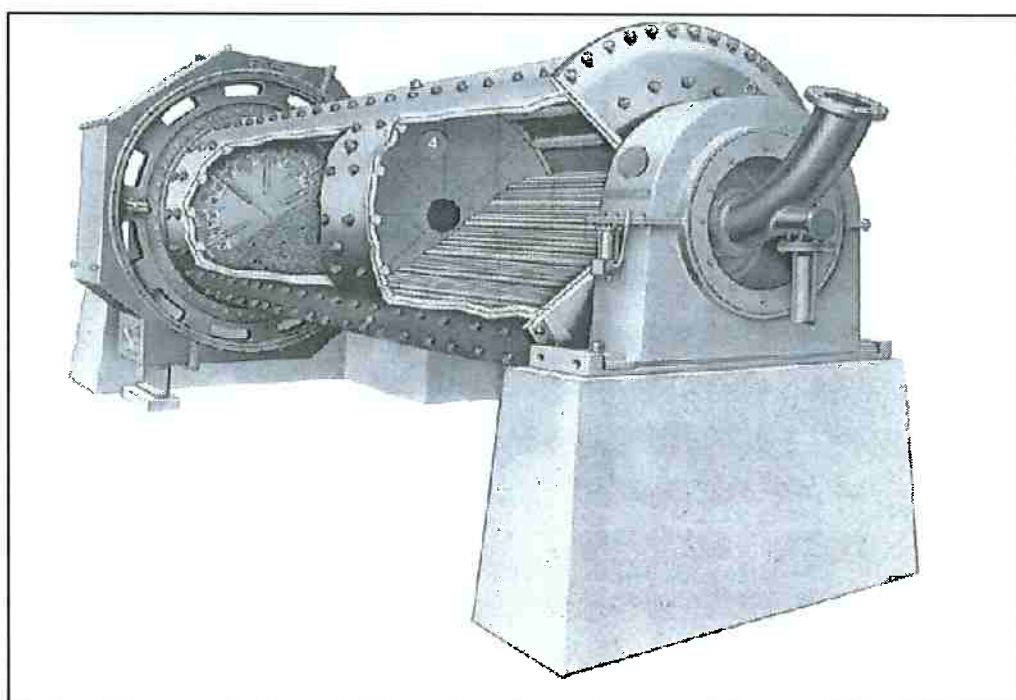


Figura 3.11 – Ilustração de um moinho rodpeb

Em várias instalações não há sistema de classificação, já que o produto da primeira câmara é classificado pelas barras. A câmara de barras fornece um material mais uniforme e granulado, tornando mínima a fração de finos. A descarga do compartimento de barras é por *overflow* e, no fim do compartimento de bolas, normalmente o moinho é provido de diafragma.

3.5.3.4 Moinhos de barras

Moinhos de barras operando em circuito aberto são também encontrados em diversas unidades de moagem de bauxita pelo mundo. Os primeiros a serem instalados foram na Austrália nos anos 60 até o fim dos anos 90. Outros países adotaram o mesmo circuito (aberto) como *St. Nicholas Plant* (10,5' x 18' – 940 HP), na Grécia; *Alcan* (9' x 14' – 450 HP), no Brasil; *Alumina Partners*, pertencente à *Rusal* (10' x 16' – 800HP), na Jamaica; *Sumitomo Chemicals* (9' x 14' – 500 HP) no Japão e *Point Confort Alcoa* (10' x 13' – 600 HP) nos Estados Unidos.

Em *Kwinana* (Alcoa), na Austrália, após a britagem primária, a bauxita é estocada em pilhas e retomada por pás carregadeiras às correias transportadoras, que por sua vez alimentam silos de armazenagem, antes de alimentar os moinhos com granulometria máxima de 30 mm. *Kwinana* possui nove moinhos de barras com descarga por *overflow*, sendo seis deles com dimensões 10' x 13', capacidade de 120 t/h e potência instalada de 650 HP para cada um. Os outros três com dimensões 8' x 13', têm capacidade de 70 t/h e potência instalada de 350 HP. Já em *Worsley* (BHP Billiton), Austrália, desde 1982 encontra-se operando o maior moinho de barras até hoje instalado para moagem de bauxita, com dimensões de 14' x 20,5' e potência instalada de 2000 HP.

É importante citar que o maior moinho de barras do mundo (15' x 20,5' – 3000 HP) será instalado na ALUMAR, em São Luis, a ser comissionado em 2008. Os dois moinhos serão operados em série com moinhos de bolas, em circuito fechado com ciclonagem.

3.5.3.5 Moinhos SAG

Circuitos com moinho SAG, em estágio único são usados há mais de 25 anos em operações de moagem de bauxita, na Austrália. Nos circuitos de *Wagerup* e *Pinjarra*

(Alcoa), a bauxita lavrada é britada em britador primário e posteriormente transportada até as várias linhas de moagem, cada linha composta por um moinho SAG, que opera em circuito fechado com peneiras DSM. O produto desses circuitos é relativamente grosso, razão pela qual se empregam peneiras DSM.

Também é encontrado em Paragominas (Vale), comissionado em 2006, o uso de moinho SAG (diâmetro de 28') seguido de moinho de bolas (diâmetro de 21'). A bauxita é britada em dois estágios com britadores de eixos dentados, seguido de empilhamento e retomada para alimentação da linha de moagem. Os seixos gerados no moinho SAG seguem para britagem, em britadores de impacto, cujo produto é encaminhado ao circuito secundário, configurando um circuito SABC aberto (Delboni et al., 2006). A operação de moagem de Paragominas é bastante singular, pois o circuito foi instalado próximo à lavra, sendo a polpa bombeada por aproximadamente 260 km até a refinaria da Alunorte, não sendo assim, operado de forma contínua com a operação da refinaria.

3.5.4 Histórico da moagem de bauxita na Alcoa

Segundo Hudson (1982) a primeira empresa a beneficiar bauxita para o refino de alumina foi a *Pittsburgh Reduction Company*, em sua usina localizada em Illinois, chamada *East St. Louis*. A bauxita era proveniente do estado de Arkansas, Estados Unidos. O primeiro carregamento de hidróxido de alumínio foi despachado de *East St. Louis* em 26 de maio de 1903.

Quando a *Pittsburgh Reduction Company* se tornou a *Aluminum Company of America* (Companhia de Alumínio da América), a área de mineração e processamento de bauxita foi também incorporada, sob o nome *Aluminum Ore Company*. A palavra "minério" utilizada no título corporativo tem um histórico econômico interessante. Sendo mais barato enviar minério de trem do que enviar um produto acabado, a alumina foi apelidada de "minério de alumínio", que assim recebeu uma taxa preferencial. Nos anos 50, o nome Companhia de Minério de

Alumínio foi modificado e o refino tornou-se parte da estrutura corporativa central da Alcoa.

Nesta planta do Arkansas havia uma pilha de bauxita com seção transversal triangular, constituída por camadas dispostas por empilhadeira. Iniciando a recuperação de bauxita de uma ponta da pilha e evoluindo ao longo de seu comprimento, o material recuperado correspondia à uma fatia essencialmente vertical da mesma através das várias camadas formadas enquanto era depositado. O mesmo princípio básico, com mudanças no equipamento para atender a localidade, foi aplicado no armazenamento de bauxita em outras usinas da Alcoa.

Na época não houve um estudo da eficiência da mistura através deste sistema de manuseio. Tal estudo envolveria uma grande quantidade de amostras e análises para estabelecer uma base estatística para medição do grau de homogeneização obtido. Ao contrário, o processo foi desenvolvido utilizando equipamento e um controle de fluxo que tornava desnecessário o conhecimento de tempo real da composição.

A Alcoa até então utilizava como prática original moer e peneirar a bauxita à seco. No caso da moagem eram utilizados moinhos de martelo, apresentando diversos inconvenientes como alto uso de mão de obra operacional e baixa disponibilidade mecânica. Se a bauxita estivesse seca, a área de trabalho apresentava problemas com pó em suspensão e, se a bauxita estivesse úmida, havia dificuldades de manuseio. Quando ocorriam entupimentos, o procedimento consistia em entrar nos moinhos e desobstruir manualmente o material compactado.

Para o peneiramento eram utilizadas peneiras vibratórias, porém com problemas de obstrução. Para resolver este problema, decidiu-se alterar o projeto da malha de quadrada para retangular, o que aumentou a porcentagem de área aberta da peneira. Outra técnica consistia em aplicar uma corrente elétrica à peneira, aquecendo a tela com objetivo de secar a bauxita acumulada, de forma que fragmentasse e passasse pelas aberturas. Tal melhoria não era suficiente para justificar a instalação completa deste sistema.

Ensaio de moagem utilizando bauxita úmida também foram iniciados nesta mesma planta no Arkansas. A partir deste marco, todas as refinarias passaram a ser equipadas com moinhos de barras operando em moagem via úmida. A opção por moinhos de barras foi escolhida como a de melhor resultado, concluindo que tais moinhos possuíam maior eficiência e menor consumo de corpos moedores, além de serem menos sensíveis às variações da dureza ou granulometria do minério do que moinhos de bolas.

Greco e Salnick (1974) investigaram a moagem em moinhos de barras utilizando bauxita proveniente de diversos países em um moinho piloto com barras de 46 cm de diâmetro, caracterizando a primeira simulação na área de moagem na Alcoa. Eles estudaram as variáveis como comprimento das barras, recarga de corpos moedores, velocidade do moinho, temperatura e porcentagem de sólidos do produto do moinho. Nestes testes não foi verificada a relação entre a potência consumida e a potência prevista pela teoria de Bond, esta última o dobro do real. As barras que tinham 5 cm de diâmetro, de alguma forma moíam mais eficientemente do que as de 10 cm.

Os mesmos Greco e Salnick realizaram testes variando o grau de enchimento do moinho e a vazão de alimentação de moagem. A mudança da taxa de moagem não era linear, sendo assim o último incremento de barras gerava menos efeitos que os anteriores. Os autores concluíram que a extrapolação destes dados sobre a velocidade do moinho para escala comercial poderia ser arriscada. Por fim, os dados mostraram que a eficiência de moagem era muito maior quando a concentração de sólidos da polpa estava a 60% do que a 45%, sendo os testes realizados para um produto com granulometria máxima de 0,84 mm.

Testes em moinhos autógenos também foram realizados pela Alcoa na Austrália em escala piloto, sendo seu uso justificado pela presença de uma fração rica em ferro chamado de "hardcap" nas bauxitas da região de Darling Range. Os primeiros testes foram feitos com sucesso em um moinho de 1,97 m x 0,67 m em *Kwinana Works*, Austrália, levando à instalação e operação de moinhos autógenos na planta de *Pinjarra (Western Australia)*.

Por causa das variações das características físicas da bauxita que alimentava o circuito de moagem de *Pinjarra*, as condições operacionais variavam muito. A uma mesma vazão de alimentação, a potência do moinho variava em quase 100%. Uma série de outras dificuldades práticas reduziu na época a capacidade dos moinhos. Uma solução eficaz foi adicionar bolas de aço forjado de 7,6 ou 10,2 cm de diâmetro ao moinho transformando a operação de autógena em semi-autógena. Atualmente a planta de moagem de *Pinjarra*, possui sete linhas de moinhos semi-autógenos, conforme figura 3.12, cada um em circuito fechado com seis ou oito peneiras DSM.

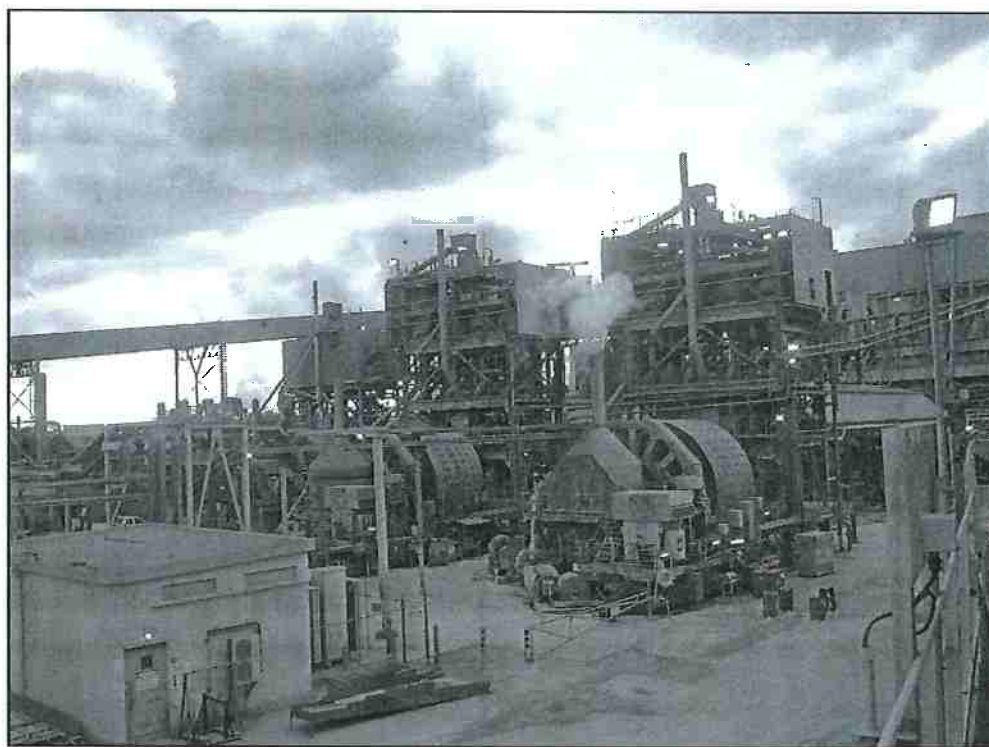


Figura 3.12. Foto da Usina de moagem da Refinaria de Pinjarra (Austrália)

4 OPERAÇÃO INDUSTRIAL DA REFINARIA ALUMAR

Como já citado anteriormente, o circuito industrial objeto do presente trabalho foi o da ALUMAR, em São Luis, Maranhão. O Consórcio de Alumínio do Maranhão, ALUMAR, é um dos maiores complexos de produção de alumínio (Redução) e alumina (Refinaria) do mundo. A composição acionária da ALUMAR inclui as empresas Alcoa Alumínio SA, Billiton Metais S.A, Rio Tinto Alcan e Abalco, esta última que tem como acionista majoritário o mesmo grupo que controla a Alcoa.

A ALUMAR foi instalada em 1980, sendo sua operação iniciada em 1984. A produção de alumina em 2007 atingiu 1.473.714 toneladas.

O diagrama de blocos da figura 4.1 apresenta o fluxo de processo da refinaria da ALUMAR.

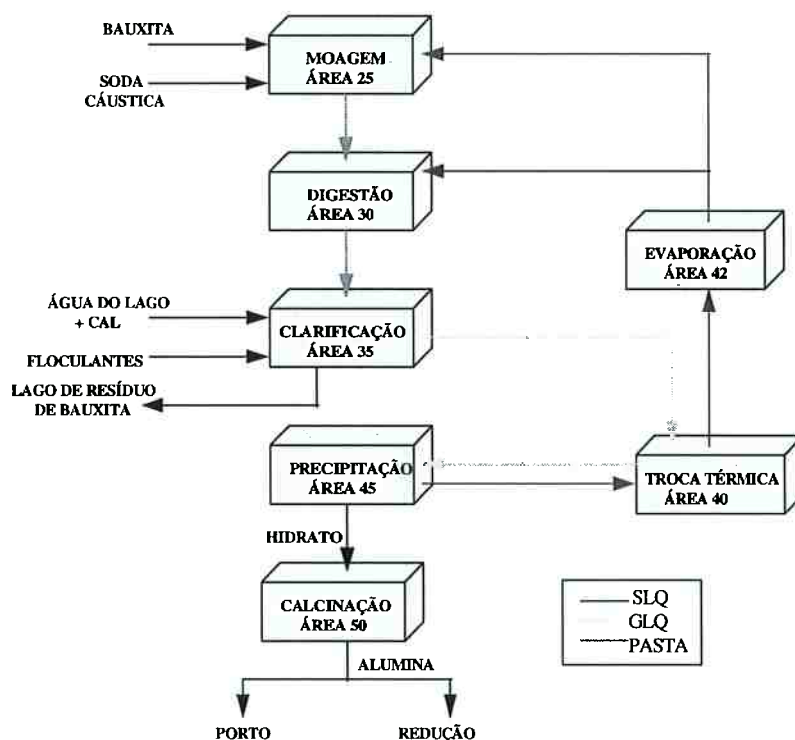


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do fluxo de processo – Refinaria ALUMAR (extraída de Andrade, H., 1998)

4.1 RECEBIMENTO DE BAUXITA E ESTOCAGEM

A bauxita processada pela ALUMAR provém da Mineração Rio do Norte - MRN instalada em Porto Trombetas, no estado do Pará. O transporte é efetuado por navios graneleiros. A composição média da bauxita da MRN é de 50% de alumina tri-hidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e a relação de consumo médio é de:

4 t de bauxita seca → 2 t de alumina → 1 t de alumínio

As especificações do produto da MRN recebidos na ALUMAR são as seguintes:

- Bauxita Granulada > 1,19 mm
- Bauxita Fina entre 1,19 e 0,105 mm
- Bauxita Superfina entre 0,105 e 0,037 mm

A bauxita consumida pela ALUMAR consiste de 60% granulada e de 40% fina. A composição média da bauxita recebida em 2006 está listada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Composição média da bauxita recebida na ALUMAR

Parâmetro	%
Umidade	11,56
Al_2O_3 disponível	49,49
Al_2O_3 total	53,47
TiO_2	1,37
Carbono Orgânico	0,04
SiO_2 total	5,37
SiO_2 reativa	4,48
Fe_2O_3	10,97
Perda ao fogo:	28,15

Por meio de uma empilhadeira ou *stacker*, a bauxita é estocada em um pátio de homogeneização com capacidade de 330.000 t. As pilhas homogeneizadas são retomadas e o produto encaminhado ao circuito de moagem, primeira etapa do processo de fabricação de alumina.

4.2 CIRCUITO DE MOAGEM

O circuito de moagem da ALUMAR (área 025) pode ser dividido em dois sistemas: alimentação de bauxita e a moagem propriamente dita, que tem como principais objetivos:

- Moagem de bauxita, com produto apresentando um valor máximo de 7% retidos em 35# (0,42 mm);
- Manter controlado o fluxo contínuo de bauxita em polpa para a digestão (área 30), com uma qualidade uniforme;
- Manter a concentração de sólidos em 1.000 a 50 g/L;
- Propiciar um fluxo contínuo de 220 a 240 t/h de bauxita moída (base úmida).

Cada uma das duas unidades de moagem é composta dos seguintes equipamentos básicos:

- 1 – Silo de estocagem de bauxita;
- 2 – Alimentador de sapatas (*apron feeder*);
- 3 – Transportador de correia para alimentação do moinho;
- 4 – Balança para pesagem contínua;
- 5 – Calha de alimentação do moinho;
- 6 – Sistema de *spray* de licor;
- 7 – Moinho dupla-câmara (*rodpeb*);
- 8 – Caixa de alimentação das bombas;
- 9 – Linha de licor para controle de densidade;
- 10 – Bombas de transferência para área de estocagem de produto moído.

4.2.1 Sistema de alimentação de bauxita

A bauxita é retomada dos pátios de estocagem por meio de uma retomadora tipo ponte, provida de uma roda de caçambas e através de correias transportadoras, alimenta os silos de estocagem. Posteriormente, por um alimentador de sapatas ou *apron feeder*, o minério é descarregando na correia de alimentação do moinho. A velocidade desse alimentador é variável, o que permite controlar a vazão de alimentação da moagem.

Ao entrar na calha de alimentação do moinho o material recebe uma solução de soda cáustica aquecida (licor usado ou *spent liquor*) por meio de bicos pulverizadores. O licor umedece o material para a moagem, sendo o fluxo controlado de acordo com a quantidade de bauxita, medida pela balança de pesagem contínua. A calha desce verticalmente até o bocal de alimentação do moinho (*spout feeder*). A figura 4.2 mostra um desenho esquemático do sistema de alimentação de bauxita.

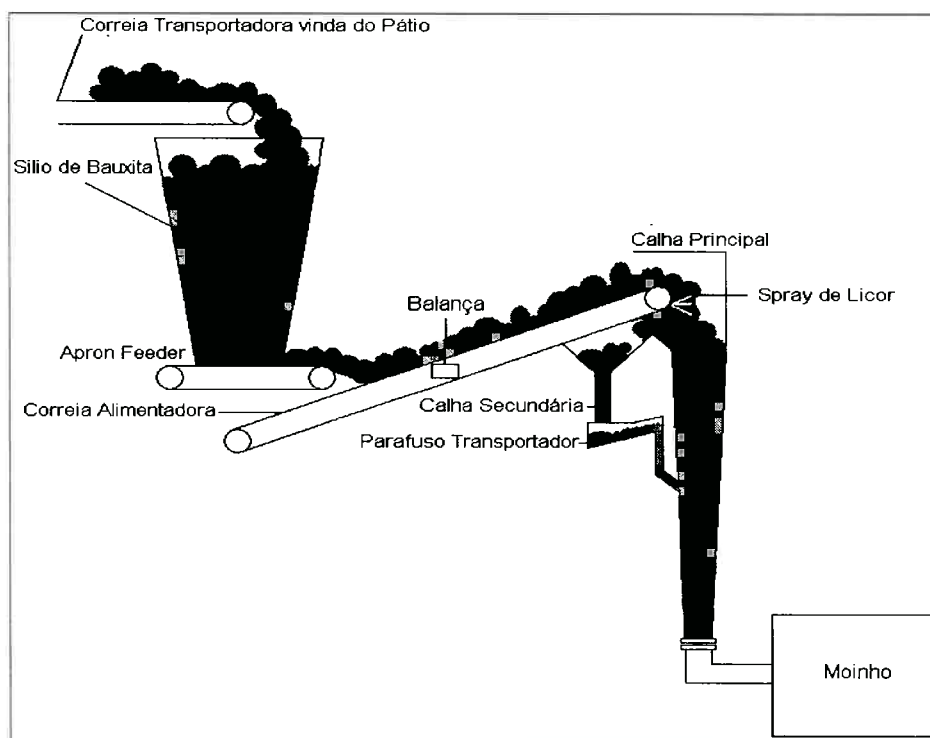


Figura 4.2 – Desenho esquemático do sistema de alimentação de bauxita da ALUMAR

4.2.2 Moinhos e bombeamento de produto moído

A moagem é composta por dois moinhos paralelos (linha 41 e 51) que operam em circuito aberto, processando em média 220 t/h de minério base úmida (cada linha de moagem) ao longo de três turnos diários, de oito horas cada, com disponibilidade operacional aproximada de 97,5%. Tal vazão de alimentação da moagem resulta na produção de aproximadamente 1,5 milhões t/ano de alumina.

Cada moinho possui 02 motores com potência de 750 kW cada e acionamento coroa-pinhão. Cada um deles é constituído internamente de duas câmaras: a primeira utilizando barras e a segunda, bolas, como corpos moedores. Os moinhos existentes são do tipo *rodpeb* Allis Chalmers, cujos dados são apresentados na tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Características dos moinhos 025-MO-41 e 025-MO-51 da ALUMAR

Característica	Valor	Unidade
Comprimento total do moinho (linha de centro entre mancais)	14026	mm
Diâmetro total do moinho (interior da carcaça)	3353	mm
Comprimento efetivo de moagem – Compartimento de barras (interno aos revestimentos)	4870	mm
Comprimento efetivo de moagem – Compartimento de bolas (interno aos revestimentos)	6300	mm
Diâmetro efetivo do moinho – (interno aos revestimentos)	3225	mm
Mecanismo de descarga da secção de barras	<i>Overflow</i>	-
Mecanismo de descarga da secção de bolas	Diafragma	-
Velocidade de rotação do moinho	16,10	rpm
Velocidade crítica calculada	23,55	rpm
Diâmetros de barras para reposição	89	mm
Diâmetros de bolas para reposição	50	mm
Carga nominal de barras	33	% volume interno do moinho
Carga nominal de bolas	37	% volume interno do moinho
Tipo do circuito	Aberto	-
Umidade média da bauxita na alimentação	~12	%

A bauxita moída deixa os moinhos pelo diafragma sendo encaminhada ao *trommel*. A fração passante no *trommel* é o produto final da moagem, especificada no valor máximo de 7% retido em 35# (0,42 mm). Este produto é descarregado no tanque de alimentação das bombas. Nesse ponto é adicionado licor usado, para controle de densidade média do produto em 1720 g/L. O produto então é bombeado para os tanques de estocagem de bauxita moída (área 025A).

Trabalhos desenvolvidos em refinarias da Austrália têm mostrado que bauxitas com granulometria acima de 0,42 mm apresentam maior dificuldade para serem digeridas, pelos seguintes motivos:

- A superfície de contato é relativamente menor, o que retarda a cinética de ataque da soda cáustica às partículas de gipsita;
- As partículas acima de 0,42mm têm uma velocidade de sedimentação maior, o que causa um menor tempo de residência dentro do digestor.

O diagrama de blocos do fluxo de processo da bauxita do recebimento até a saída da moagem é representado na figura 4.3.

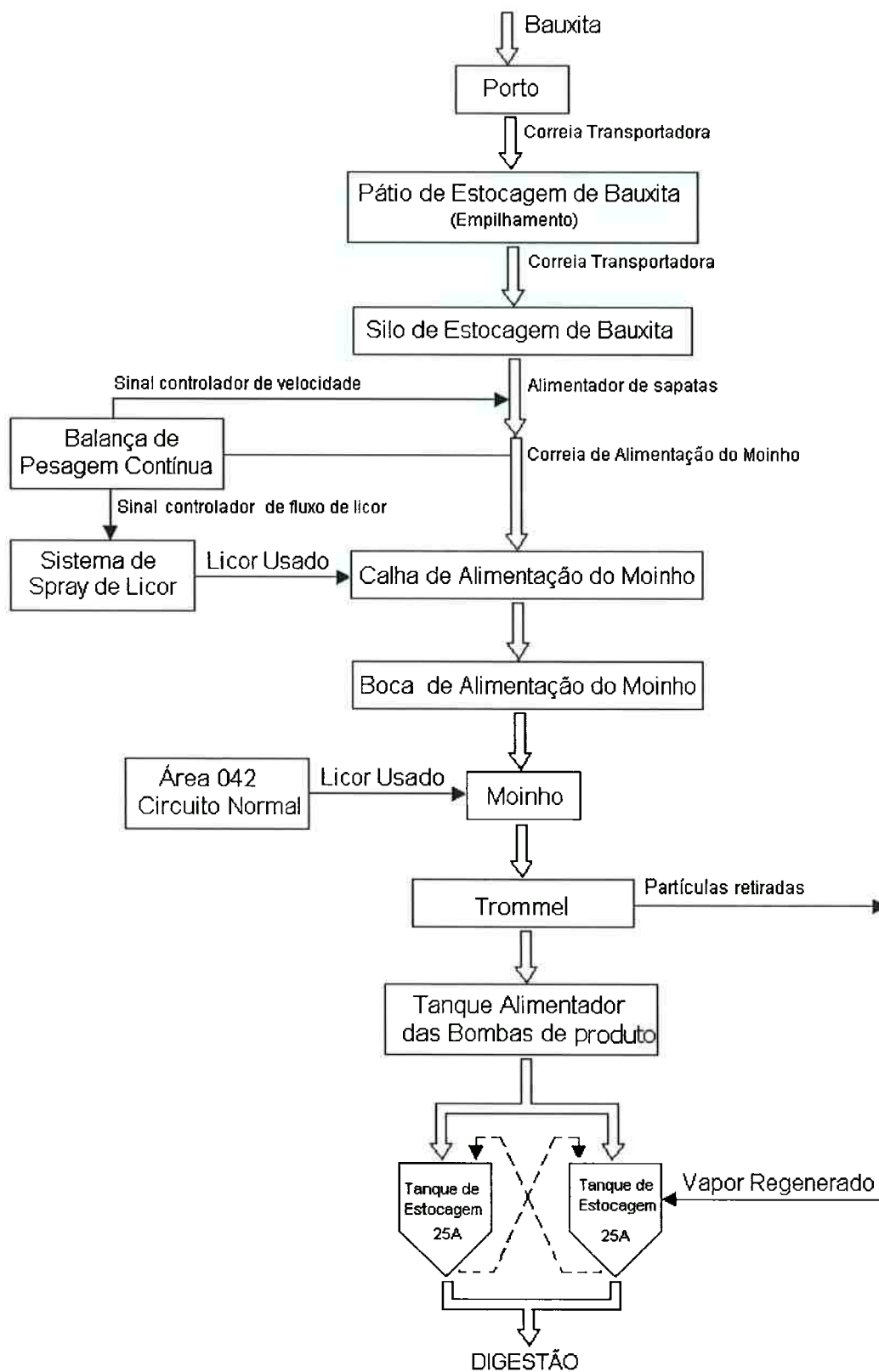


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do fluxo de moagem da bauxita – Refinaria da ALUMAR (apud Andrade, H., 1998)

4.3 EXPANSÃO DA ALUMAR – PROJETO ALREFU2

Durante os últimos 19 anos de operação da refinaria da ALUMAR, aproveitando melhorias de processo e mini-expansões, a capacidade de produção foi gradualmente ampliada com investimentos relativamente baixos. Dessa forma houve no período um aumento de produção, do valor inicial de 500 kt/ano para atuais 1,47 kt/ano. Desde 2006 está em implementação um novo projeto de expansão na refinaria da ALUMAR (ALREFU2), com investimentos superiores a R\$ 4 bilhões, aumentando sua capacidade de produção de alumina para 3,5 milhões t/ano.

Para atender os propósitos do negócio, o Projeto de Expansão da Refinaria da ALUMAR tem como principais alvos:

- Projetar e construir instalações que atendam a produção de 3,5 milhões t/ano de alumina, em conformidade com as especificações determinadas para este produto, com a disponibilidade mínima operacional da planta de 96%;
- Projetar e construir instalações cuja operação e manutenção estejam consoantes com os princípios do ABS (*Alcoa Business System*) e no mínimo dentro dos padrões das operações da planta existente;
- Planejar e controlar a implantação do Projeto de modo a minimizar os impactos nas instalações e operações existentes;
- Planejar e controlar a implantação do Projeto dentro dos limites aprovados de orçamento e prazo.

Missão do Projeto

Construir e entregar, de forma segura, a maior expansão de refinaria de alumina do mundo e maximizar o valor para os acionistas.

Visão do Projeto

Atender ou exceder as expectativas dos *stakeholders* e ser reconhecido como *benchmark* para projetos de expansão de refinaria.

A figura 4.4 mostra o escopo básico do Projeto de Expansão da Refinaria da ALUMAR.

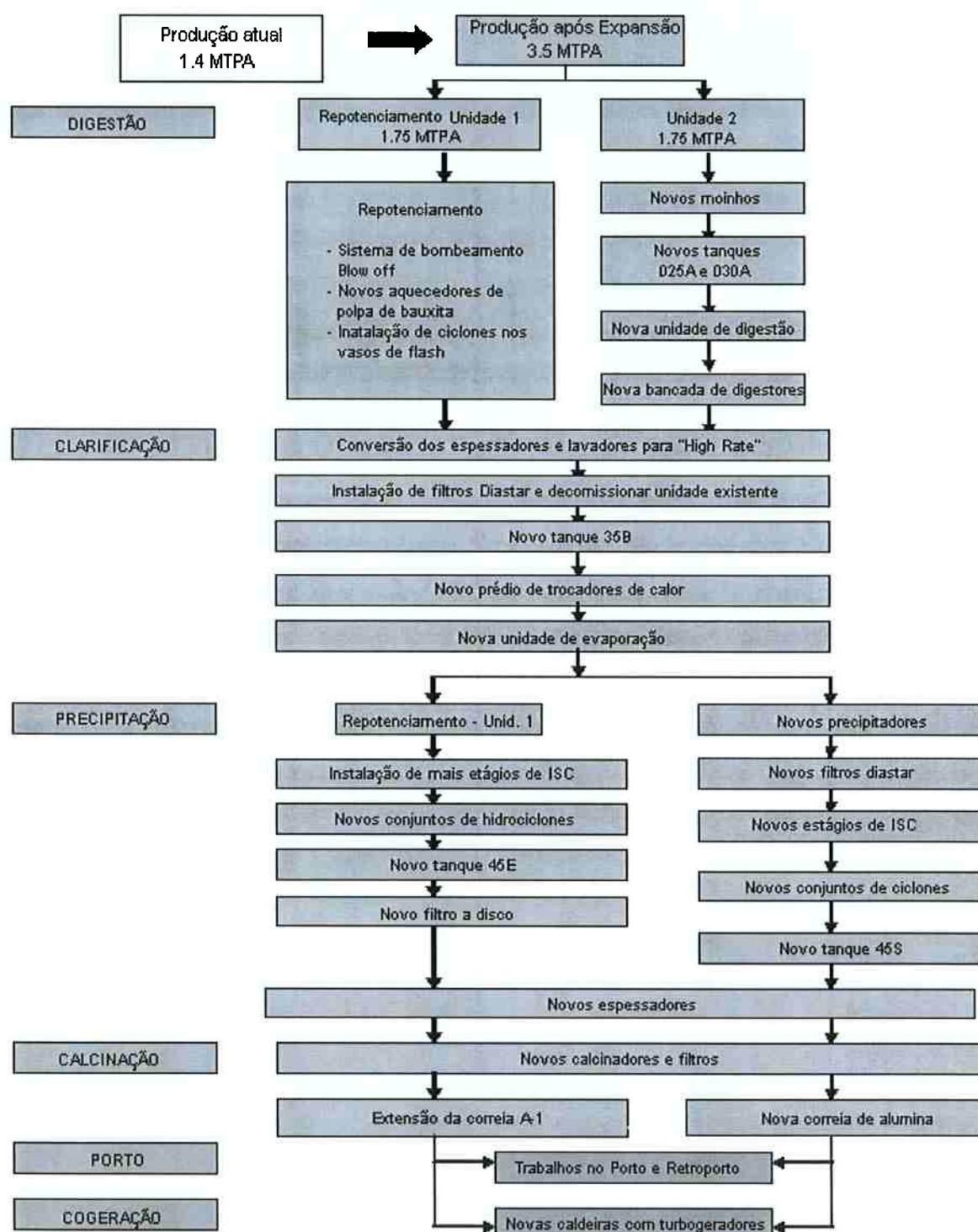


Figura 4.4 – Escopo básico do Projeto de Expansão da Refinaria da ALUMAR

4.3.1 Novo circuito de moagem da ALUMAR

Após a expansão, a ALUMAR passará de um consumo atual de 3,37 milhões t/ano de bauxita para aproximadamente 8,5 milhões t/ano.

O projeto de expansão prevê a instalação de duas novas linhas de moagem, cada uma delas com moinho de barras em série com moinho de bolas, operando em circuito fechado com hidrociclones.

Cada uma das duas novas linhas de moagem será composta pelos seguintes equipamentos:

- 1 – Silo de estocagem de bauxita;
- 2 – Alimentador de sapatas;
- 3 – Transportador de correia para alimentação do moinho de barras;
- 4 – Balança para pesagem contínua;
- 5 – Moinho de barras;
- 6 – Moinho de bolas;
- 7 – Bomba de alimentação do moinho de bolas;
- 8 – Duas baterias, cada uma composta por dois ciclones;
- 9 – Bomba de alimentação dos ciclones;
- 10 – Nova linha de licor para controle de densidade;
- 11 – Bomba de transferência para área de estocagem de produto moído.

Para o suprimento de bauxita moída requerida pela expansão, será necessária a operação contínua dos dois novos circuitos de moagem e de apenas um circuito existente, ficando o segundo como reserva. Dessa forma, eventuais interferências de operação e manutenção em quaisquer circuitos de moagem poderão ser feitas sem prejuízo de produção, pois o circuito de moagem reserva entraria em operação durante tais eventos.

A figura 4.5 representa o circuito completo de moagem da ALUMAR após a expansão da Refinaria.

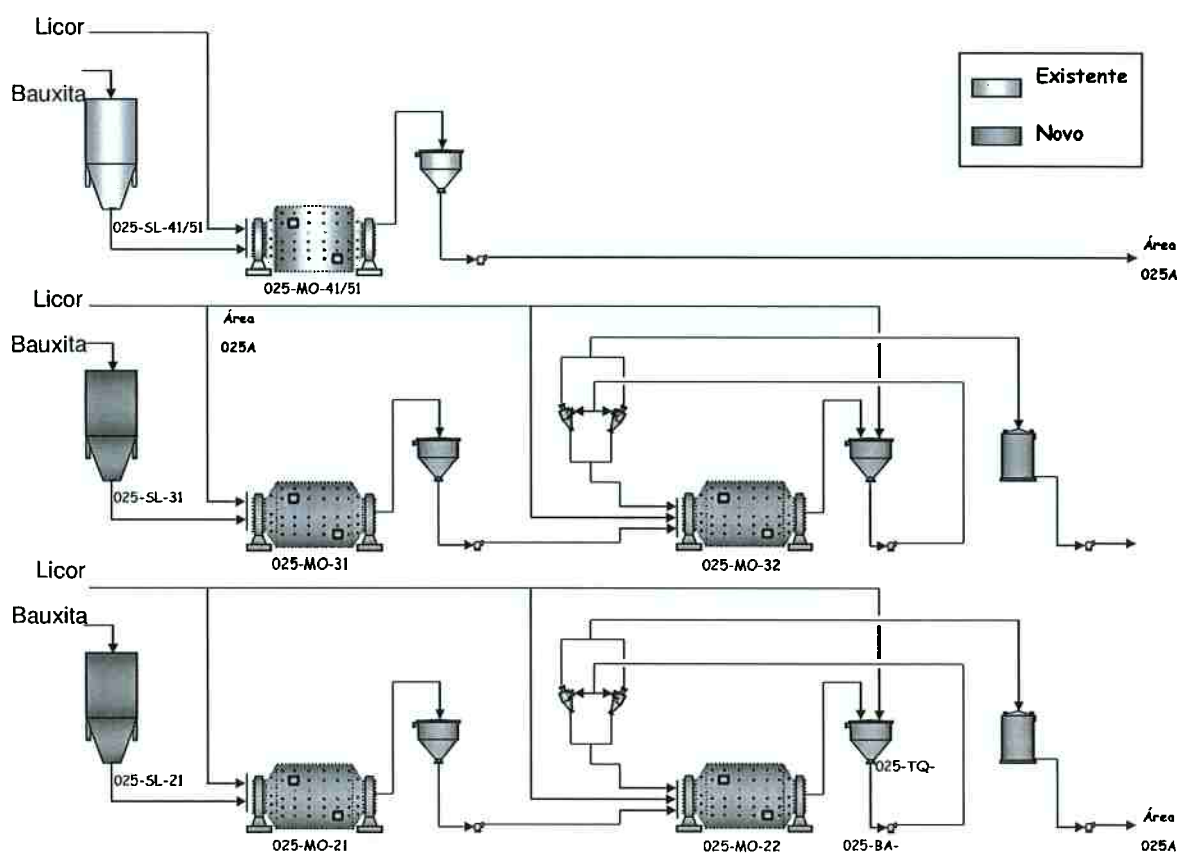


Figura 4.5 – Fluxograma do circuito de moagem da ALUMAR após a expansão da Refinaria

As tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as características dos novos moinhos a serem utilizados no circuito de moagem de bauxita da ALUMAR:

Tabela 4.3 – Características dos novos moinhos de barras 025-MO-21 e 025-MO-31

Característica	Valor	Unidade
Vazão de alimentação do moinho de barras	350	t/h
Comprimento efetivo do moinho – (interno aos revestimentos)	6300	mm
Diâmetro efetivo do moinho – (interno aos revestimentos)	4300	mm
Potência do motor	3000	HP
Mecanismo de descarga da secção de barras	Overflow	-
Velocidade de rotação do moinho	13,9	rpm
Velocidade crítica calculada	20,64	rpm
Diâmetros de barras para reposição	100	mm
Carga nominal de barras	30	% do volume interno do moinho

Tabela 4.4 – Características dos novos moinhos de bolas 025-MO-22 e 025-MO-32

Característica	Valor	Unidade
Vazão de alimentação do moinho de bolas	585	t/h
Comprimento efetivo de moagem – (entre revestimentos)	6300	mm
Diâmetro efetivo do moinho – (entre revestimentos)	4300	mm
Potência do motor	3000	HP
Mecanismo de descarga da secção de bolas	Overflow	-
Velocidade de rotação do moinho	13,9	rpm
Velocidade crítica calculada	20,64	rpm
Diâmetros de bolas para reposição	50	mm
Tipo do circuito	Fechado (ciclones)	-
Carga nominal de bolas	35	% do volume interno do moinho
Número de ciclones	2 por linha	-

A entrada em operação de ambas as linhas de moagem está previsto para este ano de 2008.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para efeito do presente trabalho foram programadas sessenta amostragens no circuito de moagem da ALUMAR. O objetivo foi obter dados experimentais suficientes para calibração dos modelos selecionados para representar a operação industrial. O protocolo de amostragens consistiu na tomada diária de amostras do produto do moinho, de forma a adaptar o programa à rotina de operação da refinaria. O período de amostragem foi de 04/09/07 a 05/11/07. Nos dias 07, 09, 13, 18, 19, 20, 21, 23, 26 e 30 de outubro não foram realizadas amostragens, pois no horário programado o moinho estava fora de operação, quer seja por manutenção ou recarga.

Assim, do total inicialmente programado, foram consideradas válidas para o presente trabalho 52 amostragens. O período de amostragem foi escolhido em função de anteceder a manutenção geral do moinho, quando foi realizada a troca total dos corpos moedores do compartimento de bolas e o complemento do compartimento de barras.

As amostragens foram realizadas no circuito denominado "linha 41". O ponto de obtenção de amostras está representado pela letra "A" na figura 5.1.

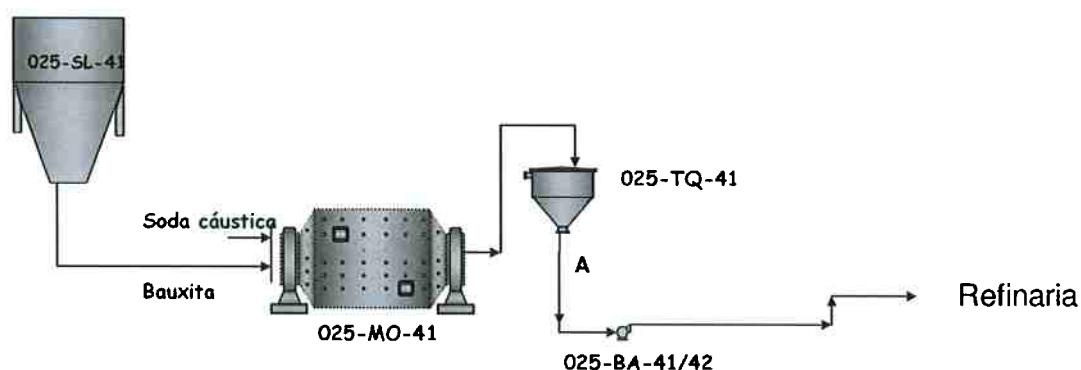


Figura 5.1 – Fluxograma do circuito de moagem – linha 41

5.1 ALIMENTAÇÃO DO MOINHO

Não existe atualmente na refinaria da ALUMAR quaisquer amostradores instalados na alimentação do circuito de moagem. O alto nível de produção da ALUMAR determina que qualquer interferência no processo resulta em perdas de produção. Qualquer parada do transportador de correia de alimentação do moinho geraria conseqüente redução no bombeamento de polpa para digestão. Devido a estas limitações práticas não foi possível realizar a amostragem na alimentação do moinho.

Os dados de alimentação da moagem considerados no presente trabalho foram provenientes dos certificados dos navios graneleiros de bauxita recebidos da Mineração Rio do Norte e estocados em pilhas, conforme foto da figura 5.2.



Figura 5.2 – Foto do pátio de bauxita recebida por navios e estocada em pilhas

Para todo carregamento de bauxita, a MRN emite um certificado informando a composição química, distribuição granulométrica e umidade da bauxita embarcada. Estes valores foram assim adotados no presente estudo. Durante os testes foram

consumidos 14 navios de bauxita, com capacidades aproximadas de 42.000 toneladas cada um.

5.2 PRODUTO DO MOINHO

A tomada e análise das amostras foram realizadas pela equipe do laboratório da ALUMAR, conforme anexo B, contando com a engenharia de processos, que apoiou de todas as formas na busca dos registros dos dados de operação durante a campanha de amostragem.

Para os valores de vazão de alimentação e potência do moinho no momento de tomada de amostras, foi considerado o valor obtido em tempo real, monitorado pela sala de controle.

Ao final de cada amostragem do produto da moagem, as amostras foram enviadas ao laboratório e conduzidas à etapa de processamento do material, obtendo-se a concentração de sólidos de polpa e distribuição granulométrica.

5.2.1 Determinação da concentração de sólidos na polpa

A análise da quantidade relativa de sólidos na polpa consistiu em filtrar um volume conhecido de polpa em papel de filtro quantitativo. Após a remoção da soda por lavagem, a amostra foi levada à estufa por uma hora a 110°C. Após seca deixou-se a amostra atingir a temperatura ambiente e pesou-se em balança de topo. O resultado foi obtido dividindo-se o valor da massa seca retida no papel de filtro pelo volume da amostra, conforme expressão (53):

$$\text{Conc.Sól}(g/l) = \frac{M1}{\text{Vol}(L)} \quad (53)$$

Onde,

M1 = Massa retida no papel de filtro (g);

Vol = Volume da amostra (L).

5.2.2 Distribuição granulométrica

A mesma amostra utilizada para determinação da concentração de sólidos foi transferida para uma peneira de 325 Tyler, sobre a qual a amostra também foi lavada em água corrente até a remoção de toda a soda. O material retido na peneira era levado para a estufa a 110°C e ficava por uma hora. Feito isso, a amostra seca era peneirada.

O peneiramento consistiu em uma coluna de peneiras seguindo a ordem: 10(topo); 20; 35; 65; 100 e 325(fundo) – malhas da escala Tyler. Toda amostra supracitada foi transferida para o conjunto de peneiras com a ajuda de um pincel e, o conjunto, levado para um vibrador mecânico (Ro-tap) por um período de trinta minutos. Após este período, as peneiras eram limpas (uma a uma) e a massa retida em cada uma anotada.

5.2.3 WI de barras e bolas

Os valores utilizados para *WI* de barras e bolas foram provenientes de ensaios realizados com amostras compostas da alimentação do moinho.

5.3 DIMENSÕES INTERNAS DO MOINHO

Como o desgaste de revestimentos é muito baixo nos moinhos da ALUMAR, assumiu-se não haver desgaste nos revestimentos da parede divisória e diafragma, uma vez que todas as placas foram trocadas na parada geral que ocorreu pouco tempo antes do início do período de amostragem. Sendo assim, foi considerado o comprimento das câmaras (*Effective Grinding Length* - EGL) de acordo com os desenhos do fabricante:

Comprimento da câmara de barras: 4.870 mm

Comprimento da câmara de bolas: 6.300 mm

Foi considerado um diâmetro de ambas as câmaras de 3.225 mm.

5.4 VOLUME DE CORPOS MOEDORES

Não foi necessário recorrer a históricos de desgaste para cálculo do volume de corpos moedores no moinho, pois na parada geral, antes do início das amostragens, ambas as câmaras foram recarregadas por completo, considerando enchimentos de 33% para câmara de barras e 37% para câmara de bolas, ilustrada pelas fotos das figuras 5.3 e 5.4, tiradas pelo autor.

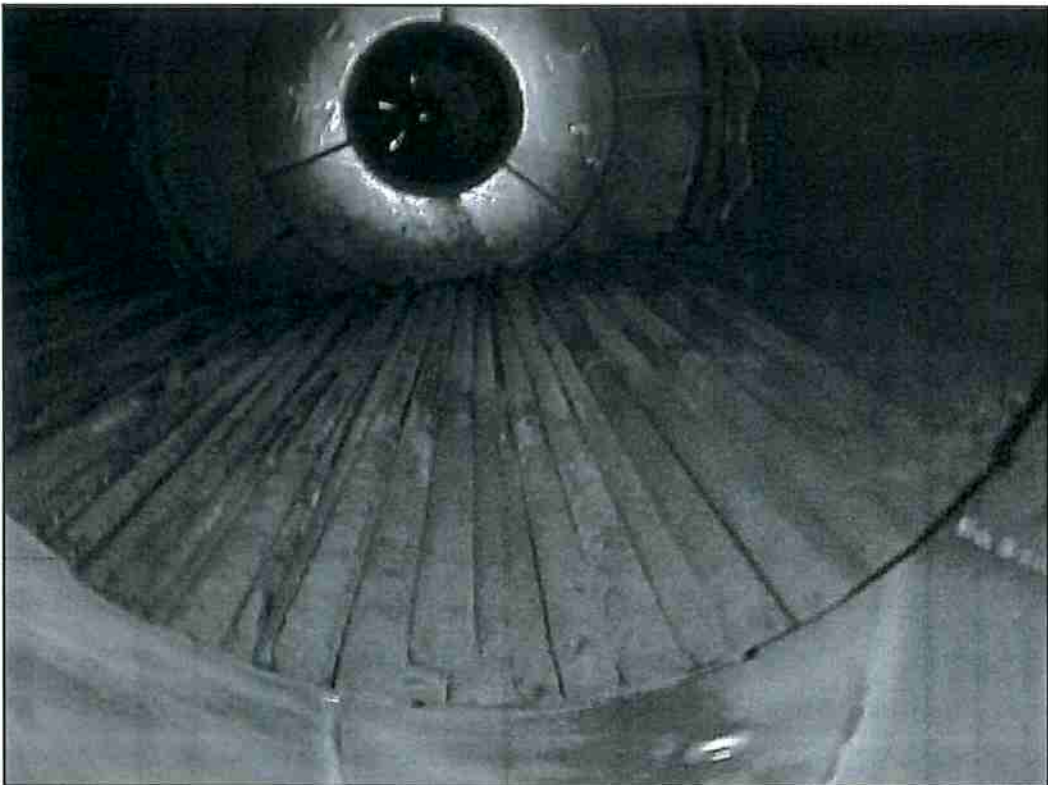


Figura 5.3 – Foto interna da câmara de barras do moinho 025-MO-41



Figura 5.4 – Foto interna da câmara de bolas do moinho 025-MO-41

6 RESULTADOS

6.1 RESULTADOS RELATIVOS AO PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS

6.1.1 Distribuição Granulométrica e umidade da alimentação

A distribuição granulométrica obtida durante os embarques de bauxita na MRN em cada um dos navios consumidos na época das amostragens pode ser verificada na tabela 6.1, que apresenta também o nome de cada navio e umidade dos lotes amostrados.

Tabela 6.1 – Distribuição granulométrica da bauxita consumida da alimentação da moagem

Data do consumo pela moagem (2007)	Navio	Umidade (%)	PORCENTAGEM RETIDA SIMPLES						
			+ 3"	+ 1"	+1/4"	+ 14 #	+150 #	+400 #	-400 #
4-set	Norsul Crateús	10,97	0	11,83	29,71	22,54	16,99	9,49	9,44
05 – 12-set	Marcos Dias	11,05	8,73	43,94	14,42	11,50	9,27	5,21	6,93
13 – 14-set	Norsul Crateús	10,97	0	11,83	29,71	22,54	16,99	9,49	9,44
15 – 19-set	Marcos Dias	12,17	0	11,03	20,29	18,18	24,88	14,89	10,73
20-set	Marcos Dias	11,86	0	16,66	5,37	14,09	35,59	17,32	10,97
21 – 24-set	Norsul Camocim	10,42	0	23,38	28,45	20,40	11,80	6,57	9,40
25 – 29-set	Norsul Crateús	11,11	0	20,70	27,94	17,92	17,50	7,89	8,05
25-set a 03-out	Marcos Dias	12,17	0	11,03	20,29	18,18	24,88	14,89	10,73
04 – 05-out	Norsul Camocim	12,00	0	30,09	18,88	11,50	20,30	10,22	9,01
06 – 11-out	Marcos Dias	10,82	0	30,74	24,84	16,71	11,72	6,73	9,26
12 – 16-out	Norsul Camocim	10,47	4,35	34,12	27,06	9,97	11,76	6,43	6,31
17 – 21-out	Norsul Crateús	12,19	0	23,35	30,94	12,66	12,50	8,07	7,48
22 – 28-out	Marcos Dias	11,86	0	16,66	5,37	14,09	35,59	17,32	10,97
29-out	Norsul Camocim	10,98	0	32,43	22,02	14,74	14,10	8,94	7,77
30-out a 02-nov	Orfeas	11,24	0	29,40	20,29	15,66	17,08	8,84	8,73
03 – 05-nov	Norsul Crateús	11,00	1,97	28,37	21,90	18,83	12,44	7,84	8,65
MÉDIA		11,33	0,94	23,79	21,72	16,22	18,34	10,01	8,99

A tabela 6.1 representa a alimentação do circuito de moagem no período de 04 de setembro a 05 de novembro de 2007. É importante verificar que mesmas especificações e navios se repetem em algumas datas diferentes. A ALUMAR usa como prática dispor a bauxita no pátio de homogeneização em pilhas separadas por navio de forma que se possa rastrear quais pilhas são referentes aos diferentes navios recebidos. Dependendo da posição da retomadora e estratégia de uso do pátio de estocagem, pode-se separar um carregamento do navio em mais pilhas e retomá-las em dias diferentes.

É realizada uma inspeção visual diária no pátio de estocagem, verificando-se o posicionamento da retomadora, correlacionando-se a bauxita que está sendo moída com o respectivo navio que a transportou. Dessa forma, o engenheiro de processos é capaz de rastrear a especificação relativa à alimentação dos moinhos.

O gráfico da figura 6.1 exibe a distribuição granulométrica média listada na tabela 6.1.

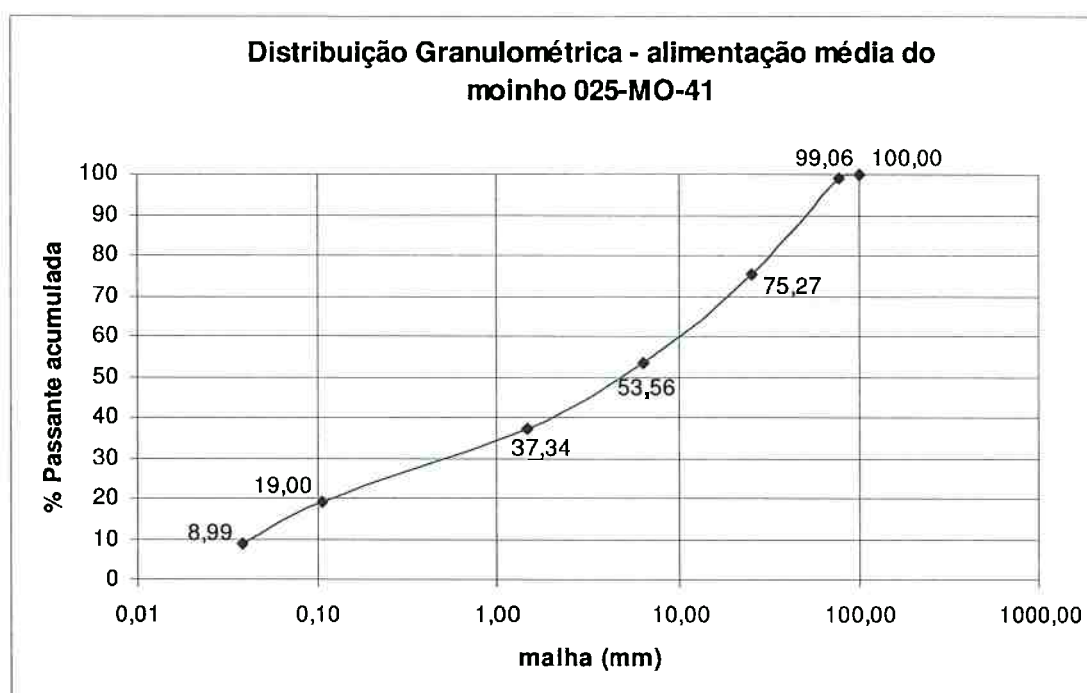


Figura 6.1 – Distribuição granulométrica média da alimentação do moinho

6.1.2 WI_{Barras} e WI_{Bolas}

As tabelas 6.2 e 6.3 apresentam, respectivamente, o sumário dos valores obtidos nos ensaios WI de barras e bolas realizados sobre amostra da alimentação da moagem. Os detalhes dos resultados dos ensaios encontram-se no Anexo C.

Tabela 6.2 – Resultados do WI_{barras}

Variável	Valor	WI_{barras} (kWh/t)
Abertura da malha de teste (P1)	1680 μm	
Média dos últimos dois valores de gramas por revolução (G_{bp})	11,913 g/revolução	13,6
P_{80} da alimentação do teste (F)	10997 μm	
P_{80} do produto (P)	1199 μm	

Tabela 6.3 – Resultados do WI_{bolas}

Variável	Valor	WI_{bolas} (kWh/t)
Abertura da malha de teste (P1)	150 μm	
Média dos últimos dois valores de gramas por revolução (G_{bp})	2,2628 g/revolução	9,94
P_{80} da alimentação do teste (F)	1812 μm	
P_{80} do produto (P)	113 μm	

6.1.3 Amostras do produto do moinho

Os dados apresentados na tabela 6.4 mostram a vazão da moagem, distribuição granulométrica, concentração de sólidos e potência do moinho obtidos durante a campanha de amostragem realizada. Todas as amostragens foram realizadas considerando a rotina operacional, sendo coletadas no horário das 19:15 hs.

Tabela 6.4 – Resultados das amostragens do produto do moinho

Dados do produto do moinho									
Data da amostragem (2007)	Vazão de moagem (t/h)	% retida acumulada						Concentração de sólidos (g/l)	Potência (MW)
		10 #	20 #	35 #	65 #	100 #	325 #		
04/09	240	0,2	2,7	8,5	24,1	33,0	59,6	1048	1,41
05/09	230	0,1	1,8	7,0	24,6	31,2	61,4	893	1,41
06/09	230	0,1	1,8	6,8	23,7	30,2	55,9	919	1,44
07/09	230	0,0	1,1	5,8	21,4	30,5	58,2	893	1,45
08/09	230	0,0	1,3	6,1	22,0	31,0	58,1	847	1,43
09/09	188	0,0	0,4	2,9	16,9	26,5	58,4	838	1,45
10/09	208	0,0	0,7	4,5	18,8	27,5	54,2	762	1,44
11/09	172	0,0	0,4	2,9	15,6	24,1	53,0	828	1,43
12/09	230	0,0	1,8	6,9	23,0	32,2	60,1	874	1,44
14/09	225	0,1	2,6	8,1	26,2	32,9	60,7	939	1,43
15/09	171	0,0	2,1	7,5	23,2	32,2	59,7	896	1,43
16/09	206	0,1	2,8	8,2	22,4	30,1	53,2	1030	1,43
17/09	202	0,1	2,9	9,4	25,9	34,6	60,6	867	1,42
18/09	207	0,0	1,2	5,9	21,7	30,9	58,3	834	1,42
19/09	208	0,0	0,6	3,7	19,1	29,2	59,8	896	1,44
20/09	227	0,0	0,8	4,4	20,7	31,1	62,1	917	1,42
21/09	240	0,1	2,5	8,7	27,6	34,7	63,5	908	1,40
22/09	190	0,1	1,7	6,5	23,7	30,5	60,6	893	1,42
24/09	211	0,1	1,9	7,3	23,7	32,9	60,0	840	1,41
25/09	205	0,0	1,4	6,2	21,8	31,0	58,4	901	1,40
26/09	209	0,0	0,9	4,9	20,9	30,5	59,1	874	1,40
27/09	217	0,0	0,2	2,4	16,9	27,4	59,7	774	1,39
28/09	240	0,2	4,1	11,0	28,4	37,9	66,9	901	1,42
29/09	227	0,1	2,0	6,9	24,2	30,7	59,0	890	1,42
30/09	228	0,0	1,4	6,2	23,3	31,3	60,0	889	1,44
01/10	220	0,0	0,2	2,3	15,5	25,4	57,0	823	1,42
02/10	223	0,0	0,5	3,4	16,9	26,0	55,3	938	1,40
03/10	193	0,0	1,1	5,1	20,3	29,7	58,5	1012	1,42
04/10	240	0,0	0,9	5,3	22,2	32,3	62,6	835	1,41
05/10	212	0,0	0,6	3,7	18,9	29,0	61,1	791	1,40

Tabela 6.4 (Conclusão) – Resultados das amostragens do produto do moinho

Data da amostragem (2007)	Vazão de moagem (t/h)	Dados do produto do moinho						Concentração de sólidos (g/l)	Potência (MW)
		% retida acumulada							
		10 #	20 #	35 #	65 #	100 #	325 #		
06/10	240	0,0	2,2	8,2	25,1	34,8	64,5	743	1,40
08/10	230	0,4	4,6	10,5	24,1	31,8	57,5	1251	1,39
10/10	240	0,1	1,9	7,4	24,5	34,2	63,2	895	1,40
11/10	240	0,0	1,9	7,1	22,7	31,6	58,6	930	1,40
12/10	240	0,0	1,1	6,0	22,4	32,2	62,6	820	1,39
13/10	240	0,0	1,9	7,1	22,1	30,5	55,9	960	1,40
14/10	240	0,0	1,5	7,4	26,7	37,1	66,5	815	1,40
15/10	231	0,0	0,8	4,1	18,7	28,5	60,7	998	1,40
16/10	240	0,0	2,2	7,8	24,0	33,1	60,7	930	1,44
17/10	230	0,0	1,0	5,0	20,7	30,4	59,9	831	1,42
22/10	240	0,1	2,7	9,0	26,1	35,5	63,1	962	1,42
24/10	240	0,0	1,6	6,5	24,4	31,4	59,7	1021	1,42
25/10	240	0,0	1,0	5,3	22,6	32,9	62,9	975	1,42
28/10	227	0,0	0,9	5,1	20,8	30,7	61,0	933	1,42
29/10	240	0,0	0,6	3,7	18,8	28,7	59,1	990	1,41
31/10	240	0,1	2,4	7,8	28,5	32,2	59,7	981	1,42
01/11	212	0,1	1,1	4,8	19,4	28,5	57,9	988	1,41
02/11	230	0,0	2,4	7,7	22,9	31,5	57,7	984	1,42
03/11	240	0,0	2,0	7,1	22,1	30,9	57,8	957	1,40
04/11	240	0,0	0,7	3,9	17,2	25,9	55,0	927	1,41
05/11	197	1,1	3,3	9,4	24,9	33,5	60,0	994	1,42
MÉDIA	223	0,1	1,6	6,3	22,2	31,0	59,6	910	1,42

O gráfico da figura 6.2 exibe a distribuição granulométrica média, representada em porcentagem passante acumulada nas malhas em que foram realizados os peneiramentos.

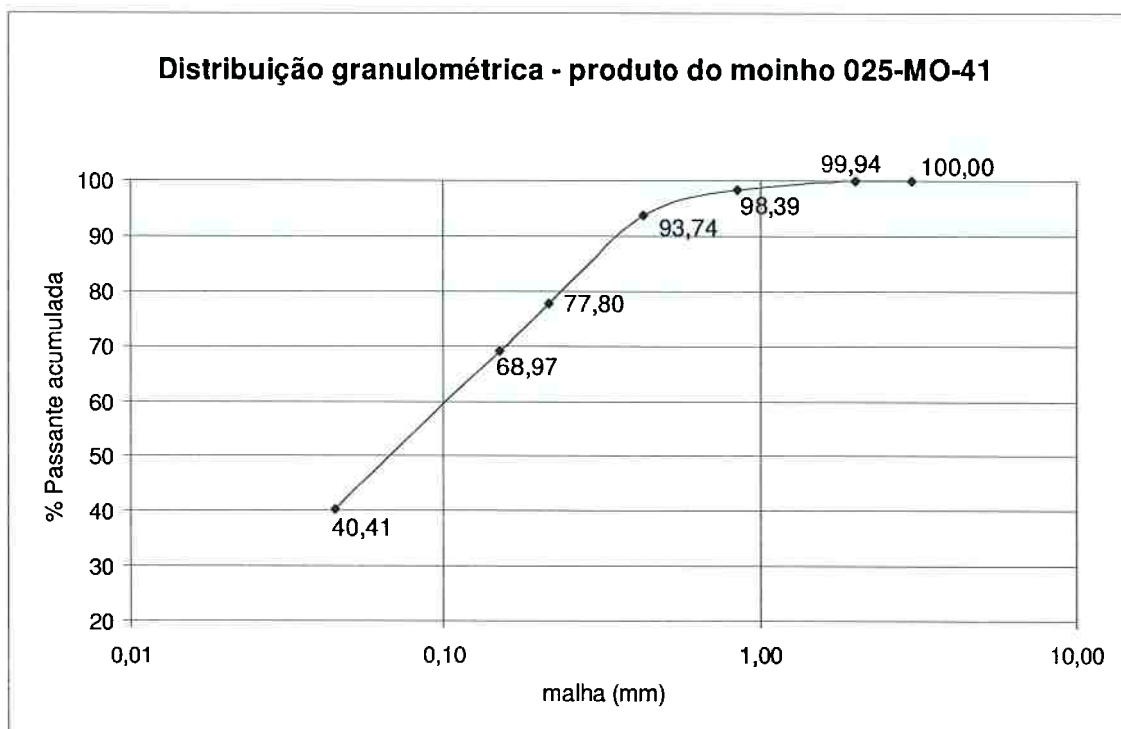


Figura 6.2 – Gráfico da distribuição granulométrica média do produto do moinho

A concentração de sólidos média calculada com base nos resultados das análises das amostras foi de 910,5 g/l, que corresponde a 60,4% de sólidos em massa.

Os valores de potência foram obtidos em tempo real da sala de controle no momento da coleta das amostras, com valor médio de 1,42 MW.

6.2 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Para calibração dos modelos matemáticos da moagem da ALUMAR foi empregado o simulador JKSimMet. Este programa inclui, além de modelos de equipamentos de processo de cominuição e classificação, módulos específicos para fechamento de balanço de massas e calibração dos modelos.

Assim, com os dados obtidos a partir das amostragens, tratamento de amostras, processamento dos dados e informações, foi criado um modelo que representasse o

atual circuito de moagem da ALUMAR no simulador JKSimMet. O moinho dupla-câmara foi modelado considerando um moinho de barras em série com um moinho de bolas operando em circuito aberto, como mostra a figura 6.3.

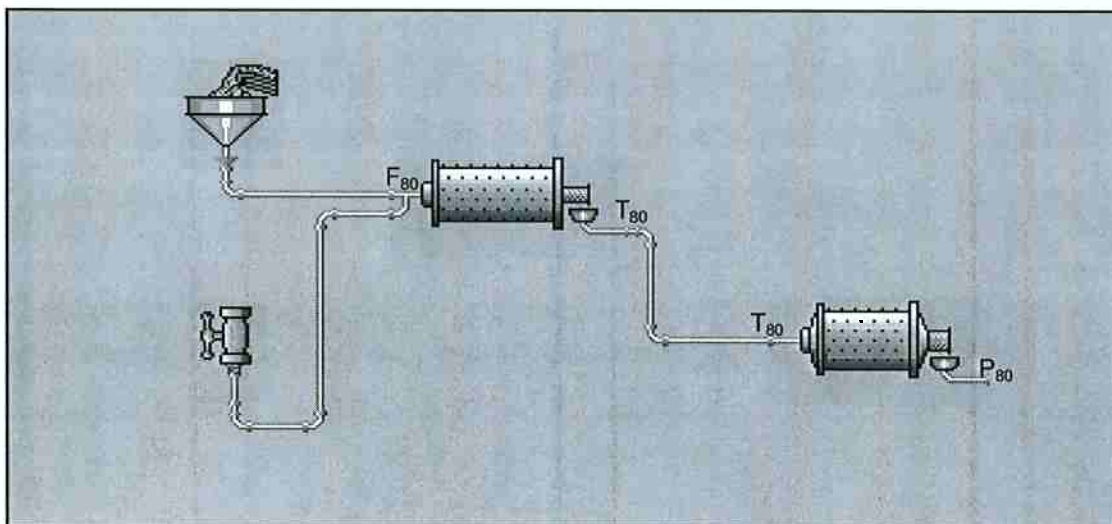


Figura 6.3 – Circuito considerado no modelo para representar o atual circuito de moagem da ALUMAR

O ajuste do modelo foi realizado utilizando-se o módulo denominado *Model Fitting*. De forma geral, este módulo utiliza um algoritmo que busca o conjunto de valores dos parâmetros que minimizam a somatória dos quadrados das diferenças entre estes e os valores experimentais.

À cada variável é atribuído uma estimativa de desvio, que assim representa o nível de confiança do operador sobre o parâmetro específico. Assim, para cada variável do circuito selecionado, neste caso vazão de sólidos, porcentagem de sólidos e frações retidas em cada classe granulométrica são atribuídos desvios, que podem ser percentuais das medidas, valores fixos ou ainda outros critérios. No presente trabalho foi utilizado para as distribuições granulométricas o critério de Whiten apresentado na tabela 6.5:

Tabela 6.5 – Relação entre ordenada normal e nível de confiança

% retida simples na malha	Desvio
< 1%	0,1 + 10% da medida
entre 1% e 10%	10% da medida
maior que 10%	1 (valor fixo)

O critério de Whiten trunca portanto, valores acima de 10% retidos na malha considerada e aumenta os desvios relativos para medidas inferiores a 1%.

Os desvios das medidas de vazão foram fixados em 10% do valor medido. Para porcentagens de sólidos foi adotado o valor de $\pm 2\%$ de desvio. Para efeito de cálculo de somatórios dos desvios, foi empregado o seguinte critério:

$$D_i = \left(\frac{Ve_i - Vc_i}{e_i} \right)^2 \quad (54)$$

Onde,

D = desvio relativo à variável i;

Ve_i = valor experimental da variável i;

Vc_i = valor calculado da variável i; e

e_i = erro atribuído à variável i.

O conjunto de parâmetros selecionados (Vc_i) deve, portanto ser aquele que minimiza a somatória dos desvios de todas as variáveis consideradas nas expressões (29) e (30).

6.2.1 Modelo da seção de barras

Não foi possível realizar a amostragem da polpa na região entre as câmaras de barras e bolas (produto do moinho de barras) em função da temperatura no interior do moinho estar em torno de 100 8C e a polpa conter soda cáustica. Para que o

operador pudesse entrar no moinho, inicialmente operava-se o equipamento com água durante mais de 8 horas visando seu resfriamento. Tal procedimento descaracterizaria completamente o material a ser amostrado.

As dimensões consideradas para este moinho foram as mesmas dimensões internas da câmara de barras do moinho considerado. Foram utilizados os valores médios das amostras da alimentação do circuito de moagem. Atribui-se o desvio de 1,0 (fixo) para a vazão de sólidos e de 2,0 (fixo) para a porcentagem de sólidos. Sendo assim foram utilizados os valores fornecidos pelo simulador após inserirmos os parâmetros do moinho de barras. Os valores de vazão de sólidos e porcentagem de sólidos em massa foram, respectivamente, $197,7 \pm 1,0$ e $60,4 \pm 2,0$.

A tabela 6.6 indica os valores dos parâmetros ajustados à função seleção (XC, IN e SL) e à constante do moinho MC. Conforme discutido no item 3.3.1, XC representa o tamanho abaixo do qual as partículas têm um valor constante de probabilidade de quebra.

Tabela 6.6 – Parâmetros associados à calibração do moinho de barras

Parâmetro	Valor
XC	3,43
IN	-4,60
SL	1,44
MC	3200

A variação destes parâmetros com o objetivo de auxiliar a análise de sensibilidade da distribuição granulométrica do compartimento de barras indicou que quando variados levemente, não modificam significativamente a distribuição. Sendo assim, decidiu-se que o modelo apresenta uma boa aproximação da realidade. O parâmetro mais sensível dentre os apresentados acima foi o IN, porém a curva do produto do moinho de barras foi considerada razoável utilizando como critérios o valor de T_{80} encontrado (1.150 mm) e que moinhos de barras não geram finos.

Foi preciso estimar o valor de T_{80} já que não foi possível realizar a amostragem do compartimento de barras. Utilizando a equação (31) e os valores calculados de potência, taxa de moagem, WI e P_{80} , foi calculado o valor de T_{80} , obtendo-se o valor

de 1.150 mm, conforme mostrado no Apêndice B. O gráfico da figura 6.4 ilustra os valores estabelecidos para a função Seleção (S):

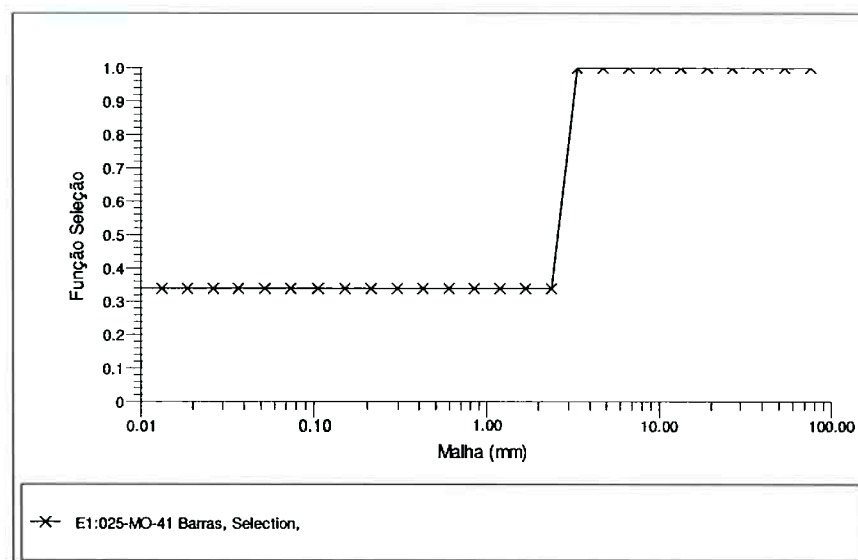


Figura 6.4 – Função seleção (S) utilizada no modelo que representa o compartimento de barras do moinho da ALUMAR

Como não houve testes de fragmentação do minério, não foram determinados índices paramétricos da relação entre energia aplicada e fragmentação resultante, sendo utilizada a função quebra padrão disponível no simulador.

6.2.2 Modelo da seção de bolas

Uma vez calibrado o modelo do moinho que equivale ao compartimento de barras é necessário modelar o compartimento de bolas para garantir uma boa calibração do produto final da moagem, representando o moinho dupla-câmara existente na Alumar. Os campos correspondentes aos dados experimentais da alimentação do moinho de bolas foram preenchidos com os valores ajustados do modelo calibrado do moinho de barras. Os dados experimentais do produto, por sua vez, foram determinados a partir da campanha de amostragem realizada.

O principal parâmetro do modelo de operação de moinho de bolas é o quociente r/d ou taxa de quebra, encontrado na equação (17), sendo sua normalização

caracterizada pela equação (20), obtendo-se o parâmetro r/d^* . Uma vez calculados ou selecionados os valores r/d^* , em conjunto com as características do minério (a_{ij}), o modelo estará calibrado para exercícios de simulação.

A tabela 6.7 mostra os valores de taxa de quebra associadas à cada nó da função *spline*, definidos pelo simulador no processo de ajuste dos dados experimentais ao modelo do moinho de bolas.

Tabela 6.7 – Taxas de quebra r/d^* determinadas para calibração do modelo do moinho de bolas

Nó	Tamanho (mm)	$\ln(r/d_i^*)$
1	0,100	-1,038
2	0,375	2,888
3	5,000	7,702

O erro global (SD), resultante do ajuste efetuado, assumiu o valor de 0,35. Foram obtidos, respectivamente, os valores de $197,7 \pm 10$ t/h e $60,4 \pm 2,0$ % para as vazões de sólido e porcentagens de sólido em massa associados aos fluxos do moinho de bolas. O gráfico da figura 6.5 ilustra a distribuição dos parâmetros r/d^* .

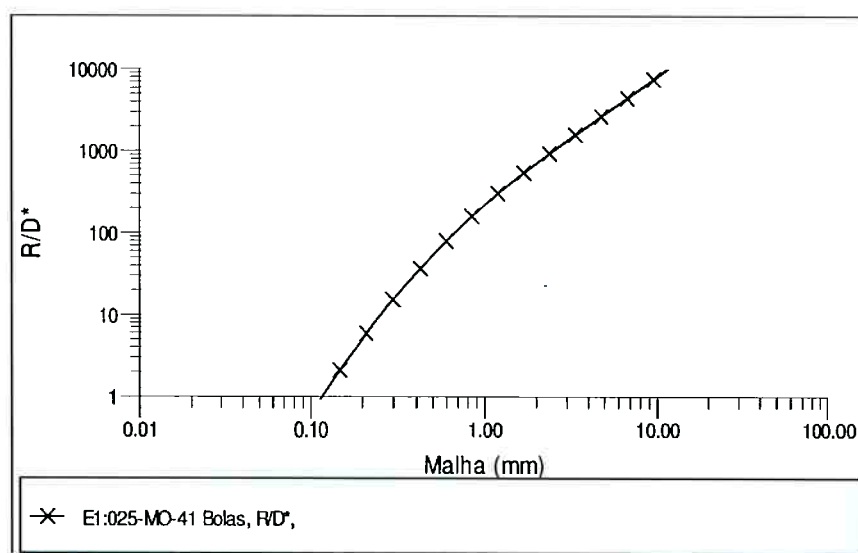


Figura 6.5 – Distribuição dos parâmetros r/d^* utilizada no modelo que representa o compartimento do moinho de bolas da ALUMAR

6.2.3 Modelo integrado

A integração dos modelos foi efetuada após a calibração dos modelos individuais anteriormente detalhados. Os principais parâmetros e dados de distribuição granulométrica estão apresentados na tabela 6.8, sendo a distribuição granulométrica dos fluxos ilustrada pela figura 6.6.

Tabela 6.8 – Distribuição granulométrica dos fluxos presentes no modelo integrado

	Alimentação Nova	025-MO-41 Barras		025-MO-41 Bolas	
		Alimentação	Produto	Alimentação	Produto
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7
Densidade dos sólidos (t/m ³)	2,26	2,26	2,26	2,26	2,26
Vazão de líquido (t/h)	25,2	129,6	129,6	129,6	129,6
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4
Densidade da polpa (t/m ³)	1,978	1,508	1,508	1,508	1,508
Vazão da polpa (m ³ /h)	113	217	217	217	217
d ₈₀ (mm)	29,2	29,2	1,15	1,15	0,217
% retida em 35#	69,9	69,9	41,4	41,4	6,3
Tamanho (mm)	% Passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	99,1	99,1	100	100	100
50,98	94,2	94,2	100	100	100
25,4	75,3	75,3	99,9	99,9	100
12,7	61,4	61,4	99,0	99,0	100
9,5	57,8	57,8	98,3	98,3	100
6,7	54,1	54,1	97,0	97,0	100
4,75	50,3	50,3	95,2	95,2	100
3,35	46,2	46,2	93,1	93,1	100
2,36	42,2	42,2	90,5	90,5	100
1,7	38,9	38,9	87,4	87,4	99,9
1,18	36,0	36,0	80,6	80,6	99,5
0,84	33,9	33,9	72,5	72,5	98,4
0,6	32,0	32,0	65,4	65,4	96,8
0,42	30,1	30,1	58,6	58,6	93,7
0,3	28,0	28,0	52,9	52,9	87,5
0,21	25,4	25,4	47,4	47,4	77,8
0,15	22,5	22,5	42,5	42,5	69,0
0,105	19,0	19,0	37,6	37,6	60,1
0,074	15,3	15,3	33,0	33,0	51,7

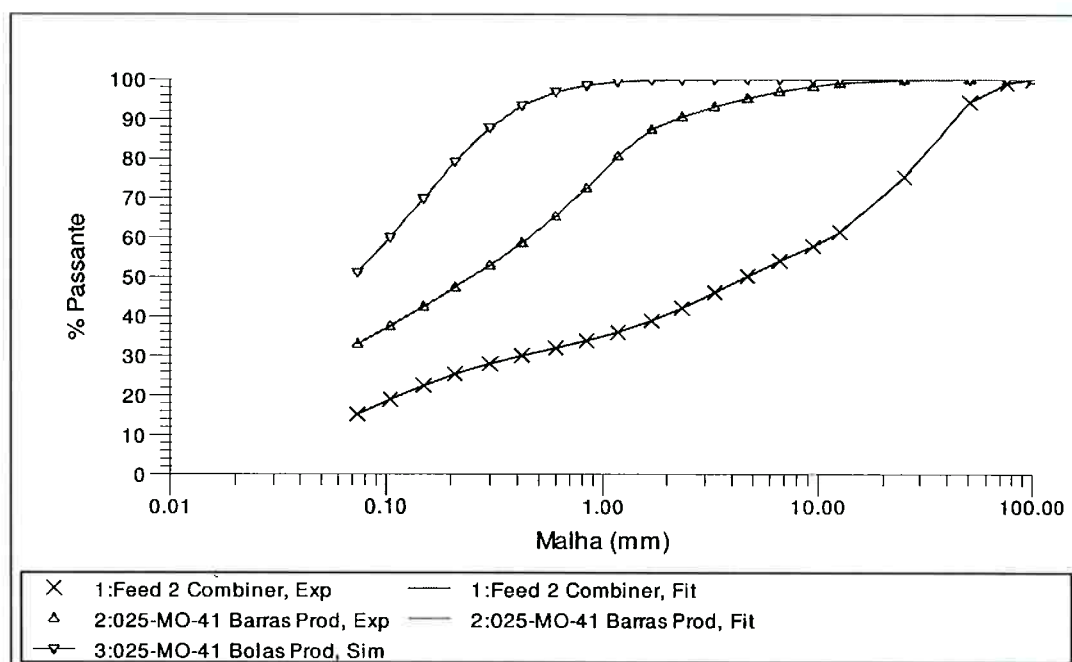


Figura 6.6 – Distribuições granulométricas resultantes do modelo integrado do moinho da ALUMAR

A figura 6.7 mostra valores ajustados das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm), que é a malha de controle utilizada como referência para análises do produto do moinho na Alumar.

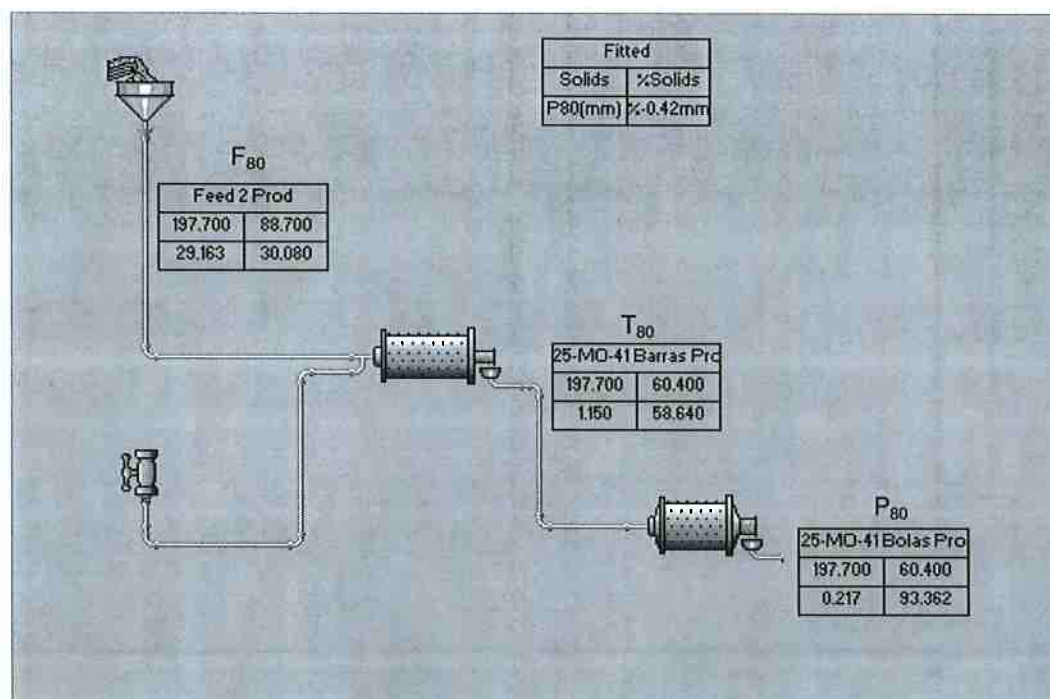


Figura 6.7 – Modelo integrado para moinho *rodpeb* da Alumar

6.2.4 Potência dos moinhos

6.2.4.1 Potência absorvida pela câmara de barras

O modelo de moinho de barras utilizado no JKSimMet não fornece os valores de potência para moinhos de barras. Portanto, foi utilizado o método desenvolvido por Bond e citado por Beraldo (1987), conforme descrito no capítulo 3 do presente trabalho.

De acordo com a expressão (47), a potência calculada para a câmara de barras é de 641 kW, sendo os cálculos apresentados a seguir:

$$KWR = 1,752 \cdot D^{0,34} \cdot (6,3 - 5,4 \cdot V_p) \cdot C_s$$

$$KWR = 1,752 \cdot 3,225^{0,34} \cdot (6,3 - 5,4 \cdot 0,33) \cdot 0,68 = 8,01 \text{ kW/ton}$$

$$\text{Pot} = KWR \cdot \text{carga de barras (t)} = 8,01 \cdot 80 = \mathbf{641 \text{ kW}}$$

6.2.4.2 Potência absorvida pela câmara de bolas

Já pela expressão (48), é possível calcular a potência para a câmara de bolas, a qual apresentou valor total de 984 kW, sendo os cálculos apresentados abaixo:

$$KWB = 4,879 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot V_p) \cdot C_s \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \cdot C_s}} \right) + S_s$$

$$KWB = 4,879 \cdot 3,225^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot 0,37) \cdot 0,68 \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \cdot 0,68}} \right) + 0 = 9,64 \text{ kW/ton}$$

$$\text{Pot} = \text{Pot} = KWB \cdot \text{carga de bolas} = 9,64 \cdot 88 = 848 \text{ kW}$$

Considerando que a descarga do moinho de bolas é por diafragma, deve-se multiplicar a potência encontrada nesta câmara por 1,16 totalizando **984 kW**.

6.2.4.3 Potência total do moinho estudado

Segundo Beraldo (1987), a potência total consumida pelo moinho é a soma das potências de cada câmara. De acordo com os cálculos realizados, a potência total do moinho estudado foi de 1.625 kW (soma das potências absorvidas pela câmara de barras e bolas).

$$\text{Potência total} = \text{KWR} + \text{KWB} = 641 + 984 = 1.625 \text{ kW}$$

Entretanto, a média dos valores de potência do moinho estudado foi de 1.420 kW. Para calibrar o modelo de potência do moinho a ALUMAR, foi então necessário corrigir a constante da expressão de Bond de forma a obter-se os valores medidos durante a campanha de amostragem. Os valores das constantes obtidas estão listados abaixo:

$$\text{Barras: } 1,752 \cdot 0,874 = 1,531$$

$$\text{Bolas: } 4,879 \cdot 0,874 = 4,264$$

Fica, portanto definido para o moinho da ALUMAR a constante de calibração do modelo de potência de Bond com valor de 0,874, que representa a razão entre as potências medidas e teóricas.

Dessa forma, o valor calculado resultou em uma potência total de 1.420 kW, sendo aproximadamente 40% (560 kW) correspondente ao consumo do compartimento de barras e 60% (860 kW) correspondente ao compartimento de bolas.

Vale ressaltar que as potências calculadas com base nas constantes acima é aquela registrada no motor do equipamento.

6.3 SIMULAÇÕES E ANÁLISES

Após o ajuste dos modelos, diferentes cenários foram simulados no JKSimMet. Os valores resultantes da calibração dos modelos foram considerados como sendo o Caso Base, ajustados a partir das condições operacionais médias obtidas durante a amostragem. As simulações incluíram duas etapas: a primeira variando parâmetros operacionais do Caso Base (grau de enchimento das câmaras de moagem e granulometrias da alimentação) e a segunda simulando o novo circuito de moagem que está em fase final de montagem na ALUMAR.

6.3.1 Variações de parâmetros operacionais do Caso Base

No Caso Base do circuito existente de moagem da Alumar, o moinho processou uma média de 197,7 t/h de bauxita em base seca, operando com 60,4% de sólidos em massa no interior dos moinhos, enchimento de 33% da câmara de barras e 37% da câmara de bolas, além da velocidade de rotação a 68% da velocidade crítica. Nessas condições, d_{80} do produto da câmara de barras (definido neste trabalho como T_{80}) foi de 1,150 mm e o d_{80} do produto da câmara de bolas foi de 0,217 mm.

Os principais parâmetros e dados de distribuição granulométrica estão apresentados na tabela 6.9, sendo esta última ilustrada pela figura 6.8.

Tabela 6.9 – Distribuição granulométrica dos fluxos presentes no Caso Base

	CASO BASE		
	Alimentação do moinho	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7
% de sólidos	88,7	60,4	60,4
d ₈₀ (mm)	29,2	1,15	0,217
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3
Grau de enchimento (%)	-	33	37
Potência (kW)	-	560*	860*
Potência total (kW)	-	1420	
Tamanho (mm)	% Passante acumulada		
101,6	100	100	100
76,2	99,1	100	100
50,98	94,2	100	100
25,4	75,3	99,9	100
12,7	61,4	99,0	100
9,5	57,8	98,3	100
6,7	54,1	97,0	100
4,75	50,3	95,2	100
3,35	46,2	93,1	100
2,36	42,2	90,5	100
1,7	38,9	87,4	99,9
1,18	36,0	80,6	99,5
0,84	33,9	72,5	98,4
0,6	32,0	65,4	96,8
0,42	30,1	58,6	93,7
0,3	28,0	52,9	87,5
0,21	25,4	47,4	77,8
0,15	22,5	42,5	69,0
0,105	19,0	37,6	60,1
0,074	15,3	33,0	51,7

* Os valores de potência listados referem-se àqueles calculados para câmara de barras e câmara de bolas.

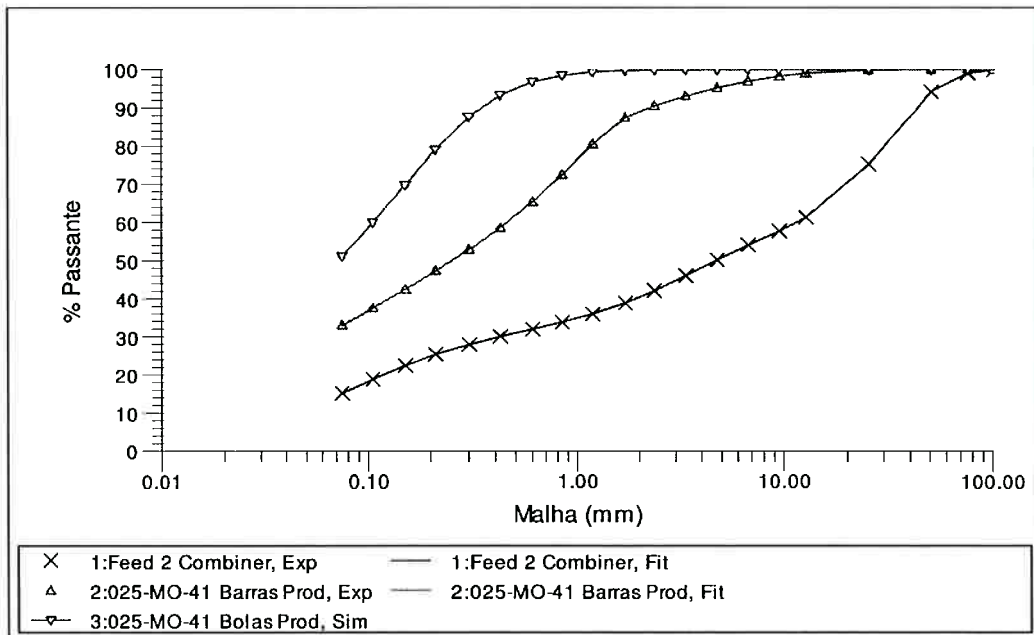


Figura 6.8 – Distribuições granulométricas do Caso Base

A figura 6.9 mostra valores ajustados das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm), que é a malha de controle utilizada na moagem da ALUMAR.

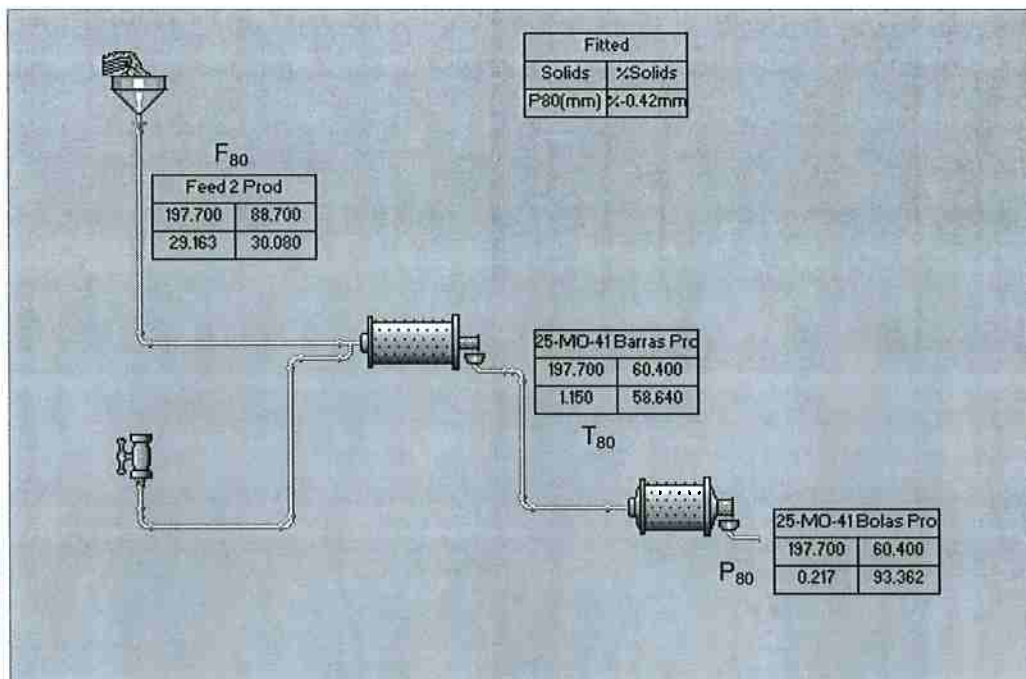


Figura 6.9 – Modelo do Caso Base

6.3.1.1 Simulação 1 – Carga de barras

A simulação 1 consistiu em diminuir a carga de barras na primeira câmara, reduzindo o grau de enchimento de 33% para 25% e na manutenção das demais condições.

A figura 6.10 mostra valores simulados das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm).

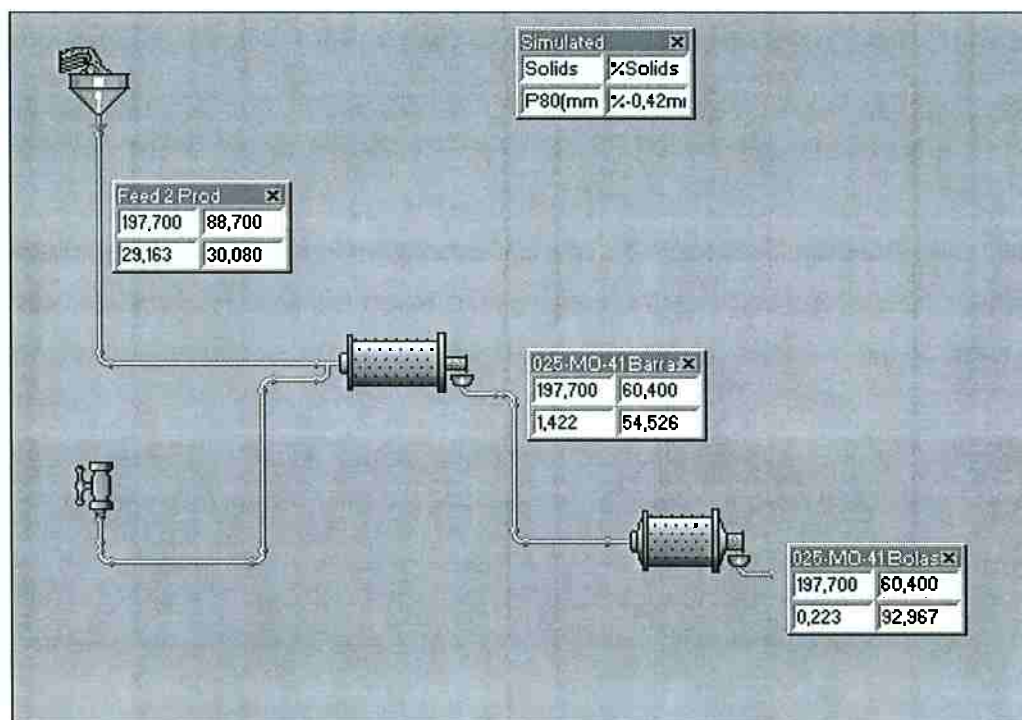


Figura 6.10 – Simulação 1 – redução da carga de barras

Os principais parâmetros e dados de distribuição granulométrica estão apresentados na tabela 6.10, sendo a distribuição ilustrada pela figura 6.11.

Tabela 6.10 – Dados da comparação do Caso base e Simulação 1

	CASO BASE			SIMULAÇÃO 1	
	Alimentação do moinho	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4
d_{80} (mm)	29,2	1,15	0,217	1,422	0,223
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3	45,5	7,03
Grau de enchimento (%)	-	33	37	25	37
Potência (kW)	-	560	860	465	860
Potência total (kW)	-	1420		1325	
Tamanho (mm)	% Passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	99,1	100	100	100	100
50,98	94,2	100	100	100	100
25,4	75,3	99,9	100	99,8	100
12,7	61,4	99,0	100	98,6	100
9,5	57,8	98,3	100	97,6	100
6,7	54,1	97,0	100	95,8	100
4,75	50,3	95,2	100	93,7	100
3,35	46,2	93,1	100	91,0	99,9
2,36	42,2	90,5	100	87,9	99,9
1,7	38,9	87,4	99,9	84,2	99,7
1,18	36,0	80,6	99,5	75,2	99,2
0,84	33,9	72,5	98,4	67,6	98,3
0,6	32,0	65,4	96,8	60,8	96,5
0,42	30,1	58,6	93,7	54,5	93,0
0,3	28,0	52,9	87,5	49,2	87,2
0,21	25,4	47,4	77,8	44,0	78,4
0,15	22,5	42,5	69,0	39,5	68,9
0,105	19,0	37,6	60,1	34,8	59,0
0,074	15,3	33,0	51,7	30,5	50,1

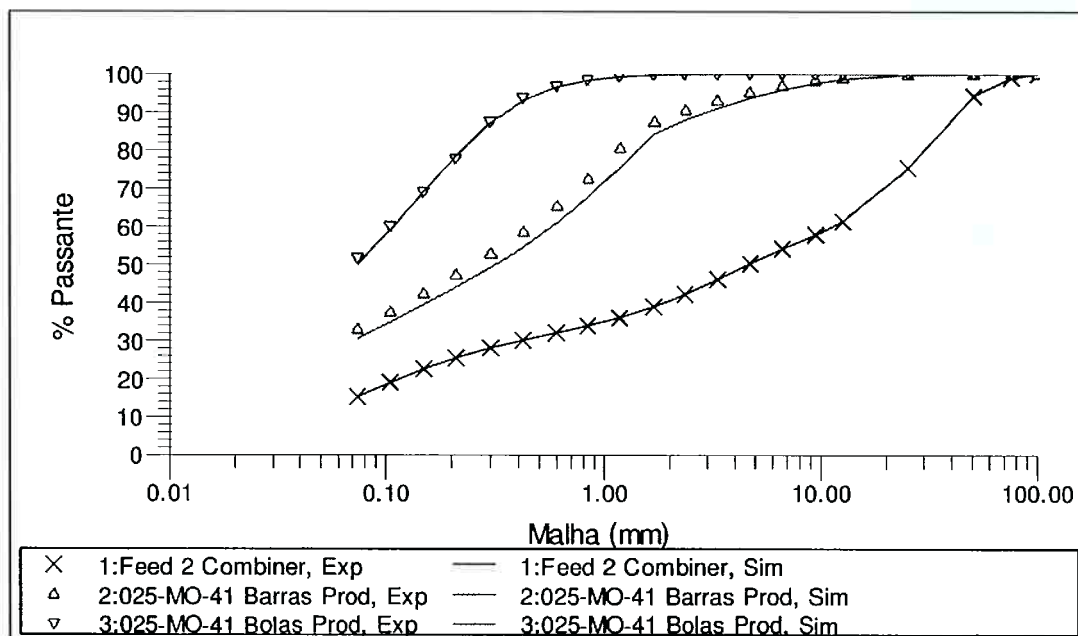


Figura 6.11 – Distribuições granulométricas do Caso Base e Simulação 1

Esta redução do grau de enchimento da câmara de barras impactou na distribuição granulométrica do produto final de ambas as câmaras de barras e bolas, com o d_{80} passando, respectivamente, de 1,175 mm e 0,217 mm para 1,422 mm e 0,223 mm. A porcentagem retida em 35# (0,42 mm) ficou levemente acima da especificação exigida pelo processo passando de 6,6% no caso base para 7,03% no cenário simulado e a potência total consumida pelo moinho passou de 1.420 kW para 1.325 kW.

Isto mostra que a variação da carga do moinho, mesmo que apenas a de barras impacta diretamente na especificação do produto final. Fica portanto demonstrado que para manter-se o produto dentro das especificações estipuladas, há necessidade de manter-se a rotina de recarga, de forma a que o volume da carga de ambas as câmaras seja constante.

6.3.1.2 Simulação 2 – Carga de bolas

A simulação 2 consistiu em diminuir a carga de bolas na segunda câmara, reduzindo o grau de enchimento de 37% para 25% e na manutenção das demais condições.

A figura 6.12 mostra valores simulados das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm).

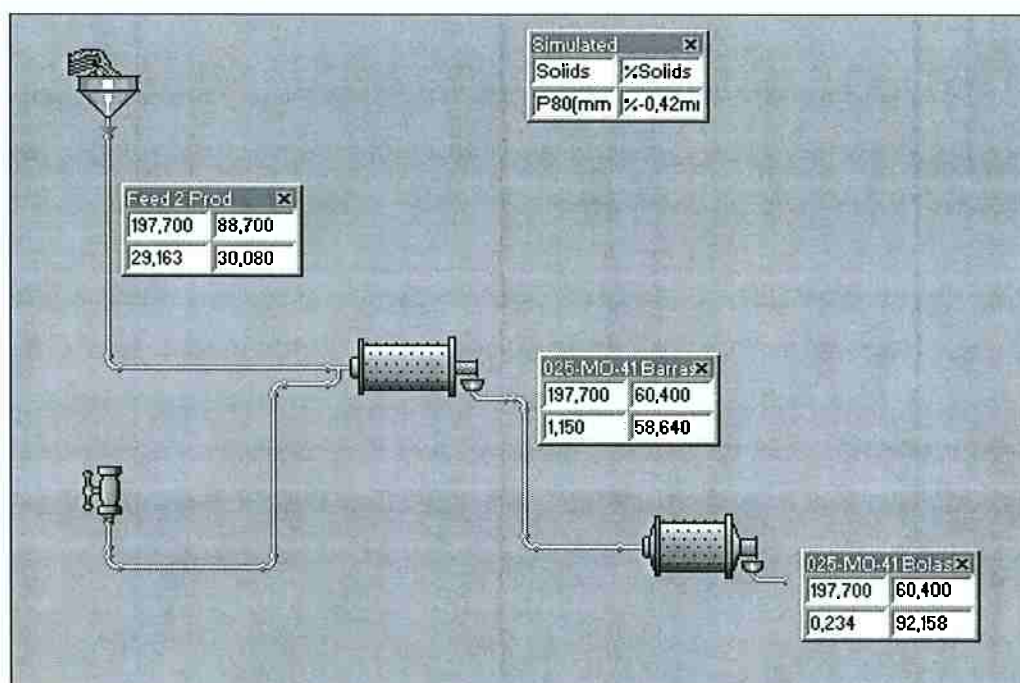


Figura 6.12 – Simulação 2 – redução da carga de bolas

Analogamente os principais parâmetros e dados de distribuição granulométrica estão apresentados na tabela 6.11, sendo a distribuição ilustrada pela figura 6.13.

Tabela 6.11 – Dados da comparação do Caso Base e Simulação 2

	CASO BASE			SIMULAÇÃO 2	
	Alimentação do moinho	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4
d ₈₀ (mm)	29,2	1,15	0,217	1,15	0,234
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3	41,4	7,8
Grau de enchimento (%)	-	33	37	33	25
Potência (kW)	-	560	860	560	681
Potência total (kW)	-	1420		1241	
Tamanho (mm)	% Passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	99,1	100	100	100	100
50,98	94,2	100	100	100	100
25,4	75,3	99,9	100	99,9	100
12,7	61,4	99,0	100	99,0	100
9,5	57,8	98,3	100	98,3	100
6,7	54,1	97,0	100	97,0	100
4,75	50,3	95,2	100	95,2	100
3,35	46,2	93,1	100	93,1	99,9
2,36	42,2	90,5	100	90,5	99,9
1,7	38,9	87,4	99,9	87,4	99,7
1,18	36,0	80,6	99,5	80,6	99,2
0,84	33,9	72,5	98,4	72,5	98,2
0,6	32,0	65,4	96,8	65,4	96,1
0,42	30,1	58,6	93,7	58,6	92,2
0,3	28,0	52,9	87,5	52,9	86,0
0,21	25,4	47,4	77,8	47,4	77,1
0,15	22,5	42,5	69,0	42,5	67,8
0,105	19,0	37,6	60,1	37,6	58,3
0,074	15,3	33,0	51,7	33,0	49,8

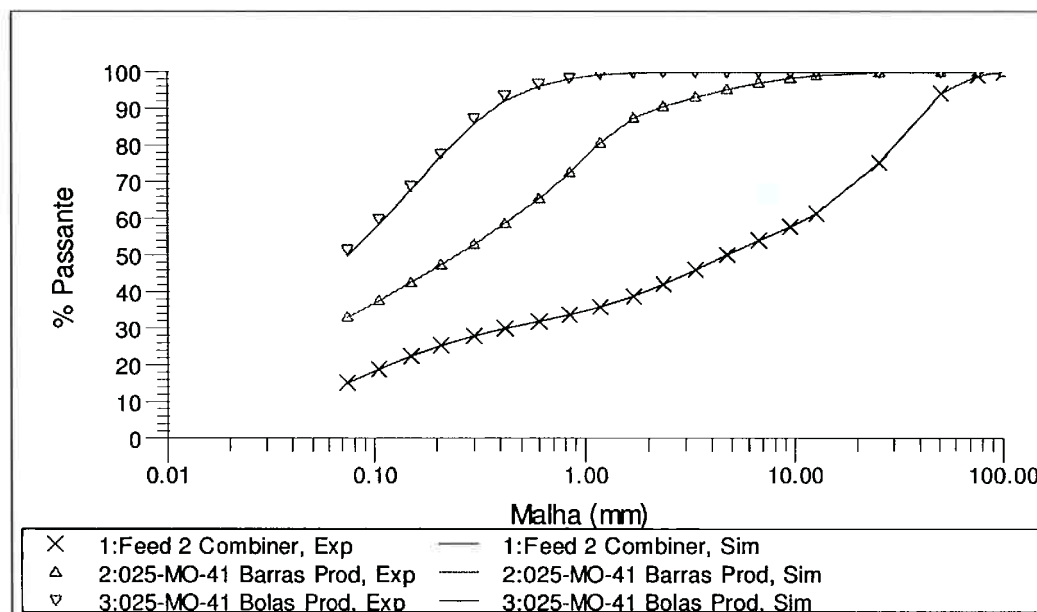


Figura 6.13 – Distribuições granulométricas do Caso Base e Simulação 2

Esta redução do grau de enchimento da câmara de bolas impactou a distribuição granulométrica do produto final da moagem, com o d_{80} passando de 0,217 mm para 0,234 mm. A porcentagem retida em 35# (0,42 mm) ficou acima da especificação exigida pelo processo passando de 6,6% no caso base para 7,8% no cenário simulado. A potência total consumida pelo moinho diminuiu de 1.420 kW para 1.241 kW.

Os comentários são análogos aos da simulação anterior, ou seja, a variação da carga do moinho, seja barras ou bolas, impacta diretamente na especificação do produto final.

6.3.1.3 Simulação 3 – Carga de barras e bolas

A simulação 3 consistiu em diminuir a carga de barras e bolas, reduzindo o grau de enchimento, respectivamente, de 33% e 37% para 25% em ambas as câmaras, mantendo as demais condições.

A figura 6.14 mostra valores simulados para este cenário das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm).

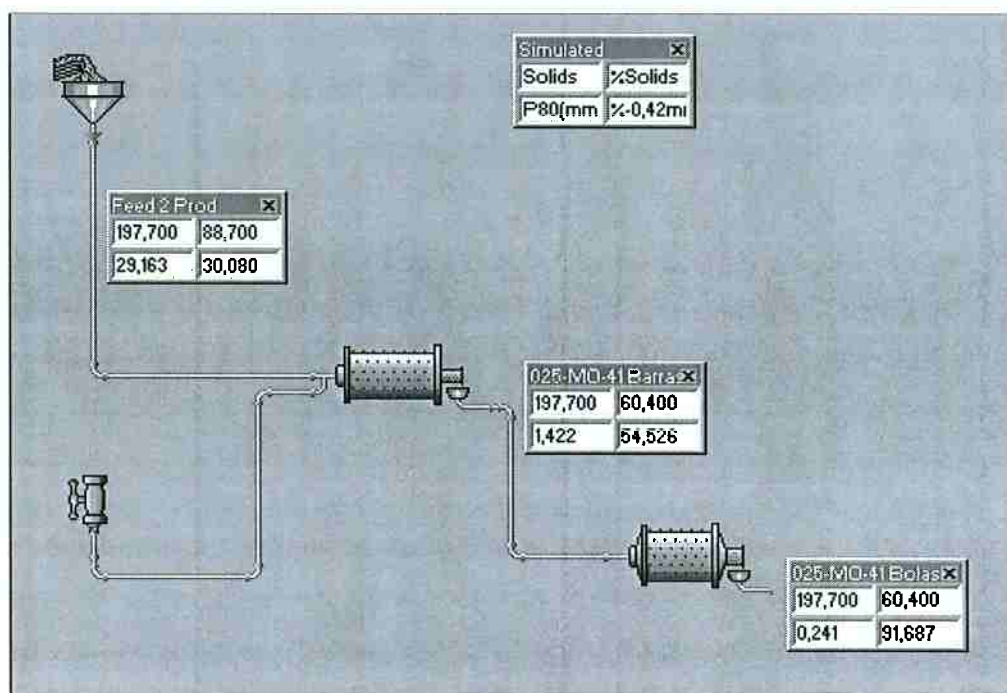


Figura 6.14 – Simulação 3 – redução da carga de barras e bolas

Os parâmetros e dados de distribuição granulométrica do cenário simulado estão apresentados na tabela 6.12, sendo a distribuição ilustrada pela figura 6.15.

Tabela 6.12 – Dados da comparação do Caso base e Simulação 3

	CASO BASE		SIMULAÇÃO 3		AJUSTE		
	Alimentação do moinho	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7	168	168
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4
d ₈₀ (mm)	29,2	1,15	0,217	1,422	0,241	1,153	0,221
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3	45,5	8,3	43,4	6,9
Grau de enchimento (%)	-	33	37	25	25	25	25
Potência (kW)	-	560	860	465	681	465	681
Potência total (kW)	-	1420		1146		1146	
Tamanho (mm)	% Passante acumulada						
101,6	100	100	100	100	100	100	100
76,2	99,1	100	100	100	100	100	100
50,98	94,2	100	100	100	100	100	100
25,4	75,3	99,9	100	99,8	100	99,9	100
12,7	61,4	99,0	100	98,6	100	99,0	100
9,5	57,8	98,3	100	97,6	100	98,3	100
6,7	54,1	97,0	100	95,8	100	96,9	100
4,75	50,3	95,2	100	93,7	100	95,2	100
3,35	46,2	93,1	100	91,0	99,9	93,1	100
2,36	42,2	90,5	100	87,9	99,8	90,5	99,9
1,7	38,9	87,4	99,9	84,2	99,7	87,4	99,8
1,18	36,0	80,6	99,5	75,2	99,0	80,5	99,4
0,84	33,9	72,5	98,4	67,6	97,9	72,4	98,4
0,6	32,0	65,4	96,8	60,8	95,8	65,3	96,6
0,42	30,1	58,6	93,7	54,5	91,7	58,6	93,1
0,3	28,0	52,9	87,5	49,2	85,4	52,9	87,3
0,21	25,4	47,4	77,8	44,0	76,3	47,3	78,6
0,15	22,5	42,5	69,0	39,5	66,8	42,5	69,3
0,105	19,0	37,6	60,1	34,8	57,2	37,6	59,5
0,074	15,3	33,0	51,7	30,5	48,6	33,0	50,8

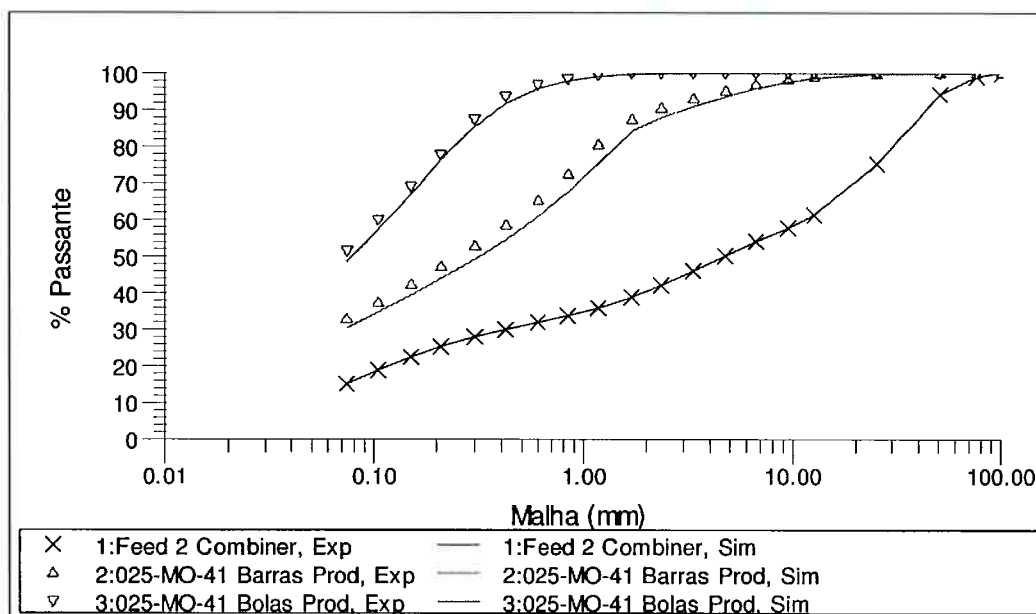


Figura 6.15 – Distribuições granulométricas do Caso Base e Simulação 3

A redução da carga de barras e bolas impactou sensivelmente na distribuição granulométrica do produto final da moagem, com o d_{80} passando de 0,217 mm para 0,241 mm. A porcentagem retida em 35# (0,42 mm) ficou fora da especificação exigida pelo processo passando de 6,6% no caso base para 8,3% no cenário simulado. A potência total consumida pelo moinho passou de 1.420 kW para 1.146 kW.

Esta situação de redução da carga total do moinho é típica da operação de moinhos dupla-câmara, uma vez que a recarga de barras e bolas é realizada ao mesmo tempo. Esta situação deriva da necessidade de recarga simultânea de ambas as câmaras, sendo portanto necessária a parada do circuito. O controle de recarga ligado à variação da potência do moinho é uma prática bastante simples e bem aplicada à este tipo de moinho.

Foi realizada uma nova simulação para ajustar o produto da moagem, de forma a garantir que seja atingida a especificação do processo. Neste cenário de grau de enchimento de 25% para ambas as câmaras, seria necessário reduzir a vazão de sólidos de 197,7 t/h para 168 t/h, visando atingir 7% retido em 35# (0,42 mm), como mostra a última coluna da tabela 6.12.

6.3.1.4 Simulação 4 – Granulometria de alimentação mais grossa

A simulação 4 consistiu em um aumento da granulometria de alimentação da moagem, considerando o pior caso dos dados experimentais obtidos. Considerou-se a granulometria média recebida pelo navio Marcos Dias, consumida pela moagem entre os dias 05 a 12/09/07, mostrada na tabela 6.1. Este navio especificamente, apresentou um carregamento fora das especificações da ALUMAR, fornecendo uma granulometria média acima da especificada, com 52,7% acima de 1".

A figura 6.16 mostra valores simulados para este cenário das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm).

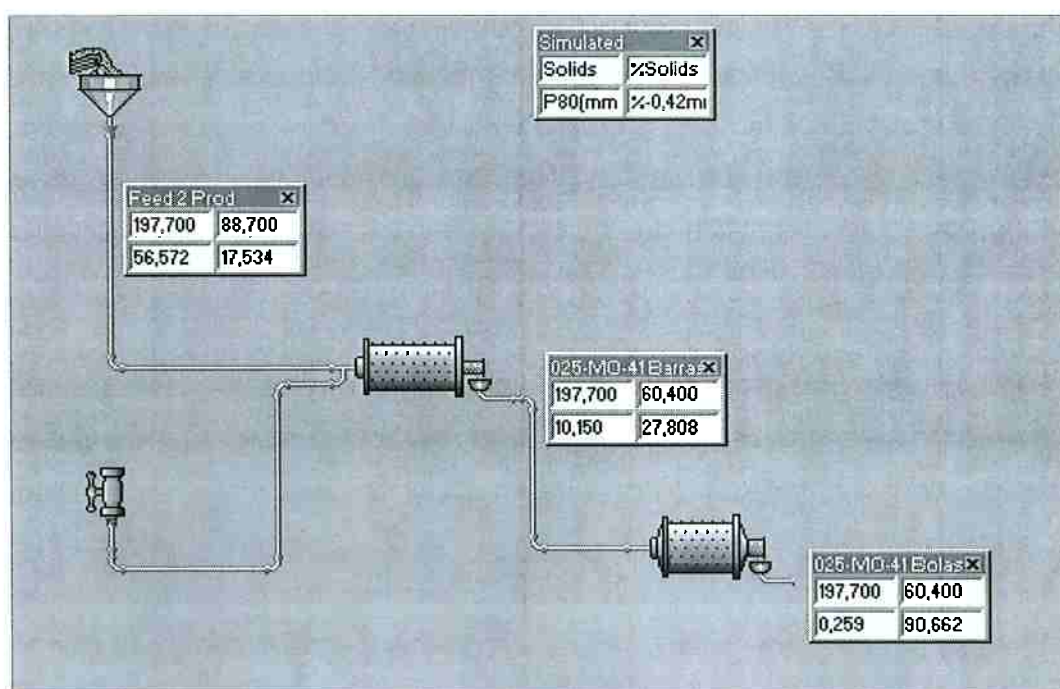


Figura 6.16 – Simulação 4 – Aumento da granulometria de alimentação do moinho

Os parâmetros e dados de distribuição granulométrica do cenário simulado acima estão apresentados na tabela 6.13, sendo a distribuição ilustrada pela figura 6.17.

Tabela 6.13 – Dados da comparação do Caso base e Simulação 4

	CASO BASE		SIMULAÇÃO 4		AJUSTE		
	Alimentação do nova	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7	145	145
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4	60,4
d ₈₀ (mm)	56,57	1,15	0,217	10,15	0,259	4,344	0,225
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3	72,2	9,3	63,6	6,9
Grau de enchimento (%)	-	33	37	33	37	33	37
Potência (kW)	-	560	860	560	860	560	860
Potência total (kW)	-	1420		1420		1420	
Tamanho (mm)		% Passante acumulada					
101,6	100	100	100	100	100	100	100
76,2	91,3	100	100	100,0	100,0	100	100,0
50,98	75,1	100	100	99,4	100,0	99,9	100,0
25,4	47,3	99,9	100	93,7	100,0	98,1	100,0
12,7	36,6	99,0	100	83,7	100,0	93,0	100,0
9,5	34,9	98,3	100	78,9	100,0	89,9	100,0
6,7	33,2	97,0	100	72,9	99,9	85,6	100,0
4,75	31,1	95,2	100	67,2	99,9	80,9	99,9
3,35	28,5	93,1	100	61,6	99,8	76,0	99,9
2,36	25,8	90,5	100	55,9	99,6	70,9	99,8
1,7	23,5	87,4	99,9	48,4	99,2	64,8	99,6
1,18	21,4	80,6	99,5	41,4	98,5	55,4	99,1
0,84	19,8	72,5	98,4	36,0	97,3	48,1	98,2
0,6	18,7	65,4	96,8	31,6	95,0	41,9	96,5
0,42	17,5	58,6	93,7	27,8	90,7	36,4	93,1
0,3	16,5	52,9	87,5	24,9	83,9	32,0	87,3
0,21	15,2	47,4	77,8	22,2	73,9	28,1	78,0
0,15	13,8	42,5	69,0	19,9	63,6	24,9	67,7
0,105	12,1	37,6	60,1	17,7	53,2	21,8	56,9
0,074	10,3	33,0	51,7	15,6	44,3	19,1	47,6

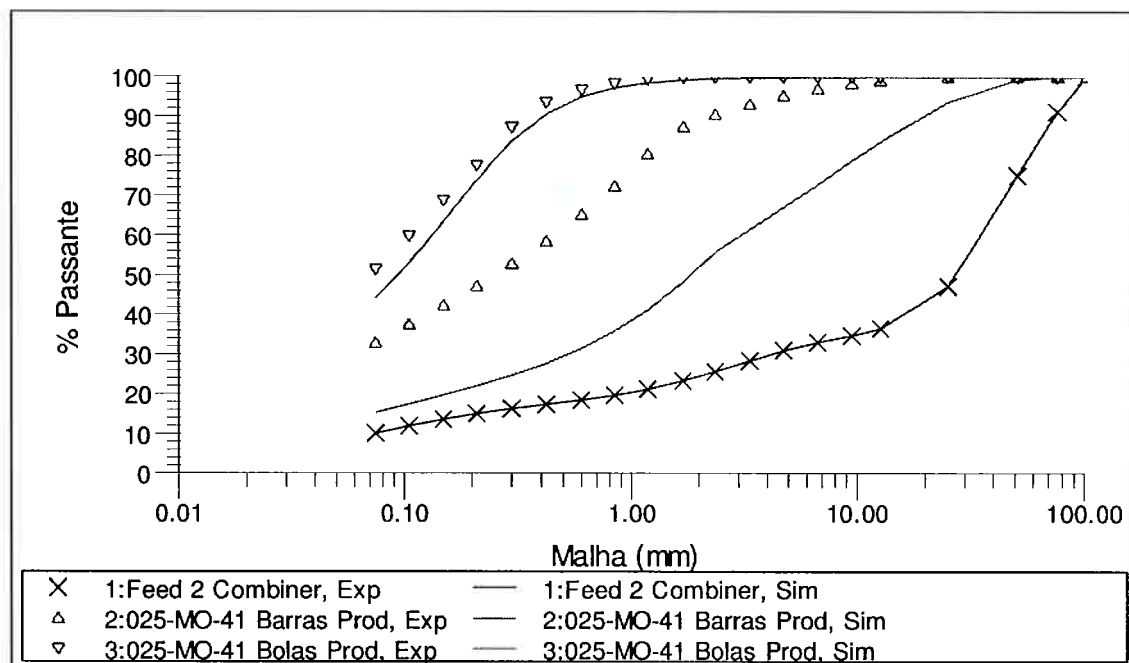


Figura 6.17 – Distribuições granulométricas do Caso Base e Simulação 4

As granulometrias dos produtos de ambas as câmaras ficaram bem mais grossas do que as obtidas para o Caso Base. O d_{80} do produto final da moagem passou de 0,217 mm para 0,259 mm e porcentagem retida em 35# (0,42 mm) apresentou maior valor dentre todas as simulações, passando de 6,6% no caso base para aproximadamente 9,3%.

Esta simulação reflete o que ocorre na prática nas ocasiões em que a ALUMAR recebe bauxita fora de sua especificação de processo. Em termos práticos, essa granulometria acima da especificada para a malha de controle ocasiona em uma perda na extração da alumina na área da digestão (*recovery*).

Foi realizada uma nova simulação para ajustar o produto da moagem à especificação do processo. Para isso, seria necessário reduzir a vazão de sólidos de alimentação do moinho de 197,7 t/h para 145 t/h visando atingir valor máximo de 7% retido em 35# (0,42 mm), como mostra a última coluna da tabela 6.13. Este cenário não poderia se prolongar, uma vez que essa redução de aproximadamente 25% da vazão de alimentação seria insuficiente para manter o nível de produção atual da ALUMAR.

6.3.1.5 Simulação 5 – Granulometria de alimentação mais fina

A simulação 5 consistiu em uma modificação da granulometria da alimentação da moagem considerando uma curva granulométrica do navio Marcos Dias, sendo esta bauxita consumida entre os dias 15/09/07 a 19/09/07 e 25/09/07 a 03/10/07 segundo tabela 6.1. Trate-se da granulometria mais fina registrada dentre todas as consideradas no estudo.

A figura 6.18 mostra valores simulados para este cenário das vazões de sólidos, porcentagens de sólidos, P_{80} e porcentagem passante em 35# (0,42 mm).

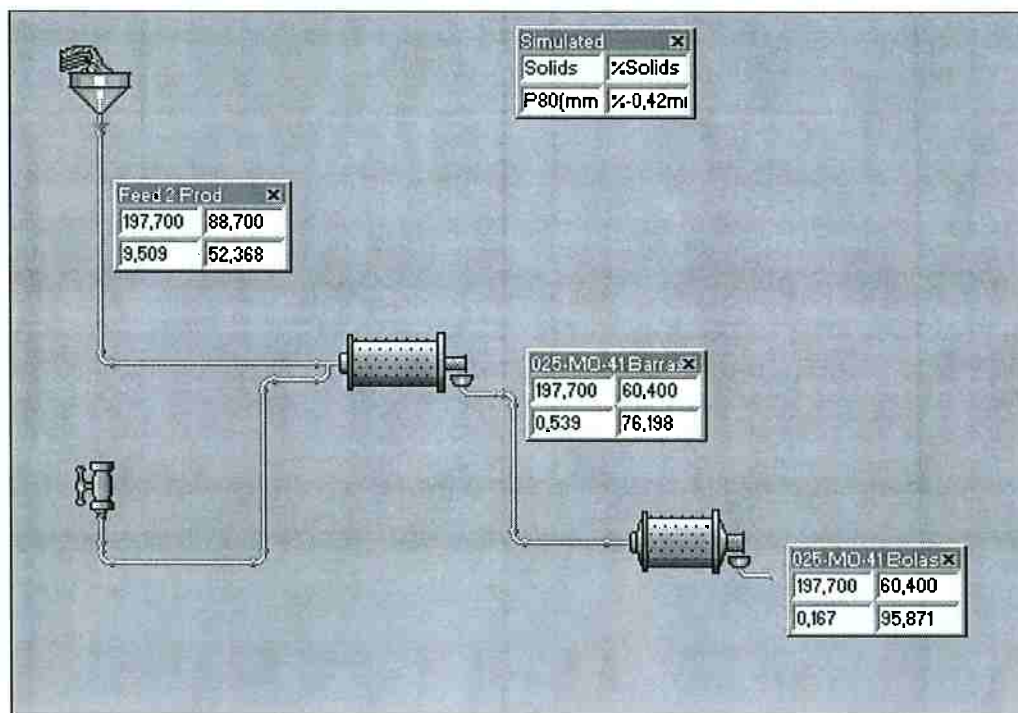


Figura 6.18 – Simulação 5 – Redução da granulometria de alimentação do moinho

Analogamente, os parâmetros e dados de distribuição granulométrica do cenário simulado acima estão apresentados na tabela 6.14, sendo a distribuição ilustrada pela figura 6.19.

Tabela 6.14 – Dados da comparação do Caso base e Simulação 5

	CASO BASE			SIMULAÇÃO 5	
	Alimentação nova	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas	Produto da câmara de barras	Produto da câmara de bolas
Vazão de sólidos (t/h)	197,7	197,7	197,7	197,7	197,7
% de sólidos	88,7	60,4	60,4	60,4	60,4
d ₅₀ (mm)	9,51	1,15	0,217	0,539	0,167
% retida em 35#	69,9	41,4	6,3	23,8	4,1
Grau de enchimento (%)	-	33	37	37	37
Potência (kW)	-	560	860	560	680
Potência total (kW)	-	1420		1420	
Tamanho (mm)	% Passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	98,9	100	100	100	100
50,98	95,3	100	100	100	100
25,4	83,4	99,9	100	100	100
12,7	81,1	99,0	100	99,6	100
9,5	80,0	98,3	100	99,3	100
6,7	78,3	97,0	100	98,8	100
4,75	76,1	95,2	100	98,1	100
3,35	73,5	93,1	100	97,2	100
2,36	70,5	90,5	100	96,1	100
1,7	67,4	87,4	99,9	94,9	99,9
1,18	63,8	80,6	99,5	92,1	99,8
0,84	60,4	72,5	98,4	86,7	99,2
0,6	56,8	65,4	96,8	81,6	98,2
0,42	52,4	58,6	93,7	76,2	95,9
0,3	47,5	52,9	87,5	71,1	91,8
0,21	41,6	47,4	77,8	65,5	85,2
0,15	35,4	42,5	69,0	60,1	77,3
0,105	28,3	37,6	60,1	54,1	68,4
0,074	21,4	33,0	51,7	48,2	59,8

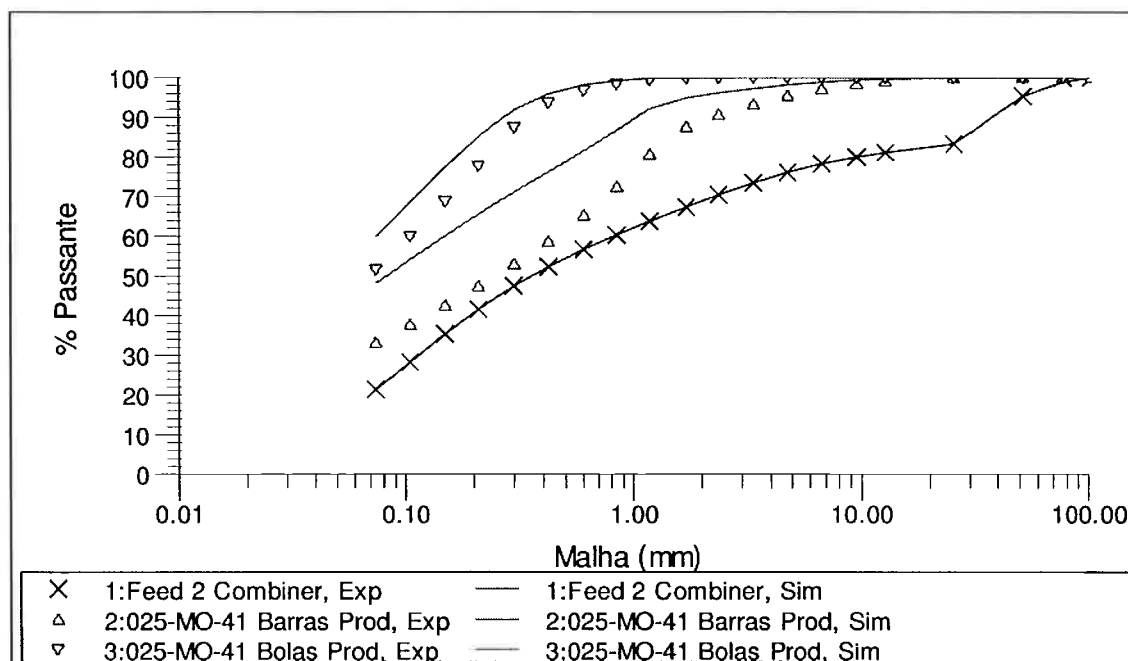


Figura 6.19 – Distribuições granulométricas do Caso Base e Simulação 5

As granulometrias dos produtos das duas câmaras apresentaram-se bem mais finas, sendo que o d_{80} do produto final da moagem passou de 0,217 mm para 0,167 mm. A porcentagem retida em 35# (0,42 mm) ficou dentro da especificação exigida pelo processo passando de 6,6% no caso base para aproximadamente 4% no cenário simulado. Este cenário mostra a possibilidade de haver aumento no *recovery* de alumina em função da granulometria mais fina do produto da moagem, uma vez que a curva granulométrica se apresentou dentro da faixa considerada ótima para o processo.

6.3.2 Novo circuito de moagem da ALUMAR

As características do novo circuito de moagem da ALUMAR foram descritas no tópico 4.3.1 do presente trabalho. Os parâmetros dos modelos desta nova configuração foram obtidos a partir dos modelos desenvolvidos nesse trabalho para a moagem existente.

O Caso Base foi configurado com dois ciclones de 20" na operação de classificação reversa. A capacidade nominal do circuito foi estipulada em 350 t/h de sólidos. As demais condições operacionais fixadas para o Caso Base foram: d_{80} de 0,185 mm no *overflow*, e concentração de sólidos em massa igual a 65,2% no *underflow* da classificação.

A figura 6.20 apresenta o fluxograma do Caso Base, conforme resultante das simulações. Nesta mesma figura é possível verificar as vazões de sólidos, porcentagem de sólidos em massa, d_{80} e porcentagem retida na malha de controle 0,42 mm.

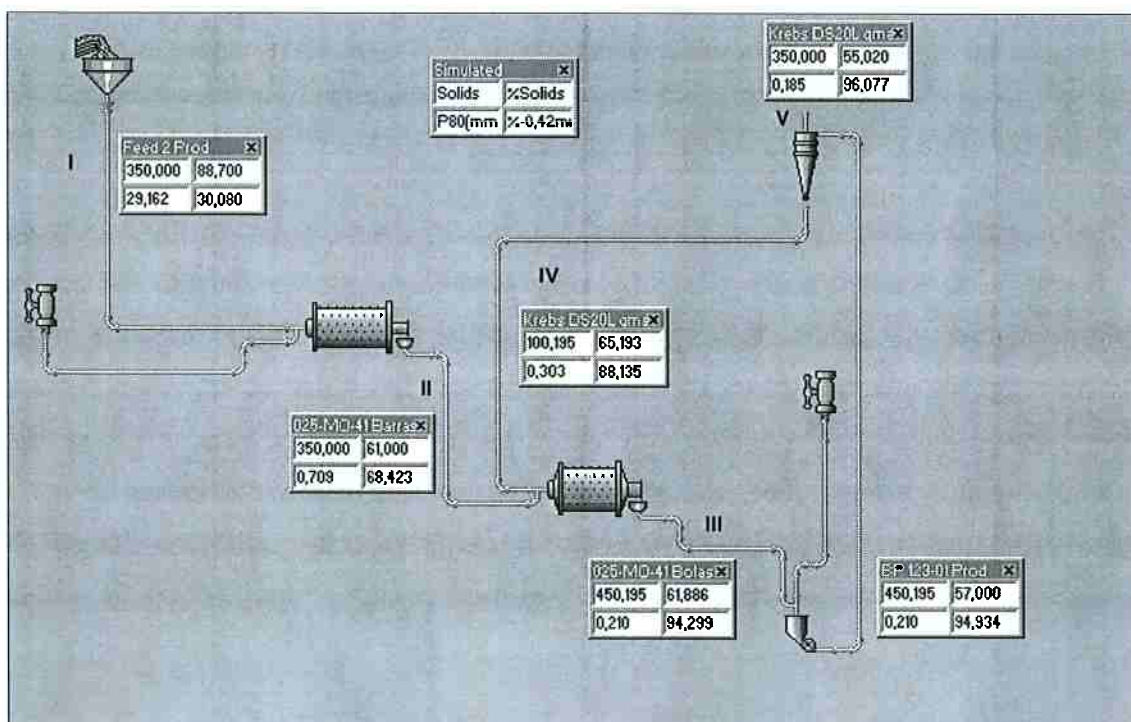


Figura 6.20 – Caso Base do novo circuito de moagem da ALUMAR

De acordo com as simulações o produto do moinho de barras apresentou d_{80} de 0,709 mm. Este valor é significativamente menor do que o verificado para a operação atual. Outro aspecto relevante é que a carga circulante da etapa de moagem do moinho de bolas foi calculada em 28%, ou seja, valor relativamente baixo se comparado a outros circuitos de moagem. Este fato indica uma sobrecapacidade do circuito para o produto especificado. Todos os dados e

distribuições granulométricas apresentados pelos fluxos I a VI da figura 6.20 estão representados na tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Dados e distribuições granulométricas do Caso Base do novo circuito de moagem da ALUMAR

FLUXOS DA SIMULAÇÃO					
	I	II	III	IV	V
Vazão de sólidos (t/h)	350	350	450	100	350
% de sólidos	88,7	61,0	61,9	65,2	55,0
d_{80} (mm)	29,162	0,709	0,210	0,303	0,185
% retido em 35#	69,9	31,6	5,8	11,9	3,9
Grau de enchimento (%)	-	30	30	-	-
Tamanho (mm)	% passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	99,1	100	100	100	100
50,98	94,2	100	100	100	100
25,4	75,3	100	100	100	100
12,7	61,4	99,6	100	100	100
9,5	57,8	99,3	100	100	100
6,7	54,1	98,7	100	100	100
4,75	50,3	97,9	100	100	100
3,35	46,2	96,7	100	99,9	100
2,36	42,2	95,2	100	99,8	100
1,7	38,9	93,5	99,9	99,5	100
1,18	36,0	90,5	99,7	99,0	99,9
0,84	33,9	83,8	99,1	97,3	99,5
0,6	32,0	76,0	97,5	94,0	98,6
0,42	30,1	68,4	94,3	88,1	96,0
0,3	28,0	62,0	88,7	79,69	91,31
0,21	25,4	55,6	80,0	68,7	83,5
0,15	22,5	50,1	70,5	57,73	74,15
0,105	19,0	44,6	60,7	48,14	64,6
0,074	15,3	39,4	52,1	40,25	55,9

Em função dos resultados obtidos na simulação do Caso Base, decidiu-se simular o novo circuito para capacidade máxima estabelecida pelo projeto, qual seja 550 t/h de sólidos. A figura 6.21 apresenta o fluxograma dessa simulação. Nesta mesma figura é possível verificar as vazões de sólidos, porcentagem de sólidos em massa, d_{80} e porcentagem retida na malha de controle 0,42 mm.

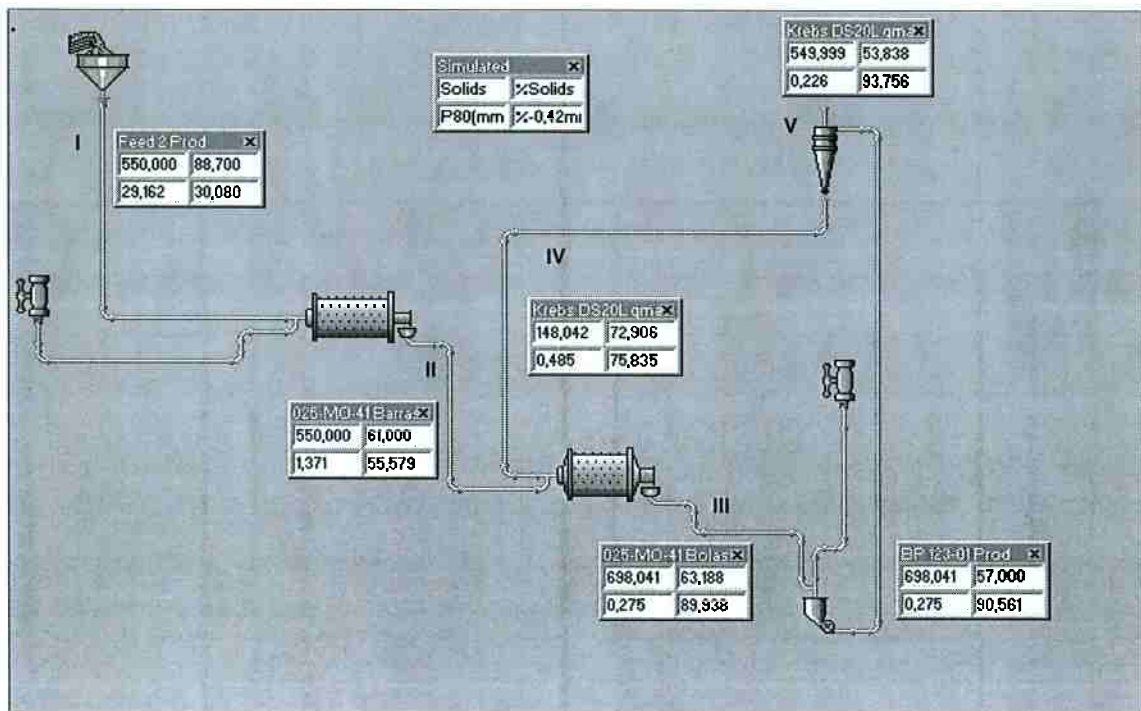


Figura 6.21 – Simulação do novo circuito – aumento de vazão de sólidos (capacidade máxima)

O incremento da vazão de alimentação do circuito mostrou um produto mais grosso do moinho de barras, que assim passou de 0,709 mm no Caso Base para 1,371 mm na presente simulação. Para se atingir o produto final dentro da especificação, a carga circulante passou de 100 t/h para 148 t/h, o que representa 27%, ou seja, valor bastante próximo do Caso Base.

Este cenário de operação sob alimentação máxima indicou elevação da pressão de operação dos ciclones de 81 kPa para 198 kPa. Na prática essa situação resulta em maior vazão e pressão de bombeamento. A bomba de polpa deve, portanto, estar dimensionada para atender a uma condição de operação significativamente maior daquela estipulada para a operação sob condições normais. A tabela 6.16 apresenta os resultados da simulação realizada.

Tabela 6.16 – Resultados das simulações realizadas considerando um aumento na vazão de sólidos na alimentação do circuito

FLUXOS DA SIMULAÇÃO					
	I	II	III	IV	V
Vazão de sólidos (t/h)	550	550	598	148	550
% de sólidos	88,7	61,0	63,2	72,9	53,8
d_{80} (mm)	29,162	1,371	0,275	0,485	0,226
% retido em 35#	69,92	44,41	10,06	24,17	6,24
Grau de enchimento (%)		30	30	-	-
Tamanho (mm)	% passante acumulada				
101,6	100	100	100	100	100
76,2	99,1	100	100	100	100
50,98	94,2	100	100	100	100
25,4	75,3	99,7	100	100	100
12,7	61,4	98,4	100	100	100
9,5	57,8	97,4	100	100	100
6,7	54,1	95,7	100	99,9	100
4,75	50,3	93,6	100	99,8	100
3,35	46,2	91,1	99,9	99,6	100
2,36	42,2	88,2	99,8	99,2	100
1,7	38,9	84,7	99,6	97,0	99,9
1,18	36,0	76,5	98,9	95,9	99,7
0,84	33,9	68,7	97,5	92,0	99,1
0,6	32,0	62,0	95,0	85,6	97,5
0,42	30,1	55,6	89,9	75,8	93,8
0,3	28,0	50,2	82,4	64,0	87,3
0,21	25,4	45,0	72,2	51,3	78,0
0,15	22,5	40,3	62,3	40,6	68,1
0,105	19,0	35,6	52,7	32,0	58,5
0,074	15,3	31,2	44,5	25,8	49,9

6.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (BOND/ROWLAND)

Conforme explicado no tópico 3.4.1 do presente trabalho, Rowland apud Beraldo (1987) propôs que a eficiência energética de moinhos fosse calculada pela razão entre *Work Index* de laboratório (WI) e *Work Index* operacional (WI_o), conforme expressão (46) apresentada anteriormente.

Os valores de WI_o , WI_{oc} e eficiência – ε – associados ao circuito de moagem da ALUMAR são apresentados na tabela 6.17. Para cada compartimento, a eficiência da moagem foi determinada utilizando-se WI do material amostrado na alimentação do circuito, sendo considerados 13,6 kWh/t para a etapa de moagem com barras e 9,94 kWh/t para a etapa de moagem com bolas. Os valores considerados para cálculo do WI_o foram os seguintes:

- Potência consumida na câmara de barras: 568 kW
- Potência consumida na câmara de bolas: 852 kW
- Vazão de alimentação de sólidos: 197,7 t/h
- F_{80} da câmara de barras: 29,163 mm
- P_{80} da câmara de barras: 1,150 mm
- F_{80} da câmara de bolas: 1,150 mm
- P_{80} da câmara de bolas: 0,227 mm

Os fatores de Rowland considerados e os cálculos relativos a estes itens estão apresentados no Apêndice C.

Tabela 6.17 – Valores de WI_o , WI_{oc} e eficiência associados ao circuito de moagem da Alumar

Moinho	Índice	Valor
Barras	WI_o (kWh/t)	12,14
	WI_{oc} (kWh/t)	9,31
	ε (%)	146
Bolas	WI_o (kWh/t)	11,68
	WI_{oc} (kWh/t)	14,98
	ε (%)	66,36

Os valores de eficiência energética calculados de acordo com Rowland indicaram uma eficiência maior para a moagem no compartimento de barras. Embora a eficiência calculada seja maior que 100% para a câmara de barras e menor que este valor para a câmara de bolas, a média foi calculada em 106%, o que indica uma eficiência excelente do circuito em operação, segundo o critério de Rowland.

7 SUMÁRIO E CONCLUSÕES

As campanhas de amostragem conduzidas no circuito existente de moagem da ALUMAR, resultaram em uma base de dados e informações consistentes para calibração de modelos matemáticos do processo estudado. O modelo desenvolvido teve assim por base 60 amostragens realizadas no circuito industrial estudado por um período de dois meses.

O modelo desenvolvido foi empregado para análise de desempenho do circuito atual e indicou ser um recurso bastante útil para estabelecimento de cenários de operação e ajustes para obtenção do produto especificado pelo processo. Um exemplo do potencial de utilização do modelo foi constatado através da variação de desempenho do circuito em função da granulometria de alimentação. Granulometrias mais grossas resultam em produto fora da especificação para a vazão nominal do circuito. Da mesma forma, granulometrias mais finas resultam em produtos mais finos, portanto com potencial para aumento de vazão de alimentação ou aumento na recuperação de Al_2O_3 na bauxita na etapa de digestão.

O mesmo modelo serviu de base para simulação e análise de desempenho da nova linha de moagem da ALUMAR. A possibilidade de amostragem do produto do moinho de barras na nova configuração deverá melhorar a calibração de ambos os modelos de moinhos.

O modelo desenvolvido poderá ser utilizado pela Engenharia de Processos da ALUMAR como recurso para otimização de desempenho do circuito industrial de moagem.

Sob a ótica da abordagem energética de Bond/Rowland o circuito atual da ALUMAR apresenta desempenho considerado excelente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, H. O. **Descrição resumida do processo de produção da Refinaria da ALUMAR. Balanço de Ferro na Refinaria da ALUMAR.** São Luis, 1998.

AUSTIN, L.G.; BRAME, K. 1983. **A comparison of the Bond method for sizing wet tumbling mills with a size-mass balance simulation model.** Powder Technology. v. 34, p. 261-274.

BARBERY, G. **Derivation of a formula to estimate the mass of a sample for size analysis.** Trans AusIMM, 81 (784), March, C49-C-51, 1972.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares.** Pró-Minério; Secretaria de Estado da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1987.

BOURGEOIS, f.; KING, R.P.; HERBST, J.A. 1992. **Low-impact energy simple-particle fracture.** In: Comminution – Theory and Practice. KAWASTRA, S.K., Ed., Chap.8, SME, Littleton, p. 99-108.

CALLCOTT, T.J.; LYNCH, A. J. **An analysis of breakage processes within rod mills.** Proc AusIMM, 209, 109-131, 1964.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem.** V.3. São Paulo: Signus, 1999.

CHIEREGATI, A.C. **Novo Método de Caracterização Tecnológica para Cominuição de Minérios.** São Paulo, 2001.148p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

DA LUZ, Adão B.; SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador L. M. **TRATAMENTO DE MINÉRIOS**, 4ª edição revisada, Rio de Janeiro, 2004.

DAMASCENO, E.C. Disponibilidade, suprimentos e demanda de minérios para metalurgia. **Série Estudos e Documentos** n69, p.39, CETEM-MCT. Rio de Janeiro, 2006.

DELBONI JR, H. et al. **Optimization of the Sossego SAG Mill**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOGENOUS AND SEMI AUTOGENOUS GRINDING TECHNOLOGY, 4., 2006, Vancouver. São Paulo: ALCOA, 2007. 1 CD-ROM.

DELBONI JUNIOR, H. **Modelagem de Operação de Moinhos de Bolas**. Apostila, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GIROLAMO, D. **Considerações sobre a utilização de modelos matemáticos para operação de moagem**. São Paulo, 1997. 81p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

GONDIM, D.F. **Amostragem**. Apostila, Engendrar Equipamentos de amostragem, Campinas, 2007.

GRIGORIEFF, A. **Desenvolvimento de um novo protocolo de amostragem de carvão mineral**. Porto Alegre, 2002. 177p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GY, P.M. **Sampling of particulate materials – general theory**. Symposium of Sampling Practices in the Min. Ind., Melbourne, Sept, 17-34 (AUSIMM), 1976

GRECO, F. F., R. W. Salnick. **Rod Mill Grinding of Bauxite**. Progress Report n8 02W02701, 01 de fevereiro de 1974.

HERBST, J.A.; FUERSTENEU, D.W. 1980. **Scale-up procedure for continuous grinding mill design using population balance models.** International Journal of Mineral Processing, v.7, p. 1-31.

HOFFLER, J.A.; HERBST, J.A. 1990. **Ball mill modeling through microscale fragmentation studies: fully monitors particle bed comminution versus single impact testes.** In: EURO SYMPOSIUM ON COMMINUTION, 7., Ljubjana, Yugoslávia, Proceedings. P.381-397.

HUDSON, L. K; **Alumina Production.**, United States, 1982. Alcoa Research Laboratories.

LAGUITTON, D./ FLAMENT, F. **Documented Fortran program for ball-mill modeling.** CIM Bulletin, V77, n 870, p. 71-7, Oct. 1984.

LOPES, R. F.; BRANQUINHO, J.A. IN:Brasil. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Principais Depósitos Minerais do Brasil.** Brasília, 1988. v.3, cap. 47, p. 955-659.

MINERAL COMODITY SUMMARIES. Reston: U.S. Geological Survey, 2007-.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral cominution circuits.** Their Operation ans Optimisation, Julius Kruttchintt Mineral Research Centre / University of Queensland, 1999 (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing).

NASCHENVENG, A.C. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Ultrafértil.** São Paulo, 2003.101p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

OLIVEIRA, M. L. M. **Amostragem e balanço de massa**. São Luis, Consórcio de Alumínio do Maranhão – ALUMAR, 2007. Palestra proferida em treinamento da Equipe de Processo da Refinaria da ALUMAR pela empresa MCE Consultoria e Engenharia.

ROWLAND, Jr., C. A. **Testing for the selection of comminution circuits to prepare concentration feed. Mill's Operator Conference**. The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 1982.

TAVARES, L.M.M e LIMA, A.S. **Célula de carga de impacto na caracterização de materiais para cominuição**. Parte 1: Calibração. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p. 61-69, 2006

VIEIRA, M. Relatório de estágio integrado. **Balanço de Ferro na Refinaria da ALUMAR**. Trabalho apresentado a Universidade Federal de Campina Grande, p.110, 2005.

WHITEN, W.J. **Ball mill simulation using small calculators**. Proceedings, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, n.258, p. 47-51, June 1976.

APÊNDICE A – Lista de moinhos que operam em circuitos de cominuição de bauxita

UNIDADE	PAÍS	Qtde.	DIMENSÃO (DIÂMETRO x EGL.) & MODELO	Pot. (HP)
Queensland Aluminum Ltd.	Austrália	3	9' x 38' RodPeb®	1500
Queensland Aluminum Ltd.	Austrália	1	11' x 37' RodPeb®	2250
Kwinana, Australia	Austrália	3	8' x 13' Overflow Rod	350
Kwinana, Australia	Austrália	6	10' x 13' Overflow Rod	650
Queensland Aluminum Ltd.	Austrália	6	9' x 38' RodPeb®	1500
Pinjara, Australia	Austrália	3	24' x 12' Rockcyl	2875
Pinjara, Australia	Austrália	3	22' x 8' - ICAL	1400
Wagerup, Australia	Austrália	3	26' x 12' Rockcyl	3500
Worsley Alumina Project	Austrália	3	14' x 20.5' Overflow Rod	2000
Alcan Alumínio do Brasil	Brasil	1	9' x 14' Overflow Rod	450
Alunorte	Brasil	2	12.5' x 18' Overflow Rod	1340
Alunorte	Brasil	5	11' x 39' RodPeb®	2000
Paragominas	Brasil	2	26' x 14' Rockcyl	6300
Paragominas	Brasil	2	21' x 34' Ball mill	9600
ALUMAR	Brasil	2	11' x 39' RodPeb®	2000
ALUMAR – 2008/2009	Brasil	2	15' x 20.5' Rod Mill	3000
ALUMAR – 2008/2009	Brasil	2	15' x 20.5' Ball Mill	3000
Alcan Aluminum Company of Canada	Canadá	4	12' x 47.5' RodPeb®	3000
	Canadá	2	10' x 4' Conical Ball	300
American Minerals	Estados Unidos	1	10' x 5'-6" Conical Ball	350
Reynolds Metals	Estados Unidos	4	6' x 10' Rod	200
Alcoa - Point Confort	Estados Unidos	1	10' x 13' Overflow Rod	600
Carborundum Co.	Estados Unidos	1	8' x 5' Conical Ball	200
C. E. Minerpcs	Estados Unidos	1	10' x 8' Conical Ball	500
Carbo Ceramics	Estados Unidos	1	10' x 7' Conical Ball	500
Alcoa - Point Confort	Estados Unidos	2	10' x 13' Rod Mill	600
Norton Company Aluminum DeGrece, Pechiney	Estados Unidos	1	10' x 6' Conical Ball	400
Aluminum De Grece St. Nicholas Plant	Grécia	2	12' x 20' Ball Mill	1500
	Grécia	1	10.5' x 18' Overflow Rod	940

APÊNDICE A (CONCLUSÃO) – Lista de moinhos que operam em circuitos de cominuição de bauxita

UNIDADE	PAÍS	Qtde.	DIMENSÃO (DIÂMETRO x EGL.) & MODELO	Pot. (HP)
Martin Marietta	Ilhas Virgens	6	9' x 5' Conical Ball	300
Alumina Contractors, Ltd.	Irlanda	3	11' x 44' RodPeb®	2700
Aughinish Alumina	Irlanda	1	11' x 44' RodPeb®	2700
Mitsui Aluminum	Japão	1	8' x 25' Compeb	1000
Nihon Light Metal	Japão	2	8' x 35' Compeb	1000
Nihon Light Metal	Japão	2	10' x 16' Ball	800
Nihon Light Metal	Japão	1	8.5' x 11.5' Overflow Ball	450
Sumitomo Chemical	Japão	1	9' x 14' Overflow Rod	500
Alumina Partners	Jamaica	1	10' x 16' Overflow Rod	800
Alcan	Jamaica	4	8' x 6' Conical Ball	150
Alcoa	Jamaica	3	10' x 7' Conical Ball	250
Alumina Partners	Jamaica	1	10.5' x 16.6' Rod Mill	900
Kaiser / Alpart	Jamaica	1	12' x 20' Ball Mill	1500
Alcoa - SURALCO	Suriname	2	14' x 46.4' RodPeb®	4290
Interalumina	Venezuela	4	10' x 29'-6" Overflow Ball	1500

APÊNDICE B – Cálculo do valor de T_{80}

Cálculo de T_{80} para moinho de barras:

$$W = 10 WI_{barras} \left(\frac{1}{\sqrt{T_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \text{ e } W = \text{Pot} / T$$

$$\frac{641}{197,7} = 10.13,6 \left(\frac{1}{\sqrt{T_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{29200}} \right)$$

$T_{80} = 1134 \text{ mm}$
--

Cálculo de T_{80} para moinho de bolas:

$$W = 10 WI_{bolas} \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{T_{80}}} \right) \text{ e } W = \text{Pot} / T$$

$$\frac{940}{197,7} = 10.13,6 \left(\frac{1}{\sqrt{227}} - \frac{1}{\sqrt{T_{80}}} \right)$$

$T_{80} = 1013 \text{ mm}$
--

Foi considerado o mínimo da função entre estas duas variáveis, obtendo-se um valor de **1150 mm**.

APÊNDICE C – Cálculo de eficiência de moagem do compartimento de barras e bolas

Dados necessários para os cálculos	Valor	Unidade
Taxa média de moagem	223	t/h
Diâmetro efetivo do moinho – (entre revestimentos)	3225	mm
Comprimento efetivo do compartimento de barras	4870	mm
WI laboratório	13,6	KWh/t
F80	29163	µm
P80	1150	µm
Relação de redução (Rr)	15,51	-
Vazão de sólidos	226	t/h
Potência da câmara de barras	663	kW

Cálculo do WI_o :

$$WI_o = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F}}\right)} = \frac{2,87}{\left(\frac{10}{\sqrt{1150}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{29163}}\right)} = 12,14 \text{ kWh / t}$$

Fatores de correção	Resultado
EF ₁	1,00
EF ₂	1,00
EF ₃	0,95
EF ₄	1,37
EF ₅	1,00
EF ₆	1,00
EF ₇	1,00
EF ₈	1,00
EF_{total}	1,3015

Resultado dos fatores de correção

$$WI_{oc} = \frac{WI_o}{EF_i} = \frac{12,14}{1,305} = 9,31 \text{ kWh / t}$$

Cálculo do WI_{oc} :

Eficiência energética:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{WI}{WI_{oc}} = \frac{13,6}{9,31} = 146 \%$$

APÊNDICE C (CONCLUSÃO) – Cálculo de eficiência de moagem do compartimento de barras e bolas

Dados necessários para os cálculos	Valor	Unidade
Taxa média de moagem	223	t/h
Diâmetro efetivo do moinho – (entre revestimentos)	3225	mm
Comprimento efetivo do compartimento de barras	6300	mm
WI laboratório	9,94	KWh/t
F80	1150	µm
P80	227	µm
Relação de redução (Rr)	8,29	-
Vazão de sólidos	226	t/h
Potência da câmara de bolas	844	kW

Cálculo do WI_o :

$$WI_o = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{F}}\right)} = \frac{4,31}{\left(\frac{10}{\sqrt{227}}\right) - \left(\frac{10}{\sqrt{1150}}\right)} = 11,68 \text{ kWh / t}$$

Resultado dos fatores de correção

Fatores de correção	Resultado
EF ₁	1,00
EF ₂	1,40
EF ₃	0,95
EF ₄	0,59
EF ₅	1,00
EF ₆	1,00
EF ₇	1,00
EF ₈	1,00
EF_{total}	1,3015

Cálculo do WI_{oc} :

$$WI_{oc} = \frac{WI_o}{EF_i} = \frac{11,68}{0,78} = 14,98 \text{ kWh / t}$$

Eficiência energética:

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{WI}{WI_{oc}} = \frac{9,94}{14,98} = 66,36\%$$

ANEXO A – Tabela de Richards: massa da amostra para diferentes granulometrias (Kg)

Diâmetro da maior partícula	Caracterização do Minério					
	Muito Pobre ou Muito Uniforme	Pobre ou uniforme	Médios	Rico ou Spotty	Muito Rico ou Exclusivamente Spotty	Ouro
8"	9600	32000	-	-	-	-
5"	3800	12500	-	-	-	-
4"	2400	8000	40000	-	-	-
2"	600	2000	10000	26000	-	5000
1 ½"	350	1150	5000	14000	-	2500
1"	150	500	2500	6500	-	1000
¾"	85	300	1400	3600	-	500
½"	35	125	600	1600	-	200
¼"	10	30	150	400	14000	100
6 M	2,5	8,5	43	110	3800	38
10 M	0,5	2,0	11	30	900	-
14 M	0,4	1,0	5	14	500	13
20 M	0,2	0,5	3	7	250	5
28 M	0,08	0,3	1,5	3,5	120	2
35 M	0,04	0,2	0,7	1,7	60	0,5
48 M	0,02	0,1	0,3	0,9	30	-

65 M	0,01	0,03	0,2	0,4	15	-
100 M	0,005	0,02	0,1	0,2	7,5	-
150 M	0,003	0,01	0,05	0,1	4	-
200 M	0,002	0,005	0,02	0,05	-	-

Extraída de Luz, Samapio, Almeida (2004)

onde,

Spotty = grande concentração do mineral em pontos preferenciais do minério;

Muito pobre, pobre, Rico ou Muito Rico = relativo ao teor do elemento ou do composto do minério;

Muito Uniforme e Uniforme = relativo à forma de concentração do mineral do minério.

ANEXO B – Procedimento de amostragem da ALUMAR na área de moagem

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB – IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

OBJETIVO

Estabelecer procedimento com as técnicas adequadas a coleta das amostras de rotina da área 025 (moagem), analisadas pelo laboratório.

ABRANGÊNCIA

Este método se aplica às coletas de amostras de bauxita para moinhos, pasta de bauxita da descarga dos moinhos 41 e 51 e a pasta do 25A da área 25X.

RECURSOS NECESSÁRIOS

Frasco inox com tampa, de aproximadamente 1000ml;

Frasco inox com tampa, de aproximadamente 5000ml;

Bandeja para transporte de amostra;

Pá coletora de amostra;

Rádio de comunicação;

Batedor;

Balde plástico;

Mesa (para quarteamento);

Cruzeta (para quarteamento).

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Laboratório

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

ASPECTOS GERAIS DE EHS

EPI's de uso geral:

Capacete equipado com jugular e protetor facial, óculos ampla visão, camisa manga comprida, calça jeans e bota de segurança.

EPI's de uso específico:

Luva de PVC e protetor auricular.

Atenção:

- **Antes de realizar qualquer etapa deste procedimento na área, localizar e testar os chuveiros lava olhos.**
- **Obedecer os limites de velocidades na fábrica e seguir os princípios da direção defensiva.**
- **Usar camisa manga comprida por dentro da calça, quando estiver executando qualquer operação nas áreas.**

- ***A presença de condições inseguras deve ser analisadas antes da coleta. Situações como: vazamentos, área isolada, má visibilidade devem ser reportados para a área e para o laboratório antes da coleta.***

NORMAS E PROCEDIMENTOS CORRELACIONADOS

Procedimento nº 4002658 – Manuseio de válvula de amostragem

Procedimento nº 4003254 – Etiquetamento e bloqueio

Geral - 1 / Operacional

**ALUMAR
Refinaria**

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.: 4002321/00	Autor: Jorge Araujo	Nova Rev.:
Aprovação: 01/Nov/2001	Aprovador: Julio Costa	Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB – IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆		

DETALHAMENTO

1. PRINCÍPIO

Para determinar um componente qualquer de uma substância em laboratório é indispensável coletar uma parte representativa para análise. Esta operação é de extrema importância, pois é dela que depende a correspondência entre o resultado da análise e a composição real da substância. Se amostragem não tiver sido feita corretamente o resultado deixa de ter significado.

A técnica de amostragem pode variar de um caso para outro. Existem instruções específicas para realizar esta operação em cada tipo de substância a analisar.

2. DEFINIÇÃO

- **Amostra**

É uma porção representativa de um material que se quer estudar.

- **Dreno**

É um ponto para amostragem, feito de tubulação com válvulas para regulagem do fluxo de amostra.

- **Drenar**

É o ato de deixar o dreno aberto passando amostra para descartar a parte não representativa que fica acumulada na tubulação.

- **Ambientar**

É o ato de lavar o frasco de coleta com a própria amostra a ser coletada.

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VALIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSAO NÃO OFICIAL ◆					

3. AMOSTRAGEM DE BAUXITA PARA MOINHOS – 41 / 51

Atenção:

- *Usar protetor auricular*
- *Usar luvas de PVC cano longo*

- 3.1. Dirigir-se ao ponto de amostragem, (Correia transportadora moinho 025-TP-41) ou Correia transportadora moinho 025-TP-51);

Riscos de Segurança:

- *Queda ao subir/descer rampas e escadas.*

Medidas Previsionistas:

- *Deixar uma mão livre para apoiar no corrimão e não usar a escada que estiver com excesso de pedras no piso.*

3.2. Chamar o operador da sala de controle do 025X; A coleta somente poderá ser realizada com a presença do mesmo. O operador deverá acompanhar a coleta do início ao final, isto é, deverá estar nos moinhos durante a coleta para desligar e religar as correias;

3.3. Solicitar a parada da correia transportadora;

Atenção:

- *O Operador só deverá fazer a coleta com a correia totalmente parada.*

3.4. Acionar a bandeirola de segurança puxando o fio que corre junto à correia, e usando um cadeado, fazer o bloqueio da mesma;

Geral - 1 / Operacional

**ALUMAR
Refinaria**

Laboratório

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

Atenção:

- *Etiquetar o bloqueio com as etiquetas branca e amarela.*



3.5. Descartar na correia, a bauxita do turno anterior contida no balde somente com a correia PARADA;



Geral - 1 / Operacional

**ALUMAR
Refinaria**

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.: 4002321/00	Autor: Jorge Araujo	Nova Rev.: Nov/2002
Aprovação: 01/Nov/2001	Aprovador: Julio Costa	
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆		

3.6. Selecionar uma seção da correia que esteja nem muito cheia nem muito vazia;



- 3.7. Coletar a seção transversal inteira, correspondente ao tamanho da pá de amostragem.
Ajudar a coleta com a pá menor, limpando bem a seção coletada;



Qualidade:

- *É necessário coletar toda a seção, sem desprezar a granulometria menor e/ou maior, para garantir uma boa representatividade da amostra.*

Geral - 1 / Operacional

**ALUMAR
Refinaria**

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa	Nova Rev.:	Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

- 3.8. Colocar toda a bauxita coletada no balde grande;



Atenção:

- *Ao termino da coleta não esquecer de retirar a pá de amostragem da correia e rearmar a bandeirola de segurança.*

3.9. Transferir a bauxita para a mesa de quarteamento;



Geral - 1 / Operacional

**ALUMAR
Refinaria**

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

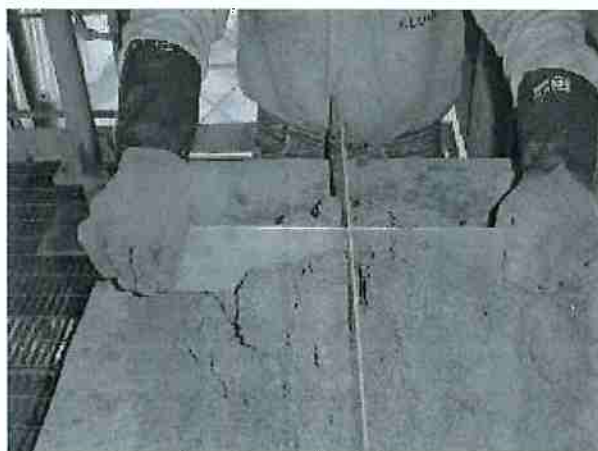
Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa	Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆				

3.10. Homogeneizar a bauxita com a pá pequena, formando um cone;



3.11. Quartear com a cruzeta;



Geral - 1 / Operacional

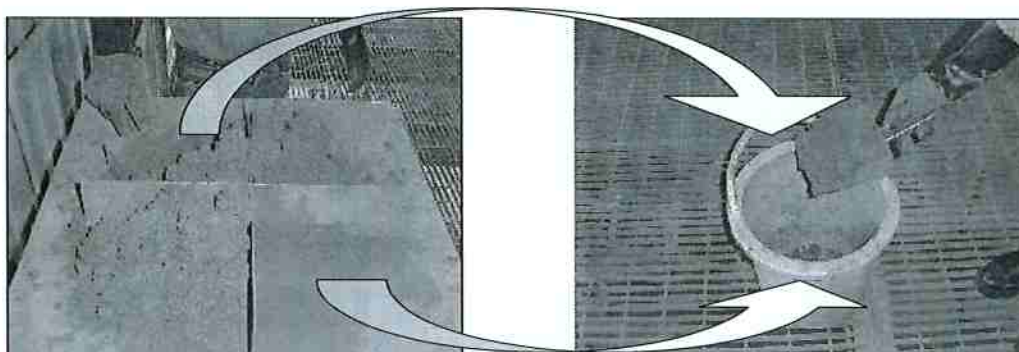
**ALUMAR
Refinaria**

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

3.12. Retornar 2 quartos opostos para o balde grande;



3.13. Homogeneizar as duas partes restantes, repetindo os itens 3.9, 3.10 e 3.11. Os dois quartos restantes, colocar no balde que vai para o Laboratório;

3.14. Prender o balde grande, a pá grande e a cruzeta usando a corrente com cadeado.

Riscos de Segurança:

- *Queda da corrente ou cadeado no piso inferior.*

Medidas Preventivas:

- *Manusear estes dispositivos sobre o piso chapeado, evitando o piso com grade.*

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.: 4002321/00	Autor: Jorge Araujo	Nova Rev.: Nov/2002
Aprovação: 01/Nov/2001	Aprovador: Julio Costa	
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆		

3.15. Limpar a bauxita que porventura caia sobre o piso e mesa;



Riscos de Segurança:

- *Queda de bauxita no piso inferior.*

Medidas Preventivas:

- **Manusear a bauxita sobre o piso chapeado.**

3.16. Dirigir-se ao outro moinho, levando o balde do laboratório contendo a bauxita do primeiro moinho.

Riscos de Segurança:

- **Queda ao subir/descer rampas e escadas.**

Medidas Previsionistas:

- **Deixar uma mão livre para apoiar no corrimão e não usar a escada que estiver com excesso de pedras no piso.**

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Laboratório

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

3.17. Coletar a bauxita no outro moinho, repetindo os itens 3.4 a 3.12, colocando no mesmo balde que vai para o laboratório;

4. AMOSTRAGENS DAS DESCARGAS DOS MOINHOS – 41 / 51

Atenção:

- **Usar protetor auricular.**

4.1. Dirigir-se ao ponto de coleta, descarga do moinho na sucção das bombas (Moinho 41



Descarga de moinhos



Ponto de amostragem

- 4.2. Abrir o dreno de amostragem, conforme procedimento Nº 4002658;
- 4.3. Deixar drenar por aproximadamente 30 segundo;
- 4.4. Ambientar o frasco de amostragem;

Geral - 1 / Operacional

ALUMAR
Refinaria

Laboratório

Amostragens na área 025-Moagem - Refinaria

Doc. Rev.:	4002321/00	Autor:	Jorge Araujo	Nova Rev.:	
Aprovação:	01/Nov/2001	Aprovador:	Julio Costa		Nov/2002
◆ VÁLIDO SOMENTE NA WEB - IMPRESSÃO NÃO OFICIAL ◆					

Riscos de Segurança:

- *Queimadura química ao ser atingido por licor.*
- *Lesões na coluna, devido a postura inadequada.*

Medidas Preventivas:

- *Posicionar-se no sentido contrario ao fluxo de amostra;
Usar luva de PVC e os EPI's gerais adequadamente.*
- *Coletar amostra em dreno localizado próximo ao piso com as pernas flexionadas.*

- 4.5. Após o ambiente, coletar aproximadamente um terço do volume do frasco;

Riscos de Segurança:

- *Queimadura química ao ser atingido por licor/pasta.*
- *Lesões na coluna, devido a postura inadequada.*

Medidas Preventivas:

- *Posicionar-se no sentido contrario a direção do fluxo de amostra;
Usar luva PVC e os EPI's gerais adequadamente.*
- *Coletar amostra em dreno localizado próximo ao piso com as pernas flexionadas.*

4.6. Fechar o dreno de amostragem, conforme procedimento N° 4002658;

4.7. Transportar as amostras para o laboratório

Riscos ao Meio Ambiente:

- *Derramar amostra fora da área muretada*
- *Medidas Preventivas: Usar sempre frasco com tampa e bandeja para transportar as amostras.*

ANEXO C – Resultados do testes de WI de barras e bolas do material amostrado

DROP WEIGHT TEST REPORT

on

Bauxite BX 01

from

Consórcio Alumar

tested at

HDA Servicos S/C Ltda., Sao Paulo, Brazil

for

Consórcio Alumar

JKTech - JKMRC Commercial Division

ANEXO C (CONTINUAÇÃO) – Resultados do testes de WI de barras e bolas do material amostrado

TESTES COM MOINHO DE BARRAS

Distribuições Granulométricas

Amostra: **Bauxita - Alumar**
Data: **05.Setembro.2000**

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
19,05	99,99	
9,53	64,00	
6,35	53,50	
4,76	27,10	
3,36	22,00	
2,38	18,80	
1,68	16,30	100,00
1,19	14,10	78,80
0,840	12,50	64,10
0,590	11,20	54,00
0,420	9,50	44,10
0,297	8,50	38,70
0,210	7,40	33,20
0,150	5,80	26,40
0,105	4,40	20,30
0,074	3,00	14,40
0,000	0,00	0,00
p80 (mm)	11,00	1,20

Calculo do Valor do WI - Moinho de Barras

Amostra: **Bauxita - Alumar**
 Data: **05.Setembro.2000**

$$WI = \frac{62}{P_1^{0,23} + G_{bp}^{0,625} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)}$$

Abertura da Malha do Teste (P1):	1680	micrômetros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	10997	micrômetros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	1199	micrômetros
Media dos Últimos Dois Valores de gramas por revolução (Gbp):	11,913	g / revol

WI =	12,34	kWh/st
	13,60	kWh/t

ANEXO C (CONCLUSÃO) – Resultados do testes de WI de barras e bolas do material amostrado

TESTES COM MOINHO DE BOLAS

Distribuições Granulométricas

Amostra: **Bauxita - Alumar**

Data: **21.Agosto.2000**

Malha (mm)	% passante acumulada	
	Alimentação do Teste	Passante na Malha Teste do Último Período
2,38	90,05	
1,68	76,68	
1,19	65,91	
0,84	56,97	
0,59	50,03	
0,42	42,75	
0,297	34,48	
0,210	23,90	
0,149	17,21	100,00
0,105	14,05	63,66
0,074	8,25	48,38
0,053	3,42	18,39
0,000	0,00	0,00
p80 (mm)	1,812	0,113

Calculo do Valor do WI - Moinho de Bolas

Amostra: **Bauxita - Alumar**
Data: **21.Agosto.2000**

$$WI = \frac{44,5}{P_1^{0,29} * G_p^{0,82} * \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)}$$

Abertura da Malha do Teste (P1):	150	micrômetros
P ₈₀ da Alimentação do Teste (F):	1812	micrômetros
P ₈₀ da Fração Passante na Malha Teste no Último Período (P):	113	micrômetros
Media dos Últimos Dois Valores de gramas por revolução (Gbp):	2,628	g / revol

$$WI = \begin{matrix} 9,02 & \text{kWh/st} \\ 9,94 & \text{kWh/t} \end{matrix}$$