JAIME HENRIQUE BARBOSA DA COSTA

MODELAGEM MATEMÁTICA DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM DA BAUXITA DE PARAGOMINAS – PA

São Paulo
2010

JAIME HENRIQUE BARBOSA DA COSTA

MODELAGEM MATEMÁTICA DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM DA BAUXITA DE PARAGOMINAS – PA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia

São Paulo
2010

JAIME HENRIQUE BARBOSA DA COSTA

MODELAGEM MATEMÁTICA DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM DA BAUXITA DE PARAGOMINAS – PA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Prof. Dr. Homero Delboni Júnior

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Costa, Jaime Henrique Barbosa da
Modelagem matemática da operação de escrubagem da bauxita de Paragominas-PA / J.H.B. da Costa. -- São Paulo, 2010.
135 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Processamento de minerais metálicos (Modelagem matemática) 2. Bauxita – Paragominas (PA) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

DEDICATÓRIA

À minha querida esposa Roseane
pelo apoio, carinho, compreensão e dedicação
ao nosso filho Júlio César durante esse período de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio e compreensão as minhas constantes ausências.

Ao Prof. Dr. Homero Delboni Júnior pelo constante apoio, orientação, idéias e sugestões sempre bem-vindas e que muito contribuíram, não só para elaboração deste trabalho, como também para minha formação e aprimoramento profissionais.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará pelo empenho em valorizar seus profissionais e pelo apoio durante a minha participação no programa de pós-graduação em Engenharia Mineral da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Aos professores Arthur Pinto Chaves e Eldon Azevedo Masini pelas sugestões e comentários pertinentes durante o exame de qualificação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Eng. Químico Dr. Odair Alves de Lima pelas sugestões, comentários e ajuda com a utilização do *software Statistica*.

À Eng[a]. de Minas Bianca Foggiatto pelas sugestões e comentários pertinentes.

Aos técnicos do Laboratório de Simulação e Controle do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP, Rogério, Juninho, Fernando e Newton, pela presteza na realização dos ensaios de escrubagem de laboratório.

Ao Eng. Químico Bricionor Filho, ao Sr. Antonio Odilon e a toda equipe de colaboradores, pelo auxílio fundamental na execução dos ensaios de escrubagem em escala piloto;

À VALE, na pessoa do Sr. Adriano Campos, pela autorização para execução e acompanhamento dos ensaios de escrubagem, em escala piloto, na Mina de Bauxita de Paragominas.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, tiveram a oportunidade de compartilhar comigo alguma parte da elaboração desta Tese.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar, sob o enfoque da modelagem matemática, a operação de escrubagem da bauxita proveniente da jazida Miltônia 3, da Mina de Bauxita de Paragominas-PA, com vistas a fornecer parâmetros para previsão de seu desempenho e otimização. Para isso, foi realizada uma campanha de experimentos de escrubagem, em um tambor desagregador de laboratório, baseada em planejamento fatorial. Os parâmetros operacionais avaliados foram os seguintes: grau de enchimento, tempo de residência da polpa e velocidade de rotação. A variável de resposta selecionada foi a quantidade de finos (partículas menores que 0,037 mm) no produto desagregado. O programa de experimentos permitiu a análise da influência de cada variável operacional selecionada na desagregação da bauxita. De acordo com os resultados obtidos, o parâmetro operacional que produziu o efeito mais significativo na variável de resposta foi o grau de enchimento. O modelo desenvolvido foi validado através da comparação entre os valores obtidos em ensaios de escrubagem em uma unidade piloto e aqueles previstos pelo modelo. Os valores da quantidade de finos, no produto desagregado, previstos pelo modelo apresentaram uma excelente aproximação com os dados experimentais da operação em escala piloto.

Palavras-chave: Escrubagem. Modelagem. Bauxita. Tambor Desagregador

ABSTRACT

The aim of this study was to investigate and model the bauxite scrubbing of bauxite samples from Miltonia 3, a Vale operation at Pará state, Brazil. The experimental program included the design of a standard laboratory test, from which parameters were derived for predicting the operation of a scrubber in steady state conditions. Three main variables were selected for the laboratory experimental program using the factorial design technique. These were load fraction, residence time and rotation speed. The amount of fines was determined through screening both feed and product of the scrubbing test. The former was considered as a material characteristic while the second was the dependent variable, i.e. the result of the scrubbing process. An empirical model was developed according to which the load fraction was found the most important variable to the scrubbing process. Residence time was also included in the model due to its importance in designing scrubbers for industrial plants. To validate the model a comprehensive pilot plant program was carried out with the same bauxite sample from Miltonia 3 deposit used in the laboratory investigations. The comparison between experimental data and model calculated values indicated a good agreement, as most values were within ±10% deviation range.

Keywords: Scrubbing. Modeling. Bauxite. Drum scrubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - *Log washer* ou lavador de cascalho.....32
Figura 2 - Equipamento *Haver Hydro-Clean* 33
Figura 3 - Máquina de atrição.....34
Figura 4 - Tambor desagregador rotativo ou *drum scrubber* 36
Figura 5 - Secção longitudinal de um *scrubber* com *trommel*.....37
Figura 6 - Instalação de escrubagem da MRN 41
Figura 7 - Sequência das operações de lavra da MBP 51
Figura 8 - Lavra por tiras 51
Figura 9 - Fluxograma de beneficiamento da MBP 53
Figura 10 - Percurso do mineroduto da MBP 57
Figura 11 - Equipamento utilizado nos ensaios de escrubagem em escala de laboratório 61
Figura 12 - Instalação piloto de escrubagem.....65
Figura 13 - Vista do interior do *scrubber* 68
Figura 14 - Coleta das amostras 69
Figura 15 - Desenho esquemático do balanço de massas da operação de escrubagem.....70
Figura 16 - Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios de laboratório 71
Figura 17 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 1 min e Vr 28,4% Vc.....72
Figura 18 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 3 min e Vr 28,4% Vc.....73
Figura 19 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 1 min e Vr 41,4% Vc.....74
Figura 20 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 3 min e Vr 41,4% Vc.....75
Figura 21 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e Vr 28,4% Vc 76

Figura 22 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e Vr 28,4% Vc 77
Figura 23 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e Vr 41,4% Vc 78
Figura 24 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e Vr 41,4% Vc 79
Figura 25 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e t_r 1 min.....80
Figura 26 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e t_r 3 min.....81
Figura 27 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e t_r 1 min....82
Figura 28 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e t_r 3 min....83
Figura 29 - Gráfico cúbico das respostas 87
Figura 30 - Efeito do grau de enchimento na quantidade de finos no produto 88
Figura 31 – Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios.....89
Figura 32 – Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios determinada sem as distribuições das amostras dos ensaios 2 e 9.....90
Figura 33 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 1 92
Figura 34 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 2 93
Figura 35 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 3 94
Figura 36 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 4 95
Figura 37 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 1 96
Figura 38 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 2 97

Figura 39 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 3 98
Figura 40 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 4 99
Figura 41 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 5 100
Figura 42 – Ajuste do modelo aos dados experimentais com velocidade de rotação de 28,4% Vc; 105
Figura 43 - Ajuste do modelo aos dados experimentais com velocidade de rotação de 41,4% Vc; 105
Figura 44 - Comparação entre os valores experimentais dos finos no produto e os valores previstos pelo modelo 106
Figura 45 - Gráfico da distribuição normal dos resíduos 107
Figura 46 - Resíduos versus valores previstos de Finos no Produto 108
Figura 47 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo nas condições 1 e 2 115
Figura 48 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo nas condições 3 e 4 116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do cilindro utilizado nos ensaios de laboratório 61
Tabela 2 – Variáveis operacionais e seus respectivos níveis.....63
Tabela 3 – Condições de realização dos ensaios de escrubagem escala de laboratório 63
Tabela 4 – Características do *scrubber* piloto 65
Tabela 5 – Condições de realização dos ensaios de escrubagem em escala piloto.66
Tabela 6 – Matriz de planejamento 84
Tabela 7 – Coeficientes de contraste para um fatorial 2^3.....85
Tabela 8 – Resultados dos efeitos para o planejamento fatorial 2^3 dos ensaios de escrubagem em laboratório.....86
Tabela 9 – Resultados do balanço de massas para os ensaios piloto 91
Tabela 10 – Programa de ensaios complementares de escrubagem 102
Tabela 11 – Dados experimentais utilizados na modelagem 103
Tabela 12 – Estimativa da constante “b” do modelo 104
Tabela 13 – Tipos de decisões para um teste de hipóteses e suas probabilidades 110
Tabela 14 – Teste de hipóteses para média de dados emparelhados 112
Tabela 15 – Resultados dos valores experimentais e previstos pelo modelo 113
Tabela 16 – Resultado do teste de hipótese 114
Tabela 17 – Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios em escala de laboratório 125
Tabela 18 – Distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de escrubagem em escala de laboratório 127
Tabela 19 – Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios em escala piloto.....129
Tabela 20 – Distribuição granulométrica dos produtos *oversize (OS)* e *undersize (US*) dos ensaios de escrubagem em escala piloto 131
Tabela 21 – Distribuição granulométrica do produto desagregado nos ensaios em escala piloto 133
Tabela 22 – Pontos de probabilidade da distribuição *t* com *v* graus de liberdade...135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALUNORTE	ALUMÍNIO DO NORTE DO BRASIL S.A.
CBA	COMPANHIA BRASILEIRA DE ALUMÍNIO
DWP	*DINAWHIRLPOOL*
EPUSP	ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FN	FINOS NATURAIS
FP	FINOS NO PRODUTO
JKMRC	*JULIUS KRUTTSCHNITT MINERAL RESEARCH CENTER*
LSC	LABORATÓRIO DE SIMULAÇÃO E CONTROLE
MBP	MINA DE BAUXITA DE PARAGOMINAS
MRN	MINERAÇÃO RIO DO NORTE
OS	*OVERSIZE*
PMI	DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS E PETRÓLEO
PPP	PLANTA PILOTO DE PARAGOMINAS
ROM	*RUN OF MINE*
SAG	SEMI-AUTÓGENO
US	*UNDERSIZE*

LISTA DE SÍMBOLOS

mm	milímetro
bar	bar
m^3/h	metro cúbico por hora
kWh	quilowatt hora
t/h	tonelada por hora
L/D	relação de aspecto
t_r	tempo de residência da polpa
Vu	volume útil ocupado pela polpa na câmara do *scrubber*
Qa	vazão volumétrica da polpa de alimentação
Vc	velocidade crítica
rpm	rotações por minuto
D	diâmetro interno
m	metro
Mt	milhões de toneladas
km	quilômetro
”	polegada
^{o} C	graus Celsius
Ms	massa do sólido
ds	densidade do sólido
m/h	metro por hora
kt	quilotonelada
’	pé
hp	horse power
P_{80}	diâmetro em que 80% do produto é passante
#	mesh
Vr	velocidade de rotação
C_w	concentração de sólidos da polpa de alimentação
min	minuto
Q_{wa}	vazão mássica de sólidos da alimentação
cv	cavalo vapor

L	litro
g	grama
Ge	grau de enchimento
kg/h	quilograma por hora
α	nível de significância
Q_p	vazão mássica de polpa da alimentação
β	probabilidade de ocorrência do erro tipo II do teste de hipóteses
R^2	coeficiente de determinação
H_0	hipótese nula
H_1	hipótese alternativa
μ	média populacional
μ_d	média das diferenças
s_d	desvio-padrão da amostra das diferenças
n	número de elementos da amostra
m^3	metro cúbico
$\mathbf{X}^t$	matriz transposta de **X**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18

2 OBJETIVOS 21

2.1 OBJETIVO GERAL 21

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

3 REVISÃO DA LITERATURA 22

3.1 A MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROCESSO 22

3.1.1 Modelos Teóricos ou Fundamentais 23

3.1.2 Modelos Fenomenológicos 24

3.1.3 Modelos Empíricos 25

3.2 ELABORAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE PROCESSO 26

3.3 ESCRUBAGEM E LAVAGEM DE MINÉRIOS 29

3.4 EQUIPAMENTOS DE ESCRUBAGEM E LAVAGEM DE MINÉRIOS 31

3.4.1 *Log Washer* 31

3.4.2 *Haver Hydro-Clean* 32

3.4.3 Máquina de Atrição 34

3.4.4 *Drum Scrubber* 35

3.4.4.1 Características do *drum scrubber* 36

3.4.4.2 Concentração de sólidos da polpa 37

3.4.4.3 Tempo de residência da polpa na câmara de escrubagem 38

3.4.4.4 Volume útil ocupado pela polpa 38

3.4.4.5 Vazão de polpa de alimentação 39

3.4.4.6 Velocidade de rotação do *scrubber* 39

3.4.4.7 Altura das aletas de revolvimento do minério 40

3.4.4.8 Usos 40

3.5 MODELAGEM DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM 41

3.6 BAUXITA 42

3.6.1 Introdução 42

3.6.2 Formação e Caracterização Mineralógica 44

3.6.3 Lavra 46

3.6.4 Beneficiamento Mineral 46

3.6.5 Reservas 47

3.6.6 Produção 48

3.7 A MINA DE BAUXITA DE PARAGOMINAS 48

3.7.1 Lavra 50

3.7.2 Descrição do Processo de Beneficiamento 52

3.7.2.1 Britagem e estocagem em pilhas 53

3.7.2.2 Moagem grosseira e deslamagem 54

3.7.2.3 Moagem fina 55

3.7.2.4 Desaguamento e peneiramento final 56

3.7.3 Transporte do Produto pelo Mineroduto 56

4 MATERIAIS E MÉTODOS 59
4.1 MATERIAIS 59
4.1.1 Amostra de Bauxita.....59
4.2 MÉTODOS 59
4.2.1 Ensaios de Escrubagem em Escala de Laboratório 60
4.2.1.1 Equipamento utilizado 60
4.2.1.2 Preparação das amostras.....62
4.2.1.3 Determinação da distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios 62
4.2.1.4 Execução dos ensaios.....63
4.2.2 Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto 64
4.2.2.1 Instalação piloto de escrubagem 64
4.2.2.2 Execução dos ensaios.....66
4.2.2.3 Balanço de massas 69
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 71
5.1 ENSAIOS DE ESCRUBAGEM EM ESCALA DE LABORATORIO 71
5.1.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios.....71
5.1.2 Efeito do Grau de Enchimento na Desagregação da Bauxita 72
5.1.3 Efeito do Tempo de Residência da Polpa na Desagregação da Bauxita 76
5.1.4 Efeito da Velocidade de Rotação na Desagregação da Bauxita 80
5.1.5 Influência das Variáveis Operacionais na Geração de Finos.....84
5.2 ENSAIOS DE ESCRUBAGEM EM ESCALA PILOTO.....88
5.2.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios.....88
5.2.2 Balanço de Massas 90
5.2.3 Influência das Variáveis Operacionais na Desagregação da Bauxita 92
5.2.3.1 Efeito do tempo de residência da polpa.....92
5.2.3.2 Efeito da velocidade de rotação.....96
6 MODELAGEM DO PROCESSO 101
6.1 DEFINIÇÃO DO MODELO.....101
6.2 ESTIMAÇÃO DA CONSTANTE “b”.....102
6.3 VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO.....106
7 VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....109
7.1 TESTE DE HIPÓTESES 109
7.1.1 Conceitos Importantes.....110
7.1.2 Comparação de Duas Médias.....110
7.1.3 Dados Emparelhados.....111
7.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS.....113
8 CONCLUSÕES.....117
REFERÊNCIAS 119

Apêndice A – Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios de Laboratório.....124

Apêndice B – Distribuição Granulométrica dos Produtos dos Ensaios de Escrubagem em Escala de Laboratório.....126

Apêndice C – Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto 128

Apêndice D – Distribuição Granulométrica dos Produtos dos Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto 130

Apêndice E – Distribuição Granulométrica do Produto Desagregado dos Ensaios em Escala Piloto.....132

Apêndice F – Distribuição *t de Student*.....134

1 INTRODUÇÃO

Taggart (1945) define a operação unitária de escrubagem de minérios como sendo a desagregação por meio de forças relativamente leves, se comparadas com os esforços usuais em cominuição, porém suficientes para reduzir materiais razoavelmente moles e inconsolidados, tais como argilas, ou para separar grãos unidos entre si por ligações brandas geradas, por exemplo, na cimentação natural ocorrida com certos minérios ou na precipitação de sais.

O equipamento utilizado para realizar tal processo é conhecido como *scrubber*. Existem diferentes equipamentos de escrubagem no mercado e o que se utilizou neste trabalho foi o chamado *drum scrubber* ou tambor desagregador. Trata-se de um cilindro, aberto nas extremidades e ligeiramente inclinado em relação à horizontal, que gira em torno de seu próprio eixo, montado sobre rolos.

No Brasil, os *drum scrubbers* são utilizados na desagregação e lavagem de bauxitas em várias usinas de beneficiamento, como por exemplo, Mineração Rio do Norte (MRN) em Trombetas, Alcoa em Juruti, as duas localizadas no Estado do Pará e Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) em Miraí e Itamarati- MG. (ALVES; REIS, 2008), (REIS, 2008)

Prever o comportamento do minério em instalações de escrubagem para dimensionamento e otimização das mesmas é uma ação que proporcionaria ganhos reais para a indústria mineral.

Recentemente, devido à alta competitividade do mercado mineral aliada à crise financeira mundial, tem havido um forte direcionamento de esforços no sentido de melhorar o desempenho, a produtividade e a confiabilidade de usinas de tratamento de minérios.

Um recurso poderoso que permite prever desempenho e otimizar as operações unitárias é a modelagem de processo.

De acordo com vários autores citados por Girolamo (1997), a modelagem, a simulação e o controle de processos de operações de tratamento de minérios têm percorrido um longo caminho desde seu início, através da prática de métodos como o de tentativa-e-erro, predominantes até o fim do século XIX, passando pelo entendimento de princípios fundamentais com Taggart, no início dos anos 30 e 40,

até o desenvolvimento de métodos quantitativos com Austin e Gagner, Lynch, Plitt e outros a partir dos anos 60.

Durante os anos 60 e 70 houve um considerável esforço por parte de muitos pesquisadores no sentido de desenvolver modelos semi-empirícos de várias operações unitárias do tratamento de minérios. Isto contribuiu para um maior entendimento dos princípios das operações de processo mineral, o que, em conjunto com novas técnicas computacionais tornou-se possível um rápido desenvolvimento desta atividade. A partir de então, tal evolução passou do âmbito acadêmico, assumindo importante função do dia-a-dia da indústria mineral.

Os programas de simulação tornaram-se bastantes confiáveis sendo hoje amplamente utilizados por muitos operadores de usinas de tratamento, projetistas ou engenheiros de processo na solução de problemas técnicos associados a projetos de novas instalações, otimização de instalações já existentes, bem como no próprio treinamento de pessoal. Eles têm hoje grau de confiabilidade razoável, comparável ao dos métodos tradicionais, como por exemplo, o de Bond, porém com uma vantagem fundamental, qual seja, a flexibilidade oferecida para a investigação de alternativas de circuitos/equipamentos.

A modelagem e a simulação de processos não substituem os ensaios tradicionais de laboratório, mas os complementa. Sua vantagem é a de economizar tempo e recursos na procura da melhor alternativa de projeto ou da otimização de processos existentes.

Atualmente existem e são amplamente utilizados, modelos matemáticos para operações de britagem, moagem, classificação por ciclones, separação gravítica e flotação, entre outros, ainda que estejam em diferentes níveis de desenvolvimento. Isto se deve ao fato que, devido à sua importância econômica, os processos de cominuição receberam maior atenção por parte dos pesquisadores, e, portanto, acham-se muito melhor entendidos que os processos de concentração.

Para a operação de escrubagem não foram encontrados na literatura trabalhos de modelagem de tal processo, à exceção do trabalho conduzido por Miller (2004) que desenvolveu um modelo para seleção da geometria do *drum scrubber* e de sua potência. O método proposto por Miller é baseado em resultados de ensaios que definem o tempo de residência necessário para promover o grau de desagregação esperado.

É, portanto, altamente relevante e útil o desenvolvimento de modelos desta operação específica para minérios brasileiros de bauxita visando, de forma a prever o desempenho, a otimização de processo e a consequente melhoria da qualidade do produto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar, sob o enfoque da modelagem matemática, a operação de escrubagem de bauxita, com vistas a fornecer parâmetros para previsão de desempenho e otimização da operação. Desta forma pretende-se contribuir para a consolidação dos conhecimentos sobre escrubagem de bauxita no país.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar a influência das variáveis operacionais: grau de enchimento, velocidade de rotação e tempo de residência do processo de escrubagem, em escala de laboratório, na desagregação de uma amostra de bauxita de Paragominas;

Verificar a geração de finos (material com granulometria menor que 0,037 mm) durante o processo de escrubagem de bauxita;

Desenvolver um modelo matemático empírico e ajustá-lo aos resultados obtidos nos ensaios de escrubagem da bauxita para previsão da quantidade de finos gerados;

Analisar a influência das condições operacionais do processo de escrubagem, em escala piloto, na desagregação de uma amostra de bauxita de Paragominas e utilizar os resultados da geração de finos para validar o modelo proposto;

Por fim, apresentar um texto sobre o processo de escrubagem de bauxita, de modo a se tornar um subsídio para aqueles que querem ou necessitem entender tal operação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A MODELAGEM MATEMÁTICA DE PROCESSO

Segundo Girolamo (1997) a modelagem matemática é um conjunto de técnicas que visam à obtenção de um modelo. O modelo é uma equação ou conjunto de equações que transformam um conjunto de dados de entrada em um conjunto de dados de saída e que representam um fenômeno ou um processo. Os modelos também podem ser representados como tabelas, ábacos ou gráficos.

As equações de um determinado modelo visam à descrição matemática de um fenômeno e traduzem o conhecimento atual dos mecanismos que regem este processo e sua quantificação. É sempre uma representação simplificada do processo selecionado.

As equações podem descrever uma unidade simples (*Unit Operation Model*), como por exemplo, um moinho de bolas, ou um conjunto de unidades (*Circuit Model*), como por exemplo, um circuito de moagem formado por moinhos e classificadores ou ainda uma operação completa de beneficiamento.

Modelos empíricos ou fenomenológicos devem, geralmente, ser ajustados para o sistema ou processo analisado. Assim, ajuste do modelo (*fitting*) é o conjunto de simulações que visam calcular os valores de parâmetros que resultem nas menores diferenças entre resultados experimentais e aqueles correspondentes obtidos pelo modelo.

Simulação é o emprego destas equações, através da substituição das variáveis do modelo por um conjunto de dados de entrada, visando obter predições sobre o fenômeno ou processo que se está analisando, através dos resultados de saída.

Otimização é a ação ou efeito de buscar uma condição melhor para uma determinada operação ou processo.

A modelagem é inerente à Engenharia, pois a necessidade de quantificar e posteriormente de saber “o que ocorre se...”, faz desta técnica uma ferramenta fundamental. Nappier-Munn e Lynch (1992) destacam que o exercício de

modelagem é extremamente instigante intelectualmente e uma atividade acadêmica por excelência.

De fato, a modelagem de processo é uma ferramenta poderosa, seja para o projeto de novas instalações, seja para otimização e simulação, de que sem o auxílio daquela nunca poderiam ser investigadas tal a complexidade, os custos ou os investimentos necessários.

À medida que as interfaces gráficas dos programas computacionais tornaram-se mais atraentes, houve uma enorme tendência dos profissionais em substituir o trabalho exaustivo, inexato e, por vezes inseguro do laboratório, da planta piloto e das amostragens industriais, pelas simulações em computadores, que fornecem, através de modelos matemáticos, respostas rápidas e sem maiores trabalhos além da entrada dos dados.

Segundo Delboni Jr.[1], a modelagem matemática deve ser empregada apenas como um recurso para quantificar o entendimento prévio de um determinado processo. Assim, por mais complexo que seja um modelo, este não deve substituir o conhecimento da operação.

Ainda segundo o autor, a construção do conhecimento, em tratamento de minérios, envolve observação, acompanhamento de ensaios e processos industriais, domínio de conceitos e técnicas específicas, tanto de operação de equipamentos quanto de processos integrados.

E ele conclui dizendo: “tratar resultados de modelos tecnológicos com rigor científico é típico de neófitos. Já substituir o rigor científico por empirismo simplista é subestimar a própria engenharia”.

De acordo com Nappier-Munn e Lynch (1992) os modelos matemáticos podem ser classificados em três classes principais:

3.1.1 Modelos Teóricos ou Fundamentais

São aqueles elaborados a partir de um entendimento das leis físicas que interagem no processo. Assim, conceitos fundamentais de força, energia,

[1] DELBONI JR., H. (Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Comunicação pessoal, 2010.

fenômenos de transporte, entre outros, são a base destes modelos. São os mais abrangentes e poderosos e possibilitam predições em amplas faixas de valores, assim como extrapolações em relação aos valores para os quais foram obtidos, além de permitirem um grande entendimento do processo ou fenômeno que estão descrevendo.

Um exemplo clássico de modelo teórico aplicado em tratamento de minérios é a lei de Stokes para a determinação da velocidade terminal de queda de partículas num fluido viscoso.

No entanto, em tratamento de minérios, este tipo de modelo quase não é aplicado pela complexidade dos fenômenos envolvidos e consequente dificuldade de descrevê-los, através de um amplo entendimento e correlações dos mecanismos envolvidos.

3.1.2 Modelos Fenomenológicos

São modelos elaborados a partir de exercícios intelectuais, procurando-se o entendimento do fenômeno ou do processo, através da ampla observação do comportamento deste. Suas equações são baseadas em princípios básicos do fenômeno ou do processo, mas contêm parâmetros que devem ser ajustados experimentalmente a partir de observações do evento, em escala industrial ou de laboratório.

Estes modelos apresentam uma imagem extremamente útil do fenômeno, embora não possibilitem um entendimento mais acurado de todos os mecanismos envolvidos no processo que descrevem.

Para a obtenção destes modelos são usados conceitos de balanço populacional e de adimensionais, que possibilitam correlações e predições coerentes, o que os tornam bastante poderosos.

São exemplos de modelos fenomenológicos, os modelos dinâmicos de moagem, obtidos através do método do balanço populacional.

3.1.3 Modelos Empíricos

Modelos empíricos são simplesmente descrições de uma determinada observação experimental, através de equações matemáticas. Estes modelos são baseados na correlação matemática entre parâmetros pré-selecionados, através de técnicas de regressão. Portanto, são modelos extremamente restritos e somente aplicáveis, rigorosamente, dentro das condições experimentais estudadas. Não permitem extrapolações fora dos seus estreitos limites.

Apesar da aparente falta de rigor científico desta modelagem, estes modelos são de extrema importância na Engenharia, pois diante das enormes complexidades dos processos, esta técnica permite obter equações que possibilitem o estudo de fenômenos que, embora não se saiba exatamente como funcionam, permitem predizer o que ocorre se determinada variável assumir certos valores.

As principais vantagens de modelos empíricos são as seguintes:

- A relativa facilidade com que podem ser obtidos. O uso de técnicas de regressão linear e não linear e programas computacionais poderosos, possibilita correlacionar muitas variáveis simultaneamente, eliminar as de menor importância e testar hipóteses;
- São facilmente aplicáveis e, portanto permitem verificação da qualidade da descrição e/ou predição do fenômeno ao qual estejam associados; e
- Auxiliam no melhor entendimento do processo e, por conseguinte podem levar ao desenvolvimento de modelos mais abrangentes.

Observa-se que não é uma questão simples classificar os modelos, pois existem nuanças por vezes difíceis de mensurar.

Os modelos podem ser estacionários ou dinâmicos. Os modelos dinâmicos são aqueles que incorporam a variável tempo, ou variáveis dependentes do tempo, nas suas predições. Procuram representar o que ocorre quando um parâmetro é alterado ao longo do tempo e normalmente são muito mais complexos que os estacionários.

Os modelos estacionários procuram responder o que ocorre quando uma alteração de um parâmetro acontece após o processo entrar novamente em regime.

A resposta é instantânea e não leva em conta o que está ocorrendo ao longo do tempo.

Pode-se considerar que os modelos estacionários sejam casos particulares dos modelos dinâmicos, quando a derivada do tempo é igual a zero.

3.2 ELABORAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO DE PROCESSO

De acordo com Lima (1997), por mais representativo e poderoso que seja um modelo, ele sempre será uma representação simplificada da realidade. O problema começa quando este passa a espelhar não uma realidade simplificada, mas uma caricatura desta.

Em tratamento de minérios, utilizam-se largamente os modelos empíricos pela complexidade dos fenômenos envolvidos e assim, os cuidados na obtenção destes devem ser muito grandes. Tais modelos, obtidos pela correlação de dados experimentais, através de regressões, precisam ser rigorosamente descritos quanto aos seus limites de aplicação.

O trabalho de um pesquisador que pretende desenvolver modelos começa com um conhecimento profundo do que, e sob qual precisão, se está querendo descrever. A introdução de muitas variáveis pode ser uma prova de complexidade de elaboração de um modelo, porém pode também significar que se está introduzindo mais variáveis apenas para possibilitar uma regressão com erro menor, sem que estas tenham qualquer significado físico para o fenômeno que se está estudando.

Deve-se realizar uma seleção criteriosa e parcimoniosa dos parâmetros a serem empregados no modelo. É nesta etapa que reside a necessidade do pesquisador conhecer profundamente o processo, pois caso contrário qualquer profissional com conhecimentos razoáveis de matemática poderia se dedicar a modelagem de processo, até mesmo com a vantagem sobre o engenheiro.

A técnica de modelagem deve ter por base a seleção das variáveis importantes e de fato intervenientes no processo, sob o risco de se incluir variáveis pouco úteis nos modelos de tratamento de minérios, apenas para tornar as respostas mais próximas ao conjunto dos resultados obtidos nos ensaios.

Outro aspecto fundamental na modelagem é a qualidade dos dados usados para a elaboração do modelo. Este é, talvez, o aspecto mais importante a ser observado. De fato, os modelos matemáticos empíricos desenvolvidos a partir de extensos e cuidadosos trabalhos experimentais são de extrema valia para o entendimento e simulação de processos.

Ocorre que trabalhos laboratoriais, além de extenuantes, são muito caros. Há, portanto, uma tendência a minimizar o número de ensaios e a implicação disto é clara, pois com uma base de dados menor, corre-se um risco muito maior de se trabalhar com dados pouco confiáveis.

Isto não significa que apenas porque se realizou um grande número de ensaios, esteja garantida a qualidade destes. O planejamento dos ensaios, visando atingir toda a faixa de utilização a que se pretende estender o modelo, é fundamental, pois neste tipo de modelagem podem-se interpolar valores, porém jamais extrapolá-los.

É comum, especialmente nas operações unitárias de tratamento de minérios, aparecerem problemas em que precisa-se estudar vários parâmetros de qualidade do produto ao mesmo tempo e estes, por sua vez, são afetados por um grande número de variáveis operacionais. Como investigar os efeitos de todas essas variáveis sobre todos os parâmetros de qualidade do produto, minimizando o trabalho necessário e o custo dos experimentos?

De acordo com Barros Neto et al. (2001), as pesquisas realizadas com o objetivo de fornecer resposta a essa pergunta muitas vezes tomam vários meses de trabalho de pesquisadores e técnicos, a um custo bastante alto em termos de salários, reagentes, análises químicas e testes físicos. Usando planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, pode-se extrair do sistema em estudo, o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos.

Um recurso bastante utilizado para alcançar este objetivo é a técnica de planejamento fatorial completo, que visa à avaliação da influência de fatores importantes no sistema em estudo, sobre a resposta de interesse, bem como as possíveis interações de uns fatores com os outros, fazendo-se isso com um número mínimo de experimentos.

Outro aspecto fundamental é o rigor com a obtenção dos dados, em particular com a amostragem. Assim, deve-se tomar extremo cuidado para evitar erros estatísticos elementares de amostragem, como variar o tamanho de alíquotas

durante a retirada de amostras, evitar desprezar alíquotas e/ou amostras representativas ou aceitá-las quando não as são, evitar erros grosseiros, como troca de etiquetas, perda de amostras e contaminações. Além disto, o zelo com o manuseio, a redução (quarteamento), a secagem e a estocagem das amostras são condições fundamentais para o desenvolvimento do trabalho de obtenção dos dados que serão usados posteriormente nos trabalhos de modelagem.

A teoria de Gy (1982) incluiu uma descrição detalhada de tais erros, bem como fundamentos e técnicas para quantificação dos mesmos.

Posteriormente, a confirmação dos resultados através da realização de um conjunto de ensaios independentes complementa a etapa de obtenção dos dados.

Considera-se fundamental a distribuição dos erros inerentes a qualquer trabalho de laboratório. Assim, é rigorosamente necessário que o balanço de massas seja fechado de forma a garantir a consistência dos dados. Muitas técnicas podem ser empregadas para fazer a distribuição destes erros, porém é fundamental que os dados estejam coerentes.

Técnicas de distribuição dos erros através da minimização dos erros quadráticos, a análise da precisão dos pontos amostrados, através da repetição de ensaios e da observação do desvio padrão nestes e a distribuição ponderada dos erros pelo inverso da variância são técnicas que devem ser usadas para garantir que em qualquer ponto ou, no conjunto como um todo, os valores de entrada e saída de fluxos estejam consistentes.

Obtido um conjunto de dados de boa qualidade, englobando toda a faixa de valores desejados à modelagem, parte-se para a elaboração de equações que descrevam o fenômeno. Estas são delineadas intuitivamente, através da elaboração de uma função matemática, que possa compreender as variáveis ensaiadas, adotando-se os parâmetros (expoentes ou fatores) que serão ajustados ao conjunto de dados, através de regressões.

Finalmente, obtendo-se uma equação ou conjunto de equações, deve-se verificar a sua aplicabilidade através da simulação de ensaios independentes. A assim denominada validação visa certificar-se que o modelo, ainda que restrito às condições ensaiadas, responde dentro de uma determinada precisão, com valores próximos aos obtidos neste conjunto de dados independentes.

3.3 ESCRUBAGEM E LAVAGEM DE MINÉRIOS

De acordo com Taggart (1945), o processo de escrubagem é efetivamente a desagregação por meio de forças relativamente leves, se comparadas com os esforços usuais em cominuição, porém suficientes para reduzir materiais razoavelmente moles e inconsolidados, tais como argilas, ou para separar grãos unidos entre si por ligações brandas, geradas, por exemplo, na cimentação natural ocorrida com certos minérios ou na precipitação de sais.

Segundo Trajano (1966), por lavagem (*washing*) de minérios, entende-se a separação de dois constituintes desses minérios que difiram distintamente em granulometria. Na maioria das vezes, o constituinte mais fino, geralmente argila ou material argiloso, encontra-se mais ou menos aglomerado ou aderido ao constituinte grosseiro, que é quase sempre o mineral valioso, salvo casos especiais ou quando o beneficiamento é da própria argila. Nessas condições, a escrubagem compreende um estágio prévio, ou simultâneo à lavagem, de desagregação do minério com água, a fim de individualizar as micro partículas da argila, e limpar, as partículas grosseiras do outro mineral, da argila aderida.

Ainda segundo o mesmo autor, no caso de minérios incoerentes, a exemplo dos minérios aluvionares, cujas fases mineralógicas se apresentam individualizadas em grãos livres, a fragmentação é dispensada, sendo necessária, às vezes, apenas uma simples desagregação. Por desagregação, entende-se ser o processo de destacamento de grãos, ligados frouxamente por cimento incoerente, na maioria das vezes argiloso, e levado a cabo, geralmente, em aparelhos onde o minério, com um pouco d'água, fica submetido a revolvimento ou agitação.

Cabe aqui ressaltar a diferença entre os processos de escrubagem, atrição e cominuição empregados no tratamento de minérios. Todos são meios para se atingir a liberação/individualização de partículas minerais, entretanto empregam quantidades diferentes de energia para alcançar o objetivo. Os processos de escrubagem e atrição utilizam intensidades energéticas baixa e média, respectivamente, enquanto que a cominuição utiliza elevadas quantidades de energia. Isto se deve, em função das forças de coesão entre as partículas que se desejam individualizar. Quanto maior a coesão entre partículas, mais energia deve

ser empregada para a individualização. Portanto, há uma gradação crescente das diferentes operações em função da energia empregada no processo.

Outra diferença importante é quanto à granulometria do material em que os processos são aplicados. O processo de escrubagem geralmente é aplicado para individualização de partículas finas aderidas na superfície de partículas grosseiras (matacões), enquanto que o de atrição é empregado para partículas finas, com tamanho abaixo de 10 mm.

A escrubagem é normalmente realizada pela ação de atritar partículas duras grosseiras umas nas outras. Normalmente, a operação de escrubagem antecede a operação de lavagem propriamente dita, mas em muitos casos ambas as ações são desenvolvidas simultaneamente.

Os métodos e equipamentos a serem empregados dependem, fundamentalmente, do tipo de material, do tamanho das partículas e dos resultados pretendidos. Por exemplo, o tratamento de partículas minerais grosseiras, contaminadas por argila, será tanto mais difícil quanto mais plástica e impermeável for a argila a ser desintegrada e removida. Por outro lado, o tratamento de cascalhos contendo partículas roladas e lisas, levemente cimentadas por argilas, pode ser realizado com relativa facilidade, por exemplo, sobre peneiras vibratórias submetidas a fortes jatos de água (ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2009).

Os termos escrubagem (*scrubbing*) e lavagem (*washing*), em sua origem inglesa, derivam de atividades domésticas paralelas e referem-se às mesmas ações, ou seja: molhar, esfregar, bater, agitar, enxaguar, etc., a consequente separação dos sólidos grosseiros da água, que carrega consigo os sólidos finos em suspensão (ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2009).

Os procedimentos de escrubagem e lavagem são os correspondentes às operações de fragmentação e concentração, quando aplicado ao tratamento de minérios residuais. Tais minérios, normalmente aluviões ou eluviões, contendo metais preciosos ou de elevado valor comercial, podem apresentar diferentes graus de consolidação, mas devem possuir como característica comum, o fato de que o material de interesse apresente condições de dureza e granulometria bem diferentes daquelas do conjunto do material bruto (*run of mine*). O tamanho da partícula é quase sempre a propriedade física na qual se baseia a separação, sendo a água o meio usual de separação (ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2009).

3.4 EQUIPAMENTOS DE ESCRUBAGEM E LAVAGEM DE MINÉRIOS

Segundo Varela (2009), a principal justificativa para utilização de equipamentos de escrubagem e lavagem, em plantas de processamento de materiais, é a remoção de partículas finas. Estas partículas, normalmente, são consideradas uma fração indesejável, diminuindo o valor agregado do produto final, e encontram-se aderidas às partículas minerais de maior tamanho, sendo imprescindível a sua retirada do processo. Muitas vezes, esta contaminação por finos, encontra-se na forma de aglomerados que necessitam ser quebrados, dissolvidos e, por fim, separados da fração grossa. A seguir, encontra-se uma descrição de alguns equipamentos utilizados para tal fim.

3.4.1 *Log Washer*

O equipamento, denominado *log washer,* tem eixos dotados de pás, que se revolvem dentro de um tanque, movimentando as partículas suspensas na polpa, fazendo com que elas choquem-se, umas as outras, com grande energia.

Além de lavar e desagregar, este equipamento realiza uma primeira etapa de deslamagem, eliminando parte dos finos pelo *overflow*.

O *log washer* ou lavador de cascalho (Figura 1) tem como função lavar os grãos sãos do minério, realizando a limpeza de suas superfícies, removendo as argilas e outros finos presentes; muitas vezes, também, sua operação desfaz os grãos de minerais inconsolidados e/ou os torrões de argila presentes. O equipamento opera desagregando, desintegrando e carreando estes contaminantes, através da aplicação de uma forte atrição entre as partículas minerais, gerada do movimento entre as palhetas presas a dois eixos no interior de um tanque. Estes eixos são acionados por motores elétricos. O minério, a ser beneficiado, é alimentado no fundo do tanque e transportado para cima, através do movimento das palhetas. Com o choque intenso entre partículas, o material contaminante é desintegrado ou disperso em água e carreado para fora pelo *overflow* do tanque. O produto limpo é então descarregado pelo *underflow* (WHITAKER, 2001).

Figura 1 - *Log washer* ou lavador de cascalho
Fonte: Metso Minerals (2005a)

De acordo com Varela (2009), deve-se tomar cuidado com implicações relacionadas ao elevado desgaste na parte móvel deste tipo de equipamento, devido ao processamento de materiais abrasivos. Existem situações em que os fabricantes de equipamentos utilizam materiais especiais de elevada resistência à abrasão, como por exemplo, aços com ligas de níquel. Em outros casos, as palhetas são projetadas para permitir uma maior vida útil, através da sua inversão (utilização dos dois lados externos).

3.4.2 *Haver Hydro-Clean*

Segundo Varela (2009), a tecnologia de lavagem, sob alta pressão, desenvolvida na Alemanha, já vem sendo utilizada desde o ano de 1998. O equipamento *Hydro-Clean* foi desenvolvido para o processamento mineral e a reciclagem de materiais. O primeiro equipamento *Hydro-Clean* foi aplicado para a lavagem de agregados para a construção civil. Aplicações desta técnica incluem o processamento de minérios (diamante, ouro, calcário e gesso). Outros materiais, que também estão sendo avaliados (projetos em fase de desenvolvimento), são: minério

de ferro, de níquel, bauxita, caulim, fosfato, carvão, esmeralda, assim como aplicações para a reciclagem de materiais.

O equipamento foi desenvolvido utilizando-se o princípio de lavagem por alta pressão. Ele pode ser utilizado para limpeza de materiais contaminados com um tamanho entre 0 - 150 mm. A pressão utilizada no equipamento pode chegar a 200 bar. Os consumos de água e energia, que deverão ser pré-determinados dependendo da necessidade do processo, variam entre 6 – 42 m^3/h e 10 – 265 kWh, respectivamente. Desta forma, a força hidráulica e o tempo de residência são parâmetros decisivos para a operação estável e contínua do *Hydro-Clean*. A taxa de produção, por máquina, pode chegar a 400 t/h.

A parte central do equipamento consiste em uma câmara de lavagem vertical, revestida em suas laterais com telas de poliuretano. No topo desta câmara encontra-se um rotor de lavagem, no qual são montados bicos de sprays. A alimentação da câmara é realizada, através de uma comporta, conforme Figura 2.

Figura 2 - Equipamento *Haver Hydro-Clean*
Fonte: www.haverbrasil.com.br

O material é lavado e desagregado, ao ser exposto a jatos de água de alta pressão. O fluxo de água injetado é de cima para baixo, devido à posição dos bicos de spray, localizados no rotor de lavagem. Outro efeito, resultante da rotação do rotor de lavagem, é a centrifugação do material. A força hidráulica, transferida ao material, resulta em forças de atrito e impacto entre as partículas que compõem a amostra. Do ponto de vista do processo, a câmara de lavagem do equipamento pode ser dividida em duas zonas, na região superior é a turbulenta, onde o material é lavado, e na região inferior o material é apenas transferido e desaguado.

3.4.3 Máquina de Atrição

A máquina de atrição é um equipamento simples, porém altamente eficiente, para atritar partículas, com lamas em polpas, entre 50 e 80 % de concentração de sólidos. Duas hélices opostas, tipo propulsoras, em cada eixo, criam uma ação de mistura intensa, forçando as partículas individuais, umas contra as outras, resultando em atrição, limpeza de superfície e desintegração de aglomerados, como mostrado na Figura 3.

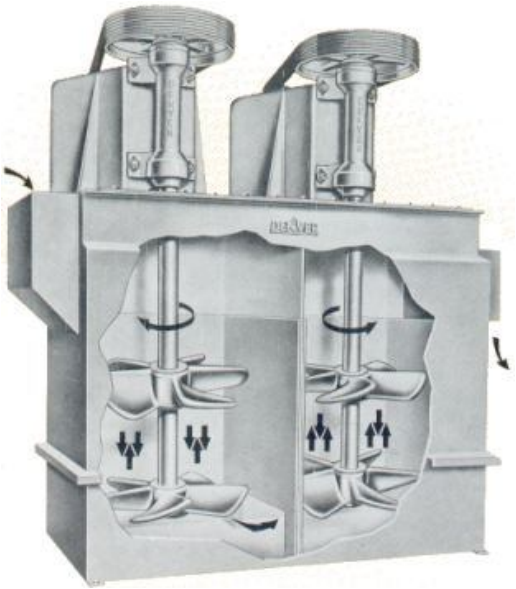

Figura 3 - Máquina de atrição
Fonte: www.aeromecanicadarma.com.br

A eficiência, normalmente, melhora com o aumento da concentração de sólidos da polpa, uma vez que o contato entre partículas aumenta. Uma abertura, em cada segmento das células, permite o fluxo da polpa na máquina. É normalmente fornecida com duas, quatro ou seis células. Este equipamento é usado principalmente para lavagem de material, com tamanho abaixo de 10 mm. É aplicado para remoção de manchas de ferro das partículas de areia, desintegração de aglomerados de argila na areia, delaminação de minérios, como caulim e grafita. Utilizam-se, possivelmente, altos recursos de energia para lavagem de areia de sílica para manufatura de vidro e limpeza de areia de fundição. A máquina também é utilizada para misturar areia e para hidratação de cal. (METSO MINERALS, 2005b)

3.4.4 *Drum Scrubber*

De acordo com vários autores (KELLY; SPOTTISWOOD, 1982; METSO MINERALS, 2005a; ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2009), *drum scrubber*, também chamado de tambor desagregador, lavador rotativo, lavador de tambor, *drum washer*, *scrubber-trommel*, é a máquina destinada à desagregação e separação de rejeitos (argilas) do material aproveitável (Figura 4). É recomendável para materiais misturados com argila solúvel e para grossos em geral. O material entra em um cilindro giratório, onde é misturado com água. Em toda superfície interna do cilindro estão distribuídas as aletas, cuja função é atritar e levantar o material, ao mesmo tempo em que, também, o impulsiona para a tela, onde é desaguado (METSO MINERALS, 2005a).

Em alguns textos pesquisados, principalmente em catálogos de fabricantes, o termo *scrubber* aparece de forma genérica, designando qualquer equipamento que realize o processo de desagregação de partículas, entretanto, neste texto será utilizado para designar o equipamento denominado *drum scrubber*.

Figura 4 - Tambor desagregador rotativo ou *drum scrubber*
Fonte: Engendrar Engenheiros Associados (2009)

3.4.4.1 Características do *drum scrubber*

As principais características do *scrubber* são as dimensões do cilindro (diâmetro e comprimento) e a potência instalada, que é função de suas dimensões e variáveis operacionais. As variáveis operacionais são o volume útil, geralmente expresso em porcentagem do volume da câmara de escrubagem, a velocidade de rotação, tempo de residência da polpa, altura das aletas de revolvimento, além da concentração de sólidos da polpa alimentada.

De acordo com Miller (2004), os *scrubbers* são classificados pela relação de aspecto (relação entre comprimento e diâmetro – L/D). Existe uma faixa de relação de aspecto normalmente utilizada, entre 1,5:1 a 2,5:1, mas esta relação geralmente é mantida na região de 2:1.

O acionamento, normalmente, é feito por conjunto motor-redutor-eixo pinhão/ coroa, sendo o apoio feito em rolos cilíndricos, que deslizam sobre pista de aço. Para sustentação da parte de descarga, usa-se um simples mancal ou dependendo do comprimento do lavador, de uma segunda pista de aço, sustentada por rolos cilíndricos. Na descarga, normalmente, usa-se um *trommel* (Figura 5) para separação por tamanho (W&W3D, 2008).

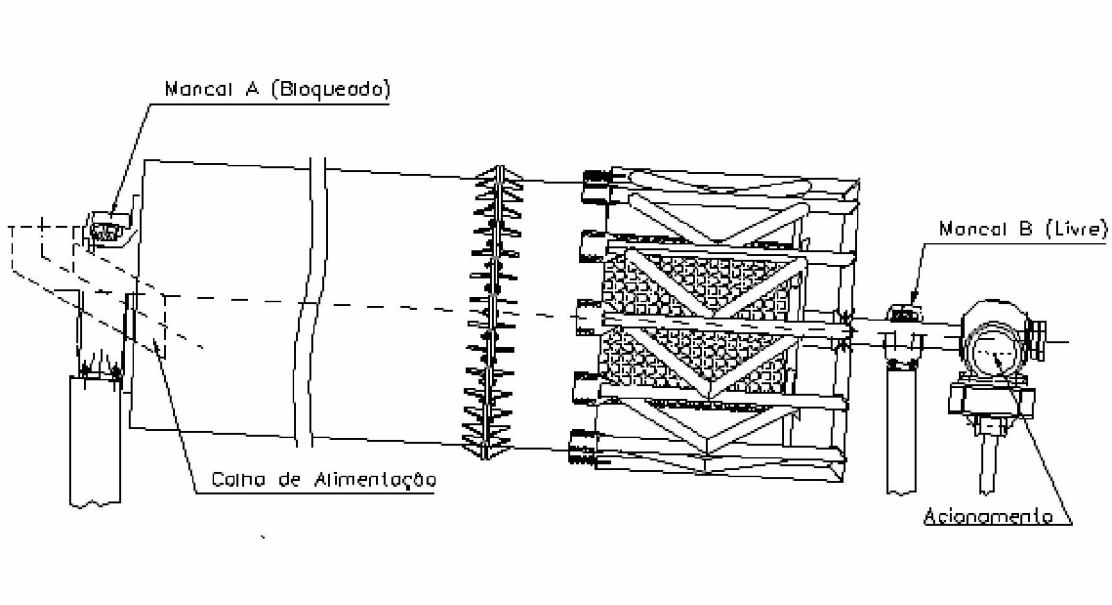

Figura 5 - Secção longitudinal de um *scrubber* com *trommel*

3.4.4.2 Concentração de sólidos da polpa

A concentração de sólidos da polpa (C_w), ou seja, a relação entre a massa de sólidos e a massa de polpa, é uma importante variável no processo de escrubagem. Assim como na moagem, a quantidade de água adicionada, junto ao minério, no processo de escrubagem, afeta não só a velocidade com que as partículas passam por dentro do *scrubber*, mas também a viscosidade e a densidade da polpa e, em consequência, a ação mecânica da desagregação entre as partículas. Polpas excessivamente diluídas diminuem o tempo de residência de partículas na câmara do *scrubber* e, consequentemente, reduzem a probabilidade das partículas serem

desagregadas. O inverso, polpa excessivamente adensada, acaba por apresentar uma viscosidade alta, prejudicando o movimento relativo das partículas, chegando a impedir o rolamento da carga. Por isso, uma concentração de sólidos adequada é de fundamental importância para uma escrubagem eficiente;

3.4.4.3 Tempo de residência da polpa na câmara de escrubagem

É o tempo que, determinado volume de polpa, leva para sair do equipamento. É determinado através da equação 3.1:

$$t_r = \frac{Vu}{Qa} \tag{3.1}$$

Onde:
t_r é o Tempo de residência da polpa;
Vu é o Volume útil ocupado pela polpa na câmara do *scrubber*;
Qa é a Vazão volumétrica da polpa de alimentação.

3.4.4.4 Volume útil ocupado pela polpa

É determinado através do grau de enchimento (Ge) desejado no processo. O grau de enchimento é definido como sendo uma porcentagem do volume interno do cilindro do *scrubber*. Para delimitar o volume útil, fundamental para o cálculo do tempo de residência, usa-se um anel interno de aço, na extremidade de saída do equipamento, com altura ajustável às necessidades de processo.

3.4.4.5 Vazão de polpa de alimentação

Influencia diretamente o tempo de residência da polpa, ou seja, quanto maior a vazão de polpa de alimentação, menor o tempo de residência e consequentemente, a eficiência de lavagem;

3.4.4.6 Velocidade de rotação do *scrubber*

Assim como acontece em moinhos, a velocidade de rotação (Vr) dos *scrubbers* é geralmente referida como uma porcentagem da velocidade crítica.

A velocidade crítica é definida pelo diâmetro interno do *scrubber,* de acordo com a equação 3.2:

$$Vc = \frac{42{,}3}{\sqrt{D}} \tag{3.2}$$

Onde:
Vc é a velocidade crítica (rpm);
D é o diâmetro interno (m).

As faixas de velocidade de rotação são caracterizadas pela ação dinâmica da carga que é requerida. A velocidade de rotação de *scrubbers* é geralmente muito menor, se comparada com as de moinhos, uma vez que a atrição/abrasão é o mecanismo normal de escrubagem. Para se ter uma idéia, moinhos operam na faixa de 70% a 75% da velocidade crítica, enquanto que *scrubbers* tendem a trabalhar na faixa de 30% a 65% (MILLER, 2004).

3.4.4.7 Altura das aletas de revolvimento do minério

O perfil do revestimento interno afeta fortemente a trajetória das partículas. As aletas servem para elevar as partículas e, portanto, adquirem uma maior energia potencial. Internamente, o *scrubber* é revestido de aço ou placas de borracha, com aletas levantadoras (*lifters*) com até 200 mm de altura, em aço, ou de borracha (em torno de 100 –150 mm). Há uma tendência de padronização para o uso de borracha no revestimento e barras levantadoras, devido à menor geração de ruído, maior vida útil e manutenção mais simples (W&W3D, 2008).

3.4.4.8 Usos

No Brasil, os *scrubbers* são utilizados na desagregação e lavagem de bauxita em várias usinas de beneficiamento, como por exemplo, MRN em Trombetas (Figura 6), Alcoa em Juruti, as duas localizadas no Estado do Pará e CBA em Mirai - MG (ALVES; REIS, 2008), (REIS, 2008).

Segundo Chaves et al. (2007), a escrubagem é realizada em bauxitas para remoção da argila, aderida às partículas de gibbsita. Uma rotina clássica é fazê-la numa polpa, com cerca de 50% de concentração de sólidos, por períodos não mais que 3 minutos.

São equipamentos constantemente utilizados em plantas de concentração de ouro e cassiterita, em dragas e também na desagregação de bolas de argila com o intuito de liberar o minério (ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS, 2009).

O *scrubber* pode ter anexado a ele um *trommel,* como mostra a Figura 6, onde as partículas grosseiras serão separadas no *oversize* e as finas, no *undersize*. O movimento de rotação do equipamento impede o entupimento dos orifícios utilizados no peneiramento. Para Chaves et al. (2007), esta não é uma boa solução para bauxita, pois a velocidade de rotação adequada, para uma boa operação de escrubagem, não é a mesma, para uma boa operação de peneiramento. Chaves et al. (2007) acreditam que separar as operações unitárias de escrubagem e peneiramento e realizá-las em *scrubbers* e peneiras vibratórias é a melhor escolha.

Figura 6 - Instalação de escrubagem da MRN

3.5 MODELAGEM DA OPERAÇÃO DE ESCRUBAGEM

Segundo Napier-Munn (2003) e Valery (2003) apud Miller (2004), o projeto e seleção de *scrubbers* é, na melhor das hipóteses, uma ciência inexata, com poucos dados publicados sobre critérios de seleção ou de procedimentos de cálculos. Até hoje, a maioria dos *scrubbers* foi selecionada, baseada num critério simples, como por exemplo, o tempo de residência da polpa, e não por critérios mais rigorosos, tais como, o tempo de residência dos sólidos ou o grau de desagregação. Alguns modelos têm sido desenvolvidos por organizações de pesquisa, como o *Julius Kruttschnitt Mineral Research Center* (JKMRC), que considera a questão do grau de desagregação. Tais modelos ainda não foram liberados para domínio público.

O modelo descrito no artigo de Miller (2004) considera a seleção da geometria do *scrubber* e de sua potência. Ele é baseado em resultados de ensaios de trabalho

que definem o tempo de residência necessário para promover o grau de desagregação esperado. Na maioria dos casos, estes resultados são de ensaios de bancada ou de ensaios contínuos em escala piloto. Em ambos os casos, é assumido que o tempo de residência dos sólidos é o parâmetro importante. Ele é obtido diretamente do ensaio de bancada ou por cálculos a partir do modelo para um ensaio contínuo. Em qualquer caso, o *scrubber* de fluxo contínuo precisa ser selecionado, para atingir o tempo de residência de sólidos necessário.

3.6 BAUXITA

3.6.1 Introdução

Segundo Valeton (1972), o termo bauxita foi introduzido por Berthier e origina-se de Les Baux, localidade do sul da França, cujas proximidades foi descoberta a primeira jazida em 1821.

A bauxita é o minério industrial mais importante para a obtenção do alumínio metálico e de muitos compostos de alumínio. O alumínio pode ser considerado um elemento bastante “popular”, pois está presente em quase todas as esferas da atividade humana. As inúmeras aplicações em diversos setores das indústrias (transportes: automóveis, aeronaves, trens, navios; construção civil: portas, janelas, fachadas; eletro-eletrônico: equipamentos elétricos, componentes eletrônicos e de transmissão de energia; petroquímica; metalurgia e outros) e a frequente presença no nosso dia-a-dia (móveis, eletrodomésticos, brinquedos, utensílios de cozinha, embalagens de alimentos, latas de refrigerante, produtos de higiene, cosméticos e produtos farmacêuticos) ilustram bem a sua importância econômica no mundo contemporâneo. A própria reciclagem de embalagens de alumínio, setor no qual o Brasil se destaca, tem papel relevante do ponto de vista econômico, social e ambiental (CONSTANTINO et al., 2002).

Embora atualmente a forma mais conhecida do alumínio seja a metálica, o metal já foi considerado tão raro e precioso antes das descobertas de Charles Martin Hall e Paul-Louis Toussaint Héroult (1888), que chegou a ser exibido ao lado de

jóias da coroa e utilizado em lugar do ouro em jantares da nobreza no século XIX. Os compostos de alumínio, por outro lado, servem a humanidade há mais de 4000 anos. Diversos compostos de íons Al^{+3} apresentam relevância industrial no mundo atual, como por exemplo: $Al(OH)_3$, Al_2O_3, $Na[Al(OH)_4]$, $Al_2(SO_4)_3$ e haletos de alumínio, dos quais os dois primeiros, usados para a produção do metal, são os de maior importância econômica. Dentre as principais aplicações dos compostos de alumínio, destacam-se o tratamento para obtenção de água potável, o tingimento de tecidos, a manufatura de produtos de higiene, medicamentos, refratários e catalisadores (EVANS, 1995).

O alumínio não ocorre na forma elementar na natureza. Devido à alta afinidade pelo oxigênio, ele é encontrado como íon Al^{3+} , na forma combinada, em rochas e minerais. Embora constitua apenas cerca de 1% da massa da Terra, é o primeiro metal e o terceiro elemento químico (O= 45,5%; Si= 25,7%; Al= 8,3%; Fe= 6,2%; Ca= 4,6%; outros= 9,7% em massa) mais abundante da crosta, ou seja, da superfície que pode ser economicamente explorada pelo homem. O alumínio é encontrado em rochas ígneas, como os feldspatos (aluminossilicatos tridimensionais) e as micas (silicatos lamelares); em minerais como a criolita ($Na[AlF_6]$), o espinélio ($MgAl_2O_4$), a granada ($[Ca_3Al_2(SiO_4)_3]$) e o berilo ($Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$); e no coríndon (Al_2O_3) que é o mineral que apresenta o maior teor de Al (52,9%) (GREENWOOD, 1997).

Os processos que permitiram a produção do metal em escala industrial (o processo BAYER para produção de alumina, em 1888, e o de HALL-HEROULT da metalurgia do alumínio, em 1886) surgiram quase no final do século XIX. As primeiras fundições industriais de alumínio, baseadas no processo de eletrólise ígnea, iniciaram produção entre 1888 e 1889, em Pittsburgh (Inglaterra) e Nenhausen, na Suíça (MACHADO, 1962; MACHADO, 1985; VALETON, 1972).

É importante enfatizar que, na segunda metade do século XIX, quase toda a bauxita era produzida na França e empregada, basicamente, para fins não metalúrgicos. Naquela época, a produção de alumina destinava-se principalmente ao uso como mordente na indústria têxtil. No entanto, com o desenvolvimento do processo HALL-HEROULT (1886), a alumina disponível foi, de modo crescente, usada na produção de alumínio metálico. Mesmo assim, foi desenvolvido um grupo de aplicações para a bauxita não metalúrgica, no qual, incluem-se: abrasivos,

refratários, produtos químicos, cimentos de alta alumina, etc. (SAMPAIO; ANDRADE; DUTRA, 2005).

A bauxita só passou a representar papel econômico de destaque, no âmbito da economia mundial, a partir do término da Primeira Grande Guerra Mundial. Apenas em 1917, a produção mundial de bauxita atingiu 1 milhão de toneladas, com o surgimento de novos produtores, como Áustria, Hungria, Alemanha e Guiana Britânica.

As primeiras ocorrências brasileiras de bauxita, grau metalúrgico, foram detectadas entre os anos de 1916 e 1917, nas proximidades das cidades de Mariana e Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais (MACHADO, 1985).

3.6.2 Formação e Caracterização Mineralógica

A bauxita se forma em regiões tropicais e subtropicais, por ação do intemperismo sobre aluminossilicatos, caracterizados por taxas de precipitação pluviométricas excepcionalmente elevadas. Apesar de ser frequentemente descrita como o minério de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo, formado de uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados contendo impurezas. Os principais constituintes deste material são a gibbsita e os polimorfos boehmita, e diásporo, sendo que as proporções das três formas variam dependendo da localização geográfica do minério. As bauxitas mais ricas em boehmita são encontradas em depósitos europeus (França e Grécia) enquanto que, aquelas ricas em diásporo, na China, Hungria e Romênia. As bauxitas, geologicamente mais novas, possuem alto conteúdo de gibbsita, ocorrem em grandes depósitos, em áreas de clima tropical, como Jamaica, Brasil, Austrália, Guiné, Guiana, Suriname e Índia (KIRK, 1992; ULLMANN, 1998).

A gibbsita, a boehmita e o diásporo constituem o grupo de minerais de onde se pode extrair a alumina, sob a forma mono ou tri-hidratada. A alumina possível de ser extraída, sob as condições do processo Bayer de baixa ou alta temperatura, constitui a denominada alumina aproveitável.

A gibbsita tem a menor densidade, é a mais solúvel nas soluções de soda cáustica, para determinadas condições de concentração, temperatura e pressão de

digestão, e a mais macia dos três minerais de alumínio. A boehmita é relativamente menos solúvel que a gibbsita nessas soluções e intermediária entre os três, em termos de dureza e densidade. O diásporo é o mais duro, denso e menos solúvel nas soluções cáusticas, dentre os três minerais (PATTERSON, 1984).

As impurezas presentes na bauxita são óxidos de ferro (hematita, magnetita, goethita, entre outros), sílica, óxido de titânio e aluminossilicatos, em quantidades que variam com a região de origem, causando alterações no aspecto físico do minério, que podem variar de um sólido marron-escuro ferruginoso até um sólido de cor creme, duro e cristalino. (KIRK, 1992). A cor e a composição do sólido podem variar dentro de um mesmo depósito de bauxita. A composição típica da bauxita de uso industrial é: 40-60% de Al_2O_3; 12-30% de H_2O combinada; 1-15% de SiO_2 livre e combinada; 1-30% de Fe_2O_3; 3-4% de TiO_2; 0,05-0,2% de outros elementos e óxidos (GREENWOOD, 1997).

A sílica, sob a forma de quartzo, tem comportamento inerte no processo Bayer para produção de alumina. Entretanto, a sílica que integra a estrutura dos minerais de argila, denominada sílica reativa, reage com a soda cáustica durante a digestão da bauxita, formando compostos insolúveis, e o consumo desse insumo aumenta, em escala geométrica, à medida que cresce o teor dessa impureza no minério. Portanto, teores elevados de sílica reativa inviabilizam a utilização econômica da bauxita, como matéria-prima, para produção de alumínio (FLORES; DAMASCENO, 1998).

Os óxidos de ferro normalmente estão presentes na composição química das bauxitas sob a forma de hematita, goethita ou, ainda, uma mistura desses óxidos. Os óxidos de ferro, juntamente com outras impurezas, vão constituir as denominadas lamas vermelhas do processo Bayer para produção de alumina.

Os óxidos de titânio comumente presentes são o anatásio e o rutilo. O rutilo não reage durante o processo de digestão da bauxita, independente dessa digestão ocorrer à baixa ou alta temperatura. O anatásio, entretanto, é reativo nos processos ditos de alta temperatura, tendendo a inibir a precipitação da boehmita (FLORES; DAMASCENO, 1998).

Além dos minerais acima descritos, uma considerável variedade de elementos químicos e minerais podem estar presentes, em proporções consideradas pequenas, como cálcio, magnésio, fósforo, manganês, vanádio e gálio. Compostos orgânicos normalmente ocorrem associados ao horizonte constituído por solos, onde

o desenvolvimento da vegetação é frequentemente estimulado pelas altas taxas de precipitação pluviométrica, necessárias à consumação do processo de bauxitização (ANDREWS, 1984).

A caracterização do mineral ou minerais de alumínio presentes nas bauxitas, assim como das impurezas, é de fundamental importância na fixação e controle dos parâmetros extrativos, para a produção de alumina, com emprego do processo Bayer. A eficiência da extração da alumina é consequência direta da composição mineralógica, assim como, da temperatura e pressão de digestão do minério moído nas soluções de soda cáustica.

A concentração e natureza desses minerais irão conferir características importantes às bauxitas, que serão definidoras do seu emprego como matéria-prima para fabricação de outros produtos, como refratários, abrasivos, produtos químicos e outros (ANDREWS, 1984; HILL; OSTOJIC, 1984).

3.6.3 Lavra

Os métodos de lavra dos minérios de bauxita variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados das jazidas. A lavra desses minérios é feita, na maior parte, a céu aberto, segundo o método por tiras (*strip mining*). Estima-se que o maior número das jazidas de bauxita laterítica seja lavrada por método a céu aberto (RÖHRLICH et al., 2001). Menos de 20% da produção de bauxita no mundo é diversificado, dispondo-se desde a lavra manual até os métodos modernos com diversos tipos de equipamentos de mineração.

3.6.4 Beneficiamento Mineral

De acordo com Chaves et al. (2007), usinas de beneficiamento de bauxita só existem no Brasil. Nos outros países produtores, é normal explotar o minério mais rico e alimentá-lo direto na refinaria. Dependendo da relação sílica / alumina aproveitável, minérios mais pobres podem ser alimentados em refinarias

especialmente concebidas para eles. No Brasil, existe uma tradição e cultura no beneficiamento de bauxita:

• A Mineração Rio do Norte (MRN), em Oriximiná - PA, processa bauxita através da escrubagem, peneiramento, deslamagem em um complexo circuito de ciclones e filtragem em filtros a vácuo;

• A Mineração Santa Lucrécia, em Monte Dourado - PA, possui um circuito que beneficia bauxita grau cerâmico, através da separação em meio denso com o *dinawhirlpool* (DWP);

• A Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), em Poços de Caldas - MG, utiliza escrubagem, catação ótica e a deslamagem em ciclones;

• A CBA, em Itamarati de Minas - MG, desagrega, peneira, deslama, e utiliza um circuito de concentração gravítica para recuperar os finos de bauxita;

• A Mineração Rio Pomba, em Mercês - MG, utiliza jigues para separar a sílica grosseira;

• A VALE iniciou um novo projeto em Paragominas - PA, utilizando moagem semi-autógena, deslamagem em ciclones e transporte da polpa por mineroduto.

3.6.5 Reservas

As principais reservas de bauxita são encontradas na África (33%), Oceania (24%), América do Sul e Caribe (22%), Ásia (15%) e outros (6%), sendo que as três maiores localizam-se na Guiné (1º), na Austrália (2º) e no Vietnam (3º). Estima-se que a reserva total deva ser suficiente para a demanda de alumínio no século XXI (BRAY, 2009).

Em 2007, o Brasil detinha 3,5 bilhões de toneladas das reservas mundiais de bauxita (ou seja, 11% do total), das quais 97% encontravam-se no Pará (MÁRTIRES; SANTANA, 2008).

3.6.6 Produção

De acordo com Mártires (2008) a produção mundial de bauxita em 2007 foi 8,4% superior à de 2006, passando de 178 milhões de toneladas (Mt) em 2006 para 194 Mt em 2007, num cenário em que o Brasil voltou a ocupar o 3º lugar entre os principais produtores respondendo por 12,7%, sendo ultrapassado pela China que respondeu por 16,5% a qual teve sua produção elevada em 52% no período. A Austrália é o maior produtor respondendo por 33% da produção mundial.

Segundo o mesmo autor, com a entrada em operação da Mina da VALE em Paragominas, no Estado do Pará, em 2007 (1,85 Mt), a produção de bauxita cresceu 8,6% atingindo o recorde de 24,7 Mt, apresentando uma nova distribuição na produção de bauxita metalúrgica por empresa: Mineração Rio do Norte (MRN) (73%), Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) (11,5%), VALE (7,5%), Alcoa (4,9%) e Novelis (1,9%).

3.7 A MINA DE BAUXITA DE PARAGOMINAS

A Mina de Bauxita de Paragominas (MBP), pertencente à VALE, está localizada a 64 km do centro urbano da cidade de Paragominas, no nordeste do estado do Pará, e a 350 km da capital Belém. Descoberta por exploradores da Mineradora Rio Tinto na década de 1970, este projeto está diretamente ligado aos programas de expansão da refinaria de alumina Alumínio do Norte do Brasil S.A. (ALUNORTE), localizada no município de Barcarena, região metropolitana de Belém.

O empreendimento foi idealizado para operar em três fases. A fase I entrou em operação no primeiro trimestre de 2007 e possui capacidade nominal de produzir 4,95 Mt/ano de bauxita. Para a fase II, que entrou em operação no segundo trimestre de 2008, está previsto um acréscimo na produção de 4,95 Mt/ano de bauxita. Já a fase III será integrada à nova

refinaria de alumina a ser implantada nas proximidades da ALUNORTE, em Barcarena, em parceria da VALE com a empresa norueguesa Norsk Hydro. A fase III produzirá mais 4,95 Mt/ano de bauxita, quando estará totalmente concluída.

A bauxita de Paragominas possui teores médios de 50% de alumina aproveitável, 4% de sílica reativa, granulometria abaixo de 6,5" e umidade de 12% a 13% (VALE, 2009).

Em Paragominas, a bauxita ocorre em platôs (terrenos elevados e planos). Alguns, como o chamado Miltônia, a cerca de 60 km da cidade, têm uma camada de bauxita, em torno de 2 m de espessura, coberta com uma camada estéril, principalmente de argila, que tem, em média, 11 m sobre o platô (VALE, 2008).

Um perfil típico do depósito Miltônia compreende as seguintes camadas a partir do topo: solo orgânico e argila, bauxita nodular, laterita ferruginosa, bauxita cristalizada – minério principal, bauxita amorfa e argila mosqueada (MENDES et al., 2008).

O transporte da polpa de bauxita pelo mineroduto requer que as operações de cominuição e formação da polpa sejam muito bem controladas.

De acordo com Mendes et al. (2008), as especificações da bauxita para alimentar a refinaria da ALUNORTE são as seguintes:

- Bauxita gibbsítica;
- Teor de alumina aproveitável > 48%;
- Teor de sílica reativa < 3%;
- Teor insignificante de contaminantes químicos;
- Extração de 100% da alumina aproveitável;
- Dessilicificação em aproximadamente 60 minutos a 145 – 155 ^{o} C;
- Taxa de sedimentação da lama vermelha maior que 8 m/h;
- Compactação da lama maior que 35% sólidos.

A produção de bauxita em Paragominas compreende três atividades: a lavra, o beneficiamento e o transporte do produto pelo mineroduto para a refinaria de alumina, as quais serão descritas a seguir.

3.7.1 Lavra

A mineralização de bauxita em Paragominas ocorre em camadas horizontais, associadas a platôs (planaltos), e por este motivo foi adotado o método de lavra por tiras (*strip minning*). A área atualmente lavrada e também onde se encontra a planta industrial é o platô Miltônia 3, cujos recursos medidos e indicados são da ordem de 98 milhões de toneladas, o que representa uma vida útil estimada de 20 anos. O platô Miltônia 5, localizado a 8 km do anterior, abastecerá a fase III.

A cada ano será lavrada uma área de aproximadamente 210 hectares, com operação inteiramente mecânica, sem o uso de explosivos, que se completa em quatro etapas de acordo com as Figura 7 e 8: (VALE, 2008)

- Preparação e limpeza da área, incluindo, onde necessário, a retirada da cobertura vegetal. O solo vegetal é estocado para, depois, ser utilizado na recomposição da área lavrada;
- Abertura da mina, com remoção da camada argilosa que cobre a bauxita;
- Escavação para retirada da bauxita da jazida e seu transporte, em grandes caminhões, para a área de britagem;
- Reflorestamento, com plantio de espécies nativas.

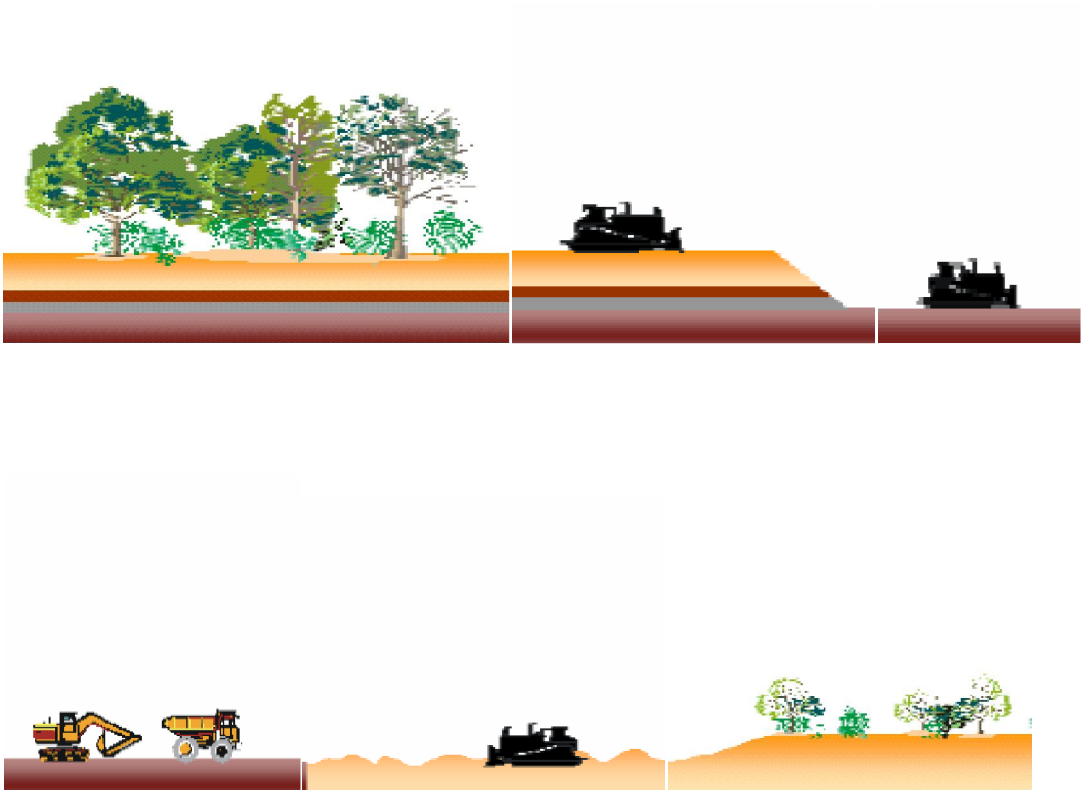

Figura 7 - Sequência das operações de lavra da MBP

Figura 8 - Lavra por tiras

3.7.2 Descrição do Processo de Beneficiamento

A planta industrial consiste de duas linhas paralelas de circuitos iguais. Cada uma conta com um moinho semi-autógeno (SAG) seguido por um moinho de bolas e um britador, este último operando em circuito aberto. Segue uma breve descrição do circuito (MENDES et al., 2008).

O processo industrial compreende quatro estágios, como segue:

- Britagem e estocagem em pilhas;
- Moagem grosseira e deslamagem;
- Moagem fina e;
- Desaguamento e peneiramento final.

A recuperação de água de processo e a disposição do rejeito estão incluídas também na área industrial.

Essencialmente, o fluxograma de processo compreende, para cada linha, uma sequência de operações de fragmentação e etapas de classificação para remoção de argilas e, com isso, alcançar as especificações de distribuição granulométrica. A argila é a principal fonte de sílica reativa. Assim, a fragmentação primária, realizada em dois estágios por britadores de rolos dentados *(sizers)* e um moinho SAG, expõe a argila que se encontra nos vazios no interior da massa gibbsítica. O produto do moinho SAG é descarregado em uma peneira vibratória horizontal, cujo *undersize* segue uma seqüência de duas etapas de classificação realizadas numa série de hidrociclones. A fração fina, combinada destas etapas, é deslamada em hidrociclones, cujo *overflow* é depois espessado e bombeado para a bacia de rejeitos. A fração grosseira do estágio de deslamagem é desaguada antes de ir para o produto final da usina. A fração grosseira dos primeiros dois estágios de hidrociclonagem é bombeada para o circuito do moinho de bolas, o qual também processa o *oversize* da peneira do moinho SAG. Este último é previamente britado em um britador de impacto.

O circuito do moinho de bolas compreende uma configuração convencional em circuito fechado com hidrociclones, cujo *overflow* é desaguado e peneirado antes

de ir para tanques de estocagem de produto final. O peneiramento final é conduzido em peneiras tipo DSM para garantir a especificação de *top size*.

Uma combinação de hidrociclones e espessadores é usada para recuperar a água de recirculação da usina. Os rejeitos são bombeados para a bacia de rejeitos, onde áreas de secagem são cercadas por diques de terra, de modo a construir-se em camadas que parcialmente preenchem o vale adjacente à usina. O fluxograma de processo é apresentado na Figura 9.

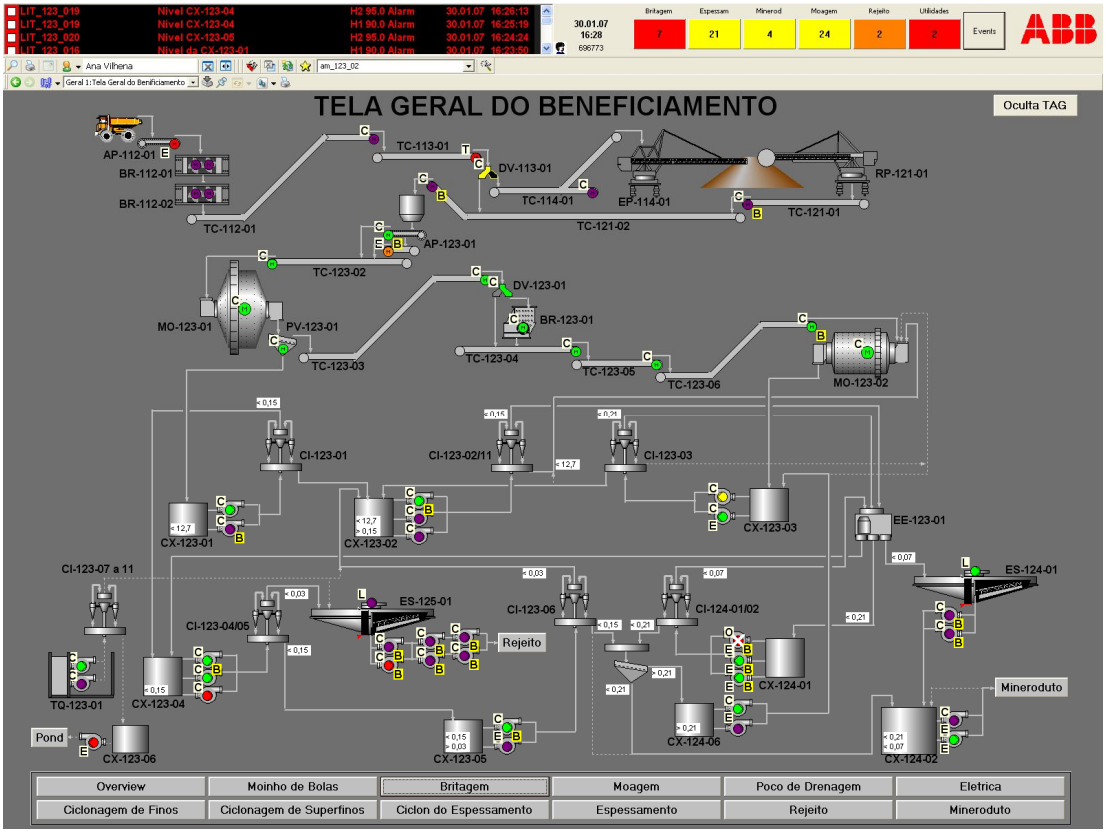

Figura 9 - Fluxograma de beneficiamento da MBP
Fonte: Mendes et al. (2008)

3.7.2.1 Britagem e estocagem em pilhas

A bauxita que vem da mina (ROM) é despejada por caminhões em uma moega que alimenta o britador primário. Assim, o britador de rolos dentados primário

foi projetado para britar os blocos de ROM de aproximadamente 1,2 m a 300 mm. Um estágio secundário de britagem com britador de rolos dentados reduz o *top size* a uma faixa nominal de 200 – 150 mm.

O minério britado é conduzido, por um transportador de correia de 42” de largura, a uma pilha de homogeneização adjacente à planta de britagem. O sistema de estocagem e homogeneização de 200 kt de minério consiste de um *stacker,* com capacidade de 2800 t/h, que empilha a bauxita britada no padrão *windrow*, bem como uma retomadora de roda de caçamba. Um sistema auxiliar promove uma alternativa de *by-pass* da pilha de estocagem, isto é, o produto do britador secundário pode ser desviado para a planta de moagem.

3.7.2.2 Moagem grosseira e deslamagem

A bauxita britada retomada é transportada para um silo projetado para capacidade de 24 minutos. Um alimentador modula a vazão de saída de bauxita do silo para alimentar um moinho SAG de 26’ x 16’ o qual é acionado por coroa/pinhão e um motor de 6500 hp. O conjunto de acionamento é dotado de dispositivo que permite, dentro de limites, a variação de velocidade de rotação do moinho SAG. Os principais parâmetros do moinho SAG são:

- Vazão de alimentação nominal: 754 t/h (seca);
- Volume carregado: 30%;
- Carga de bolas: 13% máximo;
- Velocidade de rotação: 65 – 80% do valor crítico;
- Abertura da grelha: 65 mm.

O moinho SAG opera sob uma diluição relativamente alta (55% de concentração de sólidos) a fim de proporcionar um baixo tempo de residência para os finos na câmara do moinho. Tal procedimento se destina a evitar uma sobremoagem no mesmo, uma vez que afeta diretamente a recuperação em massa global da usina.

A abertura da grelha foi selecionada para proporcionar um fluxo de polpa relativamente alto através do moinho SAG, bem como descarregar rapidamente os seixos da câmara do moinho. A abertura da grelha impede, portanto, que os seixos acumulem na câmara do moinho. Os seixos são britados, em um britador de impacto marca Hazemag, cujo produto é transportado ao circuito do moinho de bolas.

O moinho SAG descarrega em uma peneira vibratória horizontal de 8'x 20'. O *oversize* da peneira (>12 mm) é levado para o britador de impacto, cujo produto (P_{80} ≅ 12 mm) é transportado para o circuito do moinho de bolas.

O *undersize* da peneira é classificado em dois estágios consecutivos de hidrociclones de 26" de diâmetro. O *underflow* do hidrociclone primário alimenta o secundário. Estes estágios de hidrociclonagem são chamados de "Finos". O tamanho de corte nominal do primeiro estágio é 65# (0,21 mm), enquanto que no secundo estágio é de 100# (0,15 mm).

Os *overflows* combinados dos "Finos" são bombeados para os estágios de deslamagem, que consistem em dois arranjos de hidrociclones de 10", ambos projetados para *overflow* com tamanho máximo de 0,037 mm. Estes dois estágios juntos de hidrociclones são chamados de "Ultrafinos". O *overflow* combinado dos "Ultrafinos" é conduzido ao espessador de rejeito, enquanto que o *underflow* do segundo estágio é bombeado para o peneiramento do produto final.

A fração -12,0 + 0,21 mm dos "Finos" é bombeada para o circuito do moinho de bolas para moagem fina.

3.7.2.3 Moagem fina

Os seixos britados junto com a fração -12,0 + 0,21 mm são alimentados em um único moinho de bolas de 21'x 32', com velocidade fixa, acionado por um motor de 9600 hp. Os principais parâmetros de operação do moinho de bolas são:

- Carga de bolas: 28%;
- Modo de descarga: *overflow*;
- Velocidade de rotação: 74% do valor crítico.

O moinho de bolas opera em circuito fechado, com um arranjo de 12 hidrociclones de 26”, chamado “Classificação”, operando para se obter *overflow* com P_{80} nominal de 0,21 mm. O *underflow* combinado é retornado à alimentação do moinho de bolas, enquanto que o *overflow* combinado é bombeado ao estágio de desaguamento.

3.7.2.4 Desaguamento e peneiramento final

O estágio de desaguamento consiste em um arranjo de hidrociclones de 10”, e um espessador, este último alimentado pelo *overflow* do primeiro. O *underflow* dos hidrociclones desaguadores, junto com o *underflow* do espessador, é conduzido por ação da gravidade até as peneiras DSM, as quais foram projetadas para garantir um *top size* de 48# (0,30 mm) para o produto final.

Como o circuito do moinho de bolas foi projetado para produzir 90-95% passante em 0,30 mm, o *oversize* da peneira DSM é dirigido para o moinho de bolas, enquanto a fração *undersize* é bombeada para tanques de estocagem, localizados perto da estação de bombeamento do mineroduto.

A concentração de sólidos do produto final é controlada pelos hidrociclones desaguadores, junto com o tempo de residência no espessador, para conseguir o objetivo de 52%.

A usina de beneficiamento é bem equipada com instrumentos e automação. O sistema de controle é avaliado pelos operadores da usina, que possuem uma visão geral do circuito através de painéis na sala de controle.

3.7.3 Transporte do Produto pelo Mineroduto

De acordo com Gandhi et al. (2008), o minério beneficiado na usina industrial é enviado para ALUNORTE, em Barcarena, na forma de polpa, com 50% de concentração de sólidos, por um mineroduto de 244 km de extensão e 24” de diâmetro, que atravessa sete municípios (Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açu,

Acará, Mojú, Abaetetuba e Barcarena), quatro grandes rios (Capim, Acará Mirim, Acará e Mojú) e também quatro rodovias estaduais (PA-256, PA-451, PA-252 e PA-151). O mineroduto de bauxita compartilha o mesmo trajeto de dois outros minerodutos de caulim existentes na região, entre os municípios de Tomé-Açu e Barcarena, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Percurso do mineroduto da MBP

Na refinaria da ALUNORTE, a polpa é desaguada, em filtros de pressão hiperbárica, para atingir 12% de umidade no produto.

A alternativa de transporte por mineroduto, apesar de exigir um investimento inicial maciço, apresenta alta eficiência e segurança operacional, isso porque são utilizadas tecnologias avançadas, com sistema automático de supervisão instalado

em vários pontos de monitoramento do fluxo de minério, que evita a ocorrência de vazamentos, permitindo uma operação segura e confiável.

A qualidade da polpa de bauxita é monitorada continuamente. As principais características monitoradas são: reologia, densidade e distribuição granulométrica. Se qualquer propriedade da polpa ficar fora do mínimo especificado para o transporte, ela é ajustada antes do embarque. Um laboratório completo é mantido, pela VALE, na mina e cada lote de polpa é testado e aprovado para o transporte no mineroduto (GANDHI et al., 2008).

Outra vantagem do mineroduto, pelo fato de estar em subsolo, é o baixo impacto ambiental causado nas regiões por onde atravessa.

A VALE é a primeira empresa do mundo a utilizar um mineroduto para escoamento de bauxita e, com isso, derrubou o paradigma que imperava na indústria mineral de que o comportamento reológico da polpa de bauxita impediria seu transporte em duto, em função da escala industrial e da longa distância (GANDHI et al., 2008).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Amostra de Bauxita

A amostra de bauxita foi fornecida pela VALE, para realização dos ensaios, e foi obtida a partir da pilha de homogeneização do circuito industrial da usina de beneficiamento da MBP. O minério utilizado nos ensaios de escrubagem, tanto de laboratório quanto de escala piloto, foi o do platô Miltônia 3. O procedimento para obtenção da amostra primária consistiu da retirada de incrementos desta pilha, formação de uma pilha alongada para homogeneização dos incrementos e retirada da amostra final para trabalho.

Uma amostra representativa deste material foi acondicionada em uma bombona de 200 L e transportada até as dependências do Laboratório de Simulação e Controle (LSC) do Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo (PMI) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) em São Paulo - SP.

4.2 MÉTODOS

A metodologia empregada na execução deste trabalho consistiu das seguintes etapas:

a) Execução de ensaios de escrubagem, em escala de laboratório, através de planejamento fatorial, seguida de análise granulométrica do produto desagregado;
b) Execução de ensaios de escrubagem, em escala piloto, mediante planejamento específico, para escolha das variáveis selecionadas, seguida de

amostragem e análise granulométrica das amostras dos fluxos de alimentação, *oversize* e *undersize* do circuito;

Cada uma das etapas do método adotado é descrita a seguir.

4.2.1 Ensaios de Escrubagem em Escala de Laboratório

Os ensaios de escrubagem, em escala de laboratório, tiveram por objetivo verificar a influência de variáveis operacionais no desempenho do processo. As variáveis estudadas foram as seguintes: grau de enchimento (Ge), tempo de residência da polpa (t_r) e velocidade de rotação (Vr). Os dados gerados foram empregados para elaboração de um modelo matemático empírico da operação.

4.2.1.1 Equipamento utilizado

Os equipamentos utilizados nos ensaios de escrubagem (Figura 11) foram: um tambor metálico e um acionador com ajuste da velocidade de rotação.

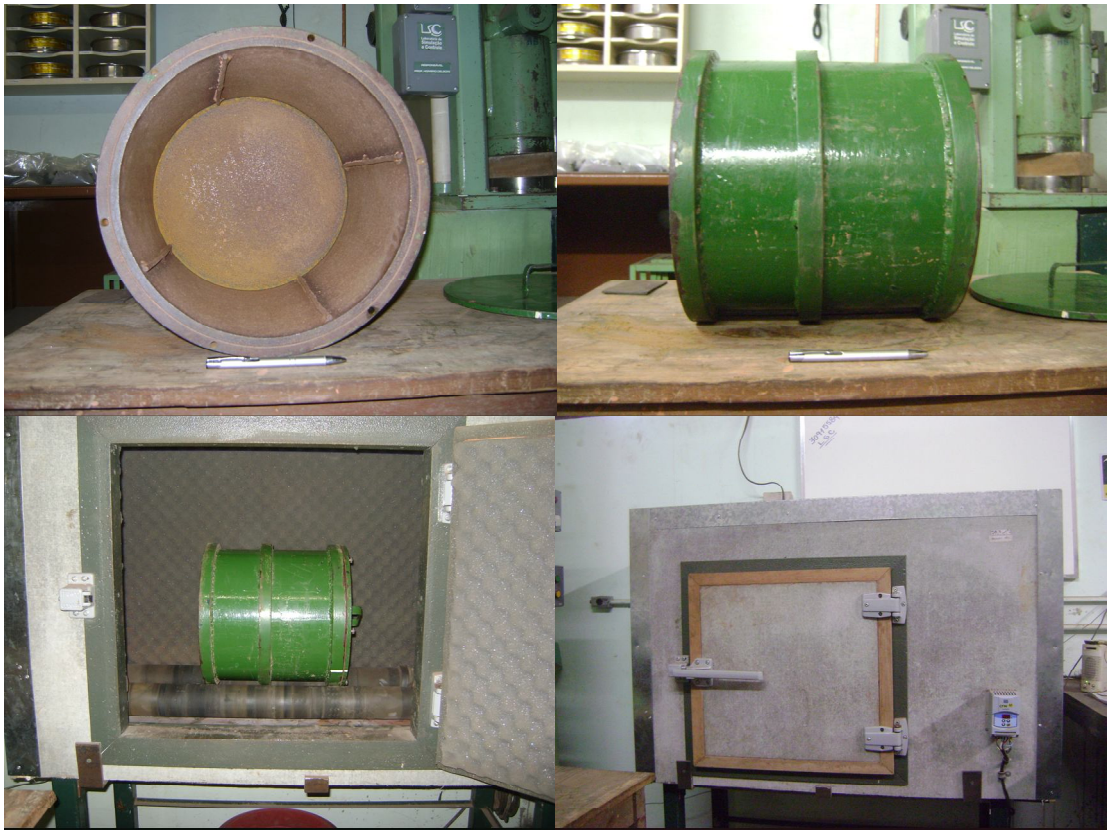

Figura 11 - Equipamento utilizado nos ensaios de escrubagem em escala de laboratório

As características do cilindro metálico são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Características do cilindro utilizado nos ensaios de laboratório

Características	**Valor**
Comprimento interno:	305 mm
Diâmetro interno:	305 mm
Relação de aspecto (L/D):	1:1
Altura das aletas de revolvimento:	6 mm
Quantidade de aletas:	4
Volume do cilindro:	22,3 L
Velocidade crítica (Vc):	76,6 rpm

4.2.1.2 Preparação das amostras

A sequência das etapas de preparação da amostra de bauxita para os ensaios foi a seguinte:

- Peneiramento de todo material na malha de 76,2 mm;
- Britagem do material retido na malha de 76,2 mm até que todo produto passasse nesta malha;
- Secagem do minério em estufa a 100 ºC;
- Homogeneização do material em pilha prismática alongada;
- Quarteamento a fim de se obter alíquotas para realização dos ensaios.

As amostras para realização dos ensaios apresentaram as seguintes características:

- Tamanho máximo: 100% passante na peneira de abertura 76,2 mm;
- Densidade do minério: 2,7.
- Massa de sólidos para os ensaios: 813 g e 1626 g, determinadas para graus de enchimento de 5 e 10%, respectivamente. Estas massas foram determinadas pela equação 4.1:

$$Ms = \frac{Vu \cdot ds}{1 + ds} \qquad 4.1$$

Onde:

Ms é a massa do sólido;

Vu é o volume útil do *scrubber*;

ds é a densidade do sólido.

4.2.1.3 Determinação da distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios

Para determinar a distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios, foram tomadas três alíquotas da pilha alongada, as quais foram submetidas, separadamente, a peneiramento manual a úmido.

A partir destas distribuições granulométricas, determinou-se a distribuição média da alimentação e o desvio-padrão associado a cada abertura das peneiras.

4.2.1.4 Execução dos ensaios

O programa de ensaios foi planejado de forma a permitir a análise da influência das variáveis operacionais do processo de escrubagem na desagregação da amostra de bauxita de Paragominas.

O método adotado para execução dos ensaios foi baseado num planejamento fatorial 2^3 (BARROS NETO et al., 2001). Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis selecionadas para o estudo e seus respectivos níveis de trabalho.

Tabela 2 – Variáveis operacionais e seus respectivos níveis

Variáveis Operacionais	**Níveis**
Grau de Enchimento – (%)	5 e 10
Tempo de Residência da Polpa – (min)	1 e 3
Velocidade de Rotação – (%Vc)	28,4 e 41,4

Os ensaios foram realizados em duplicata, em ordem aleatória e com concentração de sólidos da polpa de 50%.

As condições operacionais de cada ensaio são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de realização dos ensaios de escrubagem escala de laboratório

Ordem	**Ensaio**	**Ge (%)**	**t_r (min)**	**Vr (%Vc)**
3	1	5	1	28,4
4	2	10	1	28,4
2	3	5	3	28,4
1	4	10	3	28,4
6	5	5	1	41,4
8	6	10	1	41,4
7	7	5	3	41,4
5	8	10	3	41,4

Os parâmetros de resposta utilizados para avaliar a desagregação ocorrida durante os ensaios foram: a distribuição granulométrica e a porcentagem passante em peneira de abertura 0,037 mm (400 #) do produto desagregado, a qual foi denominada de finos no produto (FP). Neste trabalho, considerou-se finos, as partículas com tamanhos inferiores a 0,037 mm, pois é abaixo desta granulometria que se encontra o argilomineral caulinita, principal portador da sílica reativa, contaminante do minério, a qual deve ser individualizada e separada.

4.2.2 Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto

Foram realizados ensaios de escrubagem, em processo contínuo e escala piloto, para verificação de aplicabilidade do modelo proposto, desenvolvido em processo descontínuo de laboratório, bem como para analisar a influência das condições operacionais na desagregação da bauxita de Paragominas.

4.2.2.1 Instalação piloto de escrubagem

Os ensaios foram realizados numa instalação piloto de escrubagem montada ao lado da usina industrial da MBP conforme mostra a Figura 12. A unidade piloto era constituída dos seguintes equipamentos:

- *Scrubber*;
- *Trommel* com abertura da tela da peneira de 6,35 mm (¼");
- Transportador de correia;
- Caixa de alimentação;
- Motor de 15 cv com redutor para acionamento do *scrubber-trommel*;

As características do *scrubber* piloto são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Características do *scrubber* piloto

Características	**Valor**
Comprimento interno:	1,95 m
Diâmetro interno:	1,00 m
Relação de aspecto (L/D):	≅ 2:1
Volume do *scrubber*:	1,53 m^3
Largura do anel interno:	95 mm
Volume útil:	0,0739 m^3
Velocidade crítica (Vc):	42,3 rpm

Figura 12 - Instalação piloto de escrubagem

4.2.2.2 Execução dos ensaios

Os trabalhos experimentais foram realizados nas instalações industriais da MBP, no município de Paragominas no Estado do Pará. A campanha consistiu, preliminarmente, na execução de ensaios exploratórios de escrubagem, os quais tiveram os seguintes objetivos: definir os valores das variáveis selecionadas com os quais se iriam trabalhar e treinar a equipe de operadores para realização da amostragem e das medidas que se fizessem necessárias.

Em seguida executou-se uma programação de dez ensaios no *scrubber* piloto com o mesmo minério utilizado nos ensaios de laboratório e que alimentava a usina de beneficiamento da MBP à época, proveniente do platô Miltônia 3, sob diferentes condições operacionais, com retirada de amostras representativas dos fluxos de alimentação, *oversize* e *undersize*. As amostras foram tratadas e analisadas quanto a seus principais parâmetros como distribuição granulométrica, vazão, umidade e concentração de sólidos.

Os parâmetros estudados nestes ensaios foram os seguintes: concentração de sólidos da polpa de alimentação, tempo de residência da polpa e velocidade de rotação do *scrubber*.

A Tabela 5 mostra as variáveis selecionadas e as faixas de valores adotadas nos ensaios.

Tabela 5 – Condições de realização dos ensaios de escrubagem em escala piloto

Ensaio	Vr (% Vc)	C_w (%)	t_r (min)
1	41,4	50	3,24
2	28,4	50	3,24
3	41,4	55	3,73
4	28,4	55	3,73
5	41,4	50	1,62
6	28,4	50	1,62
7	41,4	55	1,87
8	28,4	55	1,87
9	41,4	50	1,08
10	28,4	50	1,08

Os ensaios foram conduzidos com grau de enchimento de 5%, pois o objetivo não era fragmentar o material, gerando novos finos, e sim, apenas lavá-lo para retirada dos finos naturais do minério. Segundo Delboni Jr.[2] , estes finos devem apresentar conteúdo alto de caulinita, que eleva o teor de sílica reativa. Já os finos produzidos por fragmentação das partículas são pobres em sílica reativa e ricos em gibbsita, e o seu descarte diminuiria a recuperação em massa do processo, bem como a recuperação metalúrgica de alumina aproveitável.

O controle da medida da vazão de água da alimentação e da polpa de *undersize* foi feito através de recipiente graduado e cronômetro.

Foram executadas medidas das vazões de sólidos da alimentação, das vazões de polpa do *undersize* e *oversize* bem como da umidade da alimentação e do *oversize* e a concentração de sólidos da polpa de *undersize*.

A execução dos ensaios consistiu de alimentar o *scrubber* na vazão de alimentação estipulada na programação, operar o equipamento por 30 minutos nas condições pré-estabelecidas, para que entrasse em regime, e em seguida proceder à amostragem.

Na Figura 13 é possível observar o interior do *scrubber* piloto em operação.

[2] DELBONI JR., H. (Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). Comunicação pessoal, 2009.

Figura 13 - Vista do interior do *scrubber*

O plano de amostragem consistiu da retirada de três incrementos, a cada 10 minutos, de cada um dos fluxos de alimentação, *oversize* e *undersize*.

As amostras eram acondicionadas em bombonas de 200 L, conforme mostra a Figura 14, identificadas e enviadas ao laboratório físico da Planta Piloto de Paragominas (PPP) para realização de análises granulométricas.

As análises granulométricas foram realizadas por peneiramento a úmido das amostras dos fluxos de alimentação, *oversize* e *undersize* de todos os dez ensaios.

Foram utilizadas 22 peneiras nas seguintes aberturas: 152,8; 127,0; 101,6; 76,2; 50,8; 25,4; 12,7; 9,53; 6,35; 4,76; 3,33; 2,00; 1,40; 0,841; 0,595; 0,420; 0,297; 0,210; 0,149; 0,074; 0,044; e 0,037 mm;

Figura 14 - Coleta das amostras

4.2.2.3 Balanço de massas

De acordo com Chaves (2002), o balanço de uma usina, seja de massas, metalúrgico ou de água, é o conceito mais importante do tratamento de minérios. Ele consiste em nada mais nada menos que a aplicação da Lei de Lavoisier[3]: todas as massas que entram numa operação de tratamento têm que sair em seus produtos, não há geração nem consumo de massas no tratamento de minérios (Figura 15).

Os balanços de massa e metalúrgico de um circuito podem ser estimados através de vários procedimentos independentes. Se os valores medidos não contivessem erros, todos os procedimentos gerariam os mesmos resultados. No

[3] Químico francês que por volta de 1774, através de seus trabalhos, pôde enunciar uma lei que ficou conhecida como Lei de Conservação das Massas ou Lei de Lavoisier, cujo enunciado é o seguinte: “Numa reação química que ocorre em sistema fechado, a massa total antes da reação é igual à massa total após a reação”, ou uma interpretação livre: “Na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma.”

entanto, isto não se observa na prática, tendo em vista que a medida experimental está sujeita a erros provenientes de várias fontes e que acabam por não satisfazer os princípios da conservação das massas. Desta forma, é necessária a realização de ajustes, utilizando-se métodos matemáticos, a fim de se obterem valores consistentes. O uso desses procedimentos matemáticos, para ajustes dos dados, não dispensa o conhecimento técnico por parte de quem formula a solução, pois é necessária uma análise crítica das respostas, que poderão ser corretas do ponto de vista matemático, mas nem sempre serão verdadeiras, no que se refere ao beneficiamento mineral (NUNES, 1992).

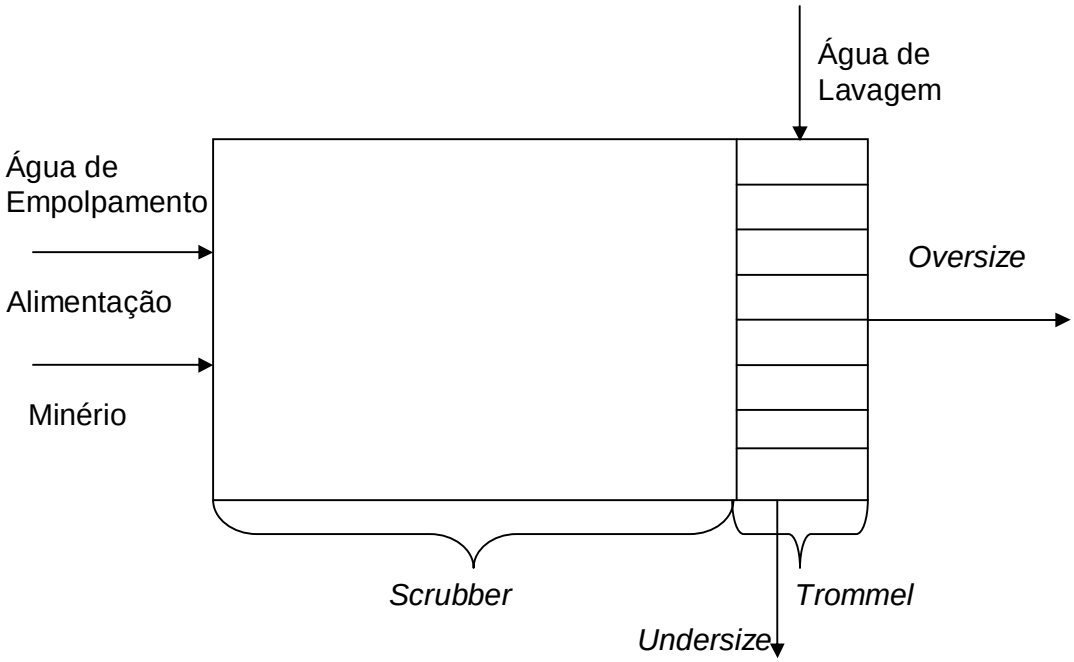

Figura 15 - Desenho esquemático do balanço de massas da operação de escrubagem

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIOS DE ESCRUBAGEM EM ESCALA DE LABORATORIO

5.1.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios

A distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios é mostrada na Figura 16 e indica que cerca de 90% das partículas possuem tamanho menores que 50,8 mm, 50% encontram-se abaixo de 9,53 mm e 23% estão abaixo de 0,037 mm.

A distribuição apresenta um ponto com desvio maior (5,7%), em relação aos outros, na peneira de abertura 50,8 mm, provavelmente devido a irregularidades na quantidade de partículas com tamanho superiores a esta abertura.

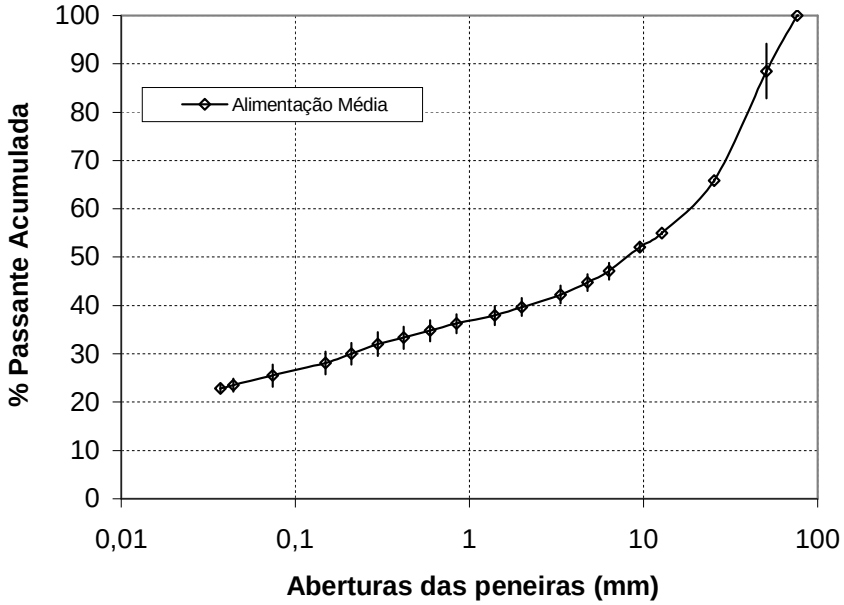

Figura 16 - Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios de laboratório

A tabela com os resultados das distribuições granulométricas das três amostras analisadas, da distribuição granulométrica média, bem como dos desvios-padrão, é apresentada no apêndice A.

5.1.2 Efeito do Grau de Enchimento na Desagregação da Bauxita

O efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita, em diferentes condições operacionais, pode ser observado nos gráficos das Figuras 17, 18, 19 e 20.

A Figura 17 mostra as distribuições granulométricas da alimentação e dos produtos da escrubagem, com Ge de 5 e 10%, nas condições de t_r 1min e Vr 28,4% Vc. Nesta figura pode-se observar que não houve mudança significativa na distribuição granulométrica do produto, quando se trabalhou com 5% de Ge, em relação à distribuição da alimentação. No entanto, quando se trabalhou com 10% de Ge, observou-se uma nítida mudança no comportamento da distribuição granulométrica do produto, com um aumento da fração de finos passante praticamente em todas as aberturas das peneiras. É neste gráfico que se observa o maior efeito na desagregação da bauxita, quando se aumenta o grau de enchimento de 5 para 10%.

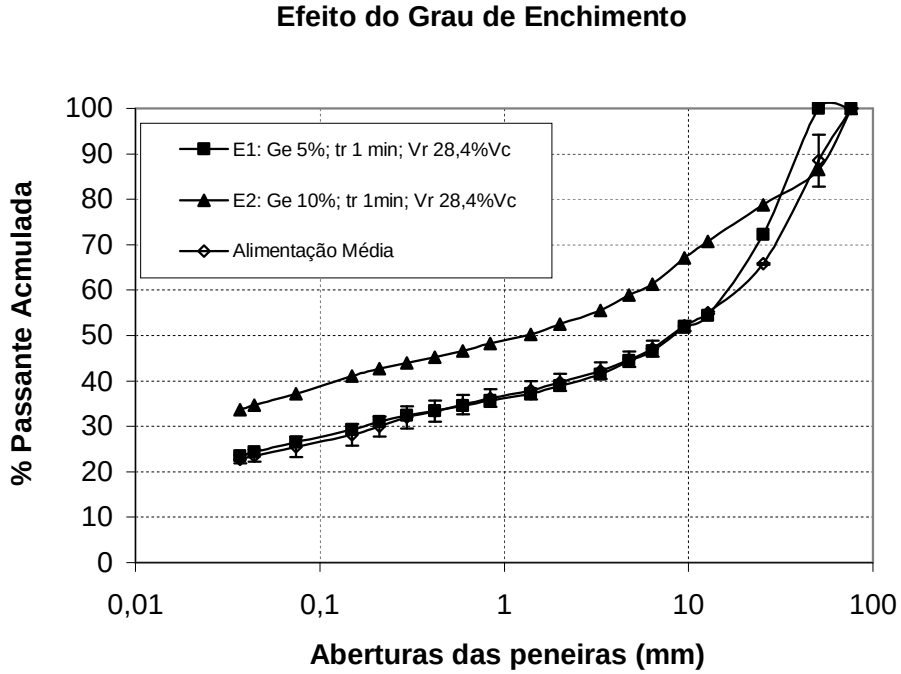

Figura 17 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 1 min e Vr 28,4% Vc

A Figura 18 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Ge de 5 e 10%, nas condições de t_r 3min e Vr 28,4% Vc. Nesta figura é possível observar que quando se aumentou o Ge de 5 para 10%, houve um leve aumento na desagregação do produto, indicada pelo aumento da fração passante nas peneiras.

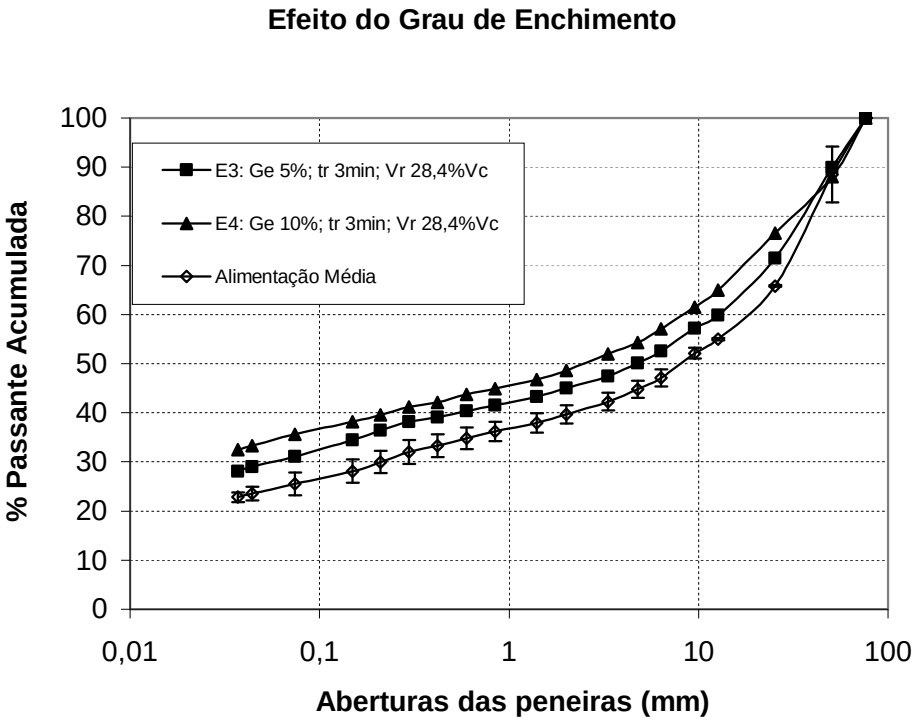

Figura 18 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 3 min e Vr 28,4% Vc

A Figura 19 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Ge de 5 e 10%, nas condições de t_r 1min e Vr 41,4% Vc. Nesta figura é possível observar que houve desagregação, entretanto, os produtos apresentaram, praticamente, a mesma distribuição granulométrica.

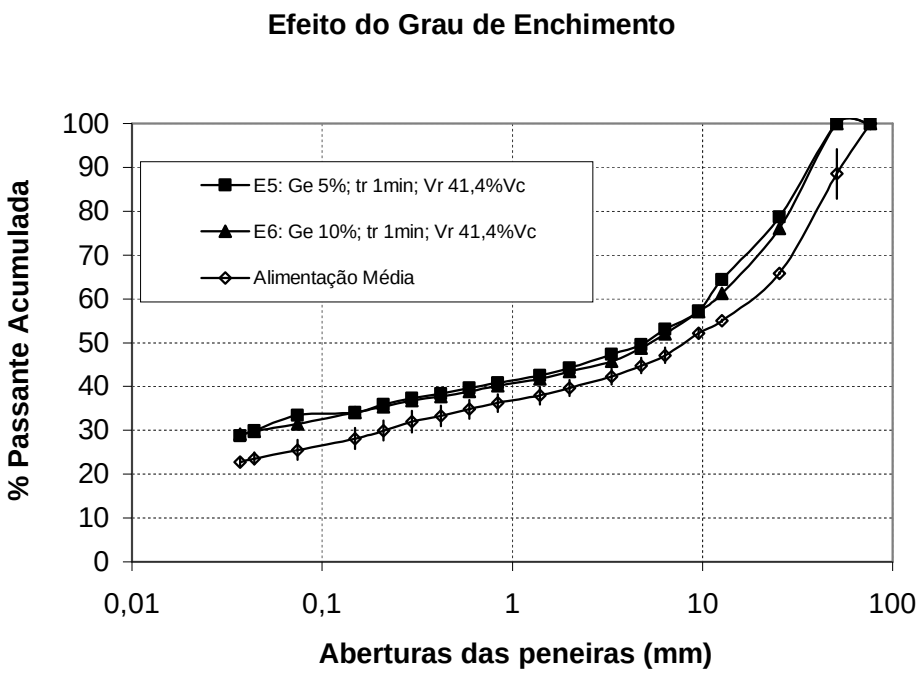

Figura 19 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 1 min e Vr 41,4% Vc

A Figura 20 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Ge de 5 e 10%, nas condições de t_r 3min e Vr 41,4% Vc. Nesta figura é possível observar o comportamento da distribuição granulométrica dos produtos semelhante ao da Figura 19.

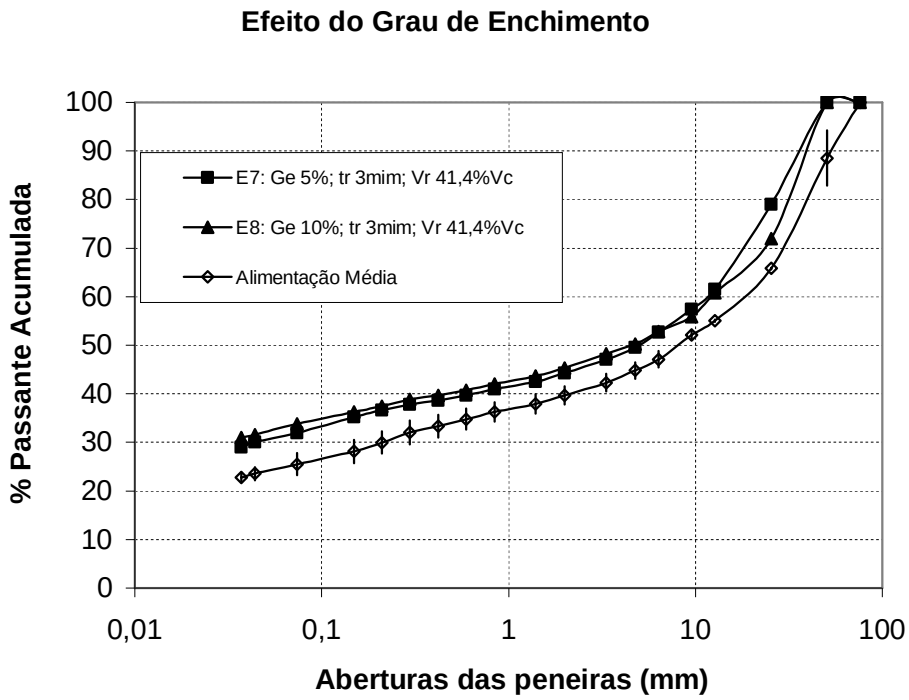

Figura 20 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito do grau de enchimento na desagregação da bauxita - condição de operação: t_r 3 min e Vr 41,4% Vc

5.1.3 Efeito do Tempo de Residência da Polpa na Desagregação da Bauxita

O efeito do tempo de residência da polpa, em diferentes condições operacionais, pode ser observado nos gráficos das Figuras 21, 22, 23 e 24.

A Figura 21 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com t_r de 1 e 3 min, nas condições de Ge 5% e Vr 28,4% Vc. Observa-se que no tempo de residência de 1 min, não houve mudança significativa na distribuição granulométrica do produto, quando comparado com a distribuição da alimentação. No entanto, quando se trabalhou com 3 min de t_r, observou-se uma leve mudança no comportamento da distribuição granulométrica do produto, com um aumento da fração de finos passante praticamente em todas as aberturas das peneiras.

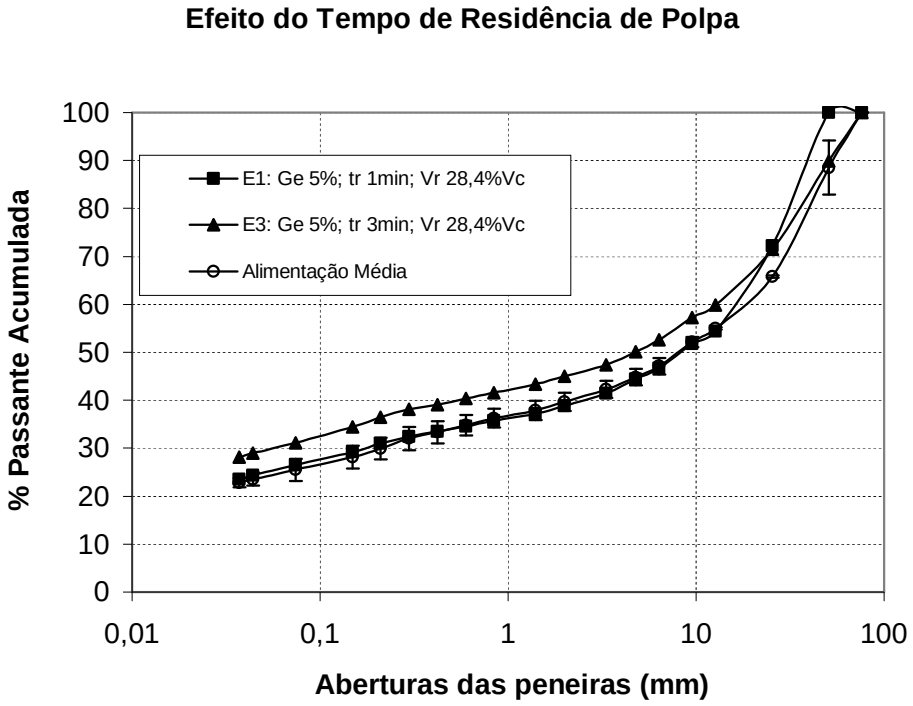

Figura 21 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e Vr 28,4% Vc

A Figura 22 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com t_r de 1 e 3 min, nas condições de Ge 10% e Vr 28,4% Vc. Nesta figura, é possível observar que houve mudança significativa nas distribuições granulométricas dos produtos, com um aumento da fração de finos passante praticamente em todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação. Entretanto, não houve diferença significativa, entre as distribuições dos produtos, quando se aumentou o t_r de 1 para 3 min.

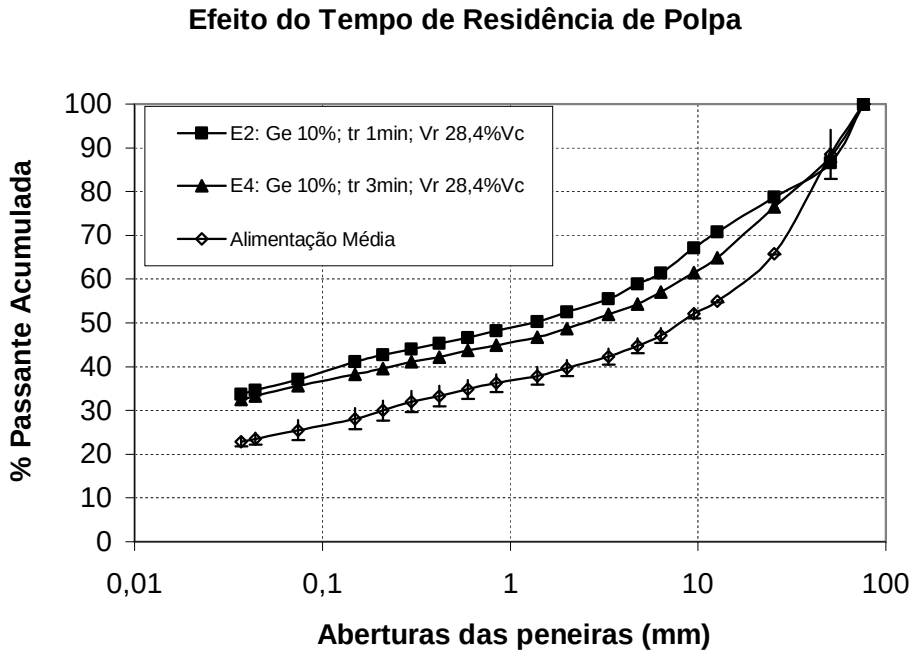

Figura 22 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e Vr 28,4% Vc

A Figura 23 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com t_r de 1 e 3 min, nas condições de Ge 5% e Vr 41,4% Vc. Observa-se, nesta figura, que houve uma leve mudança no comportamento das distribuições dos produtos, com um aumento da fração de finos passante em todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação. Entretanto, não houve diferença significativa, entre as distribuições dos produtos, quando se aumentou o t_r de 1 para 3 min.

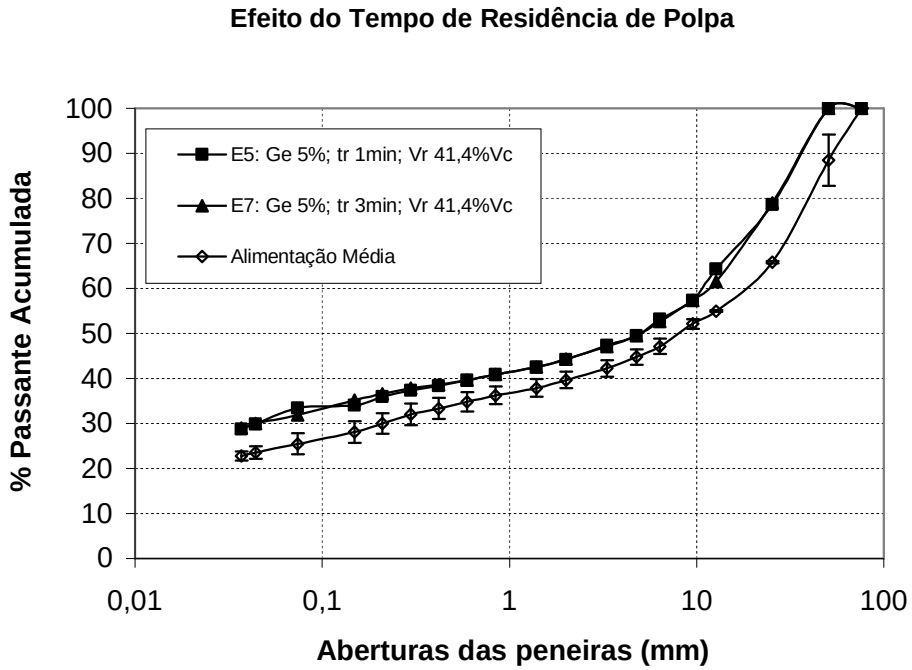

Figura 23 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e Vr 41,4% Vc

A Figura 24 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com t_r de 1 e 3 min, nas condições de Ge 10% e Vr 41,4% Vc. Para esta figura, pode-se observar o mesmo comportamento apresentado na Figura 23.

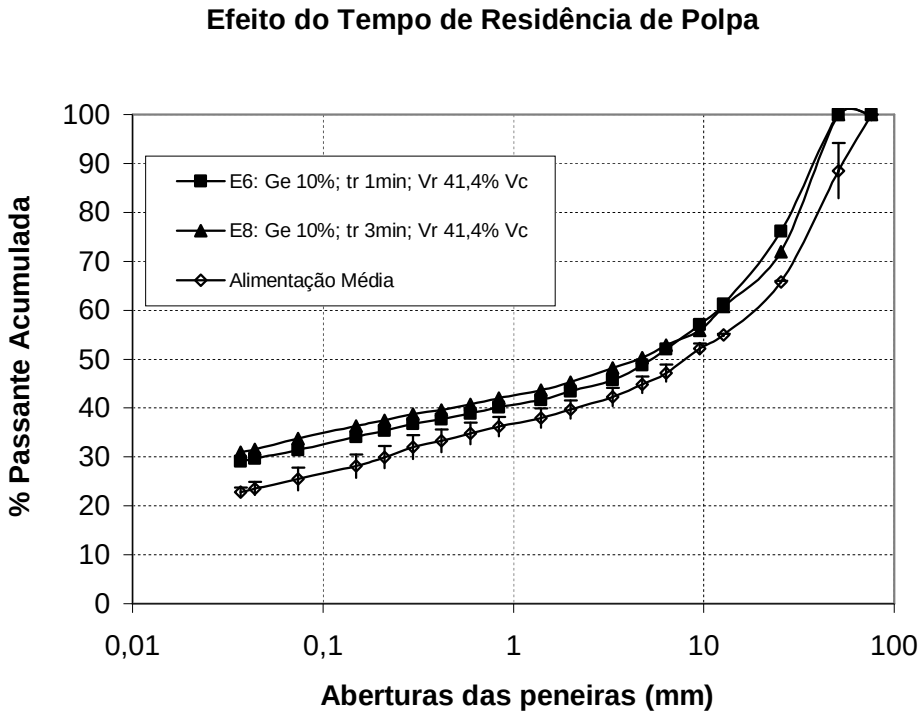

Figura 24 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito do tempo de residência de polpa na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e Vr 41,4% Vc

5.1.4 Efeito da Velocidade de Rotação na Desagregação da Bauxita

O efeito da velocidade de rotação em diferentes condições operacionais pode ser observado nos gráficos das Figuras 25, 26, 27 e 28.

A Figura 25 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Vr de 28,4 e 41,4% Vc, nas condições de Ge 5% e t_r.1 min. Observa-se que na Vr de 28,4% Vc, não houve mudança significativa na distribuição da distribuição granulométrica do produto, quando comparado com a distribuição da alimentação. No entanto, quando se trabalhou com Vr 41,4% Vc, observou-se uma leve mudança no comportamento da distribuição granulométrica do produto, com um aumento da fração passante em praticamente todas as aberturas das peneiras, indicando uma leve desagregação.

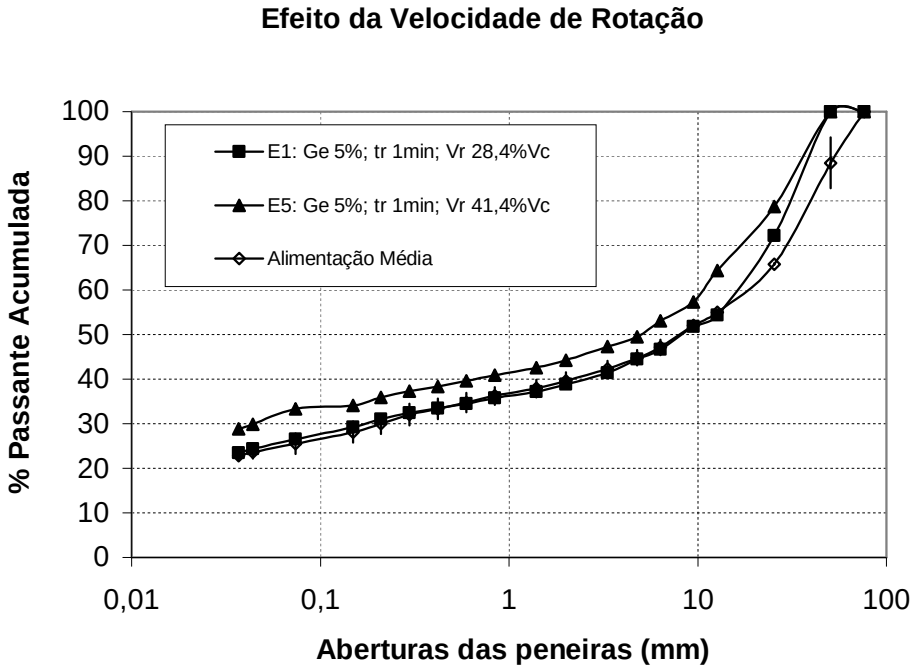

Figura 25 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e t_r 1 min

A Figura 26 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Vr de 28,4 e 41,4% Vc, nas condições de Ge 5% e t_r.3 min. Observa-se, nesta figura, que houve uma leve mudança no comportamento das distribuições dos produtos, com um aumento da fração de finos passante em todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação. Entretanto, não houve diferença significativa, entre as distribuições dos produtos, quando se aumentou a Vr de 28,4 para 41,4% Vc.

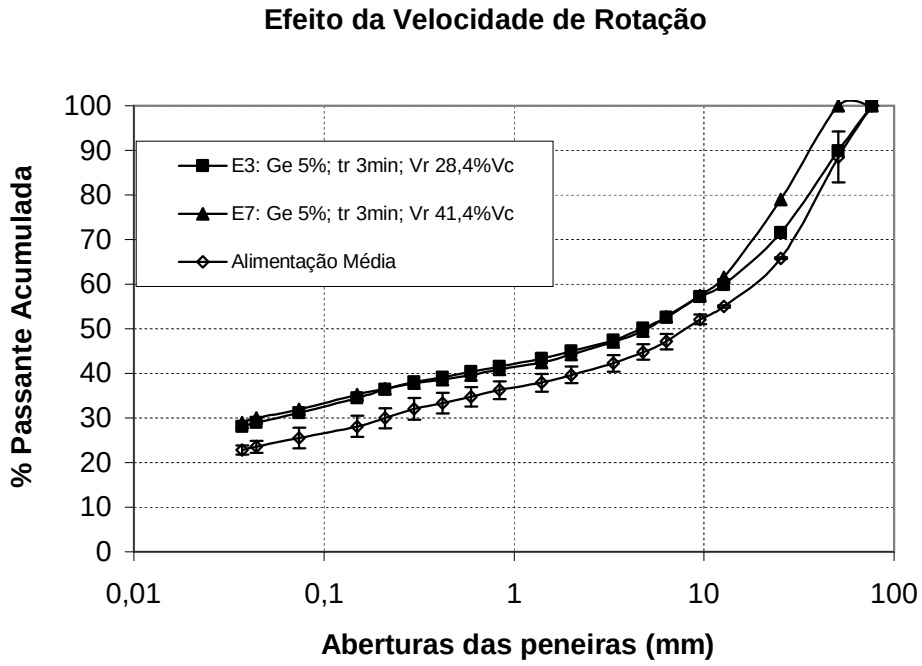

Figura 26 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 5% e t_r 3 min

A Figura 27 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Vr de 28,4 e 41,4% Vc, nas condições de Ge 10% e t_r.1 min. Nesta figura, observa-se que houve uma nítida mudança no comportamento da distribuição do produto, quando se trabalhou com Vr de 28,4% Vc, com um aumento da fração de finos passante em praticamente todas as aberturas das peneiras, quando comparada com a distribuição da alimentação, indicando que houve desagregação. Já, quando se trabalhou com Vr de 41,4% Vc, houve uma desagregação, evidenciada por um aumento da fração de finos passante em todas as aberturas das peneiras, quando comparada com a distribuição da alimentação, porém, inferior à desagregação obtida na Vr de 28,4% Vc. Ou seja, houve uma diminuição da desagregação com o aumento da Vr de 28,4 para 41,4% Vc

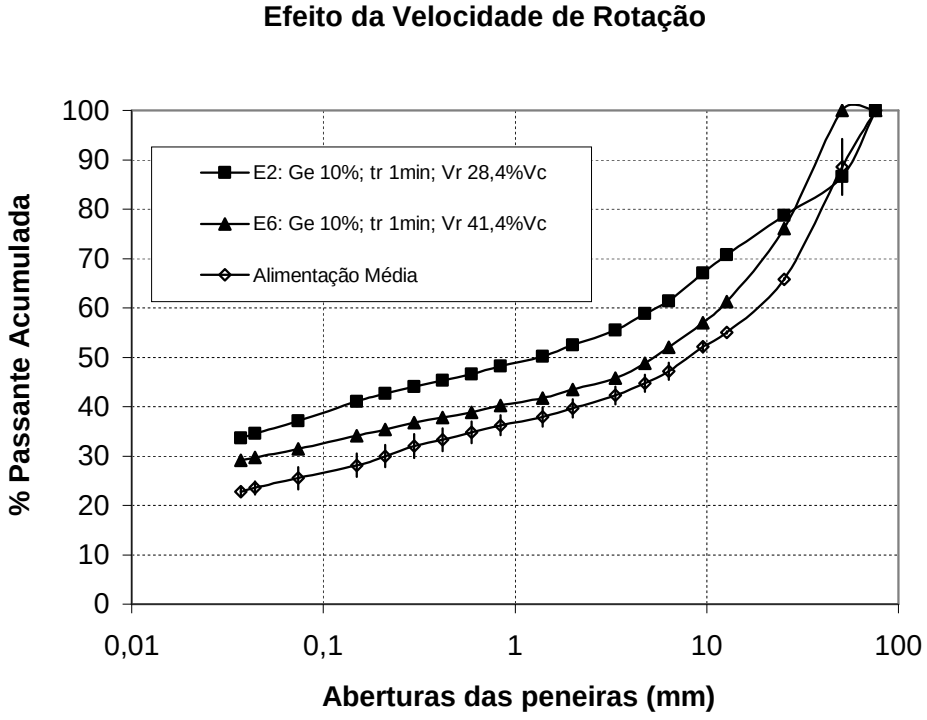

Figura 27 – Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e t_r 1 min

A Figura 28 mostra as distribuições granulométricas da alimentação do ensaio e dos produtos da escrubagem, com Vr de 28,4 e 41,4% Vc, nas condições de Ge 10% e t_r.3 min. Observa-se, nesta figura, que houve mudança significativa nas distribuições granulométricas dos produtos, com um aumento da fração de finos passante praticamente em todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação, indicando que houve desagregação. Entretanto, não houve diferença significativa, entre as distribuições dos produtos, quando se aumentou a Vr de 28,4 para 41,4% Vc.

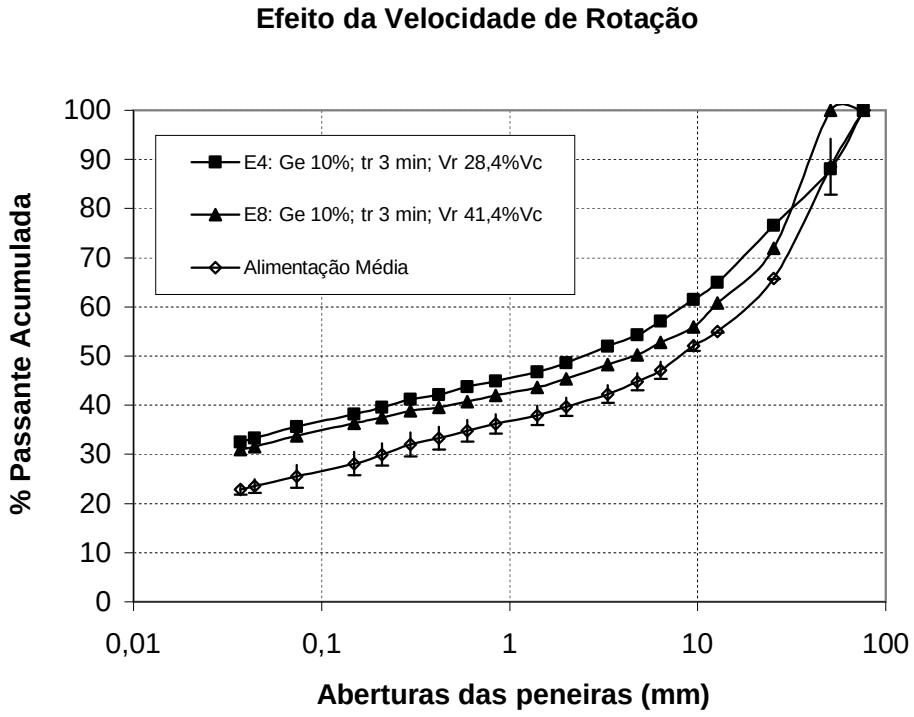

Figura 28 - Distribuições granulométricas mostrando o efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita - condição de operação: Ge 10% e t_r 3 min

5.1.5 Influência das Variáveis Operacionais na Geração de Finos

O objetivo deste item foi determinar quais dos efeitos das variáveis operacionais dos ensaios são significativos na desagregação da bauxita.

Nesta etapa, considera-se geração de finos (GF), o acréscimo da quantidade de material, obtido após os ensaios, com granulometria menor que 0,037 mm (400 #).

Os resultados dos ensaios de escrubagem, em laboratório, com base no planejamento fatorial 2^3, para estudar o efeito do grau de enchimento, tempo de residência de polpa e velocidade de rotação sobre a geração de finos são mostrados na Tabela 6.

Nos planejamentos fatoriais de dois níveis, identificam-se os níveis, superior e inferior, com os sinais (+) e (-), respectivamente.

Fatores	(-)	(+)
1: Grau de Enchimento – (%)	5	10
2: Tempo de Residência da Polpa – (min)	1	3
3: Velocidade de Rotação – (% Vc)	28,4	41,4
Resposta		
Finos no produto – (% passante em 0,037 mm)		

Tabela 6 – Matriz de planejamento

Ensaio	**Fatores**			**Resposta**		**Média**
	1	**2**	**3**	**(% passante em 0,037 mm)**		
1	-	-	-	23,5	28,5	26,0
2	+	-	-	33,6	24,0	28,8
3	-	+	-	28,1	27,7	27,9
4	+	+	-	32,5	29,6	31,1
5	-	-	+	28,8	28,1	28,5
6	+	-	+	29,1	37,3	33,2
7	-	+	+	29,0	30,1	29,6
8	+	+	+	31,0	37,2	34,1

De acordo com Barros Neto et al. (2001) para se calcular os efeitos, constrói-se uma equação matricial a partir da Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficientes de contraste para o planejamento fatorial 2^3

Média	**1**	**2**	**3**	**12**	**13**	**23**	**123**	**y**
+	-	-	-	+	+	+	-	26,0
+	+	-	-	-	-	+	+	28,8
+	-	+	-	-	+	-	+	27,9
+	+	+	-	+	-	-	-	31,1
+	-	-	+	+	-	-	+	28,5
+	+	-	+	-	+	-	-	33,2
+	-	+	+	-	-	+	-	29,6
+	+	+	+	+	+	+	+	34,1

A Tabela 7 contém todos os sinais necessários para o cálculo dos efeitos. O divisor é 8 para a média e 4 para cada um dos efeitos. Usando os sinais apropriados para fazer a soma algébrica das respostas médias (que são reproduzidas na última coluna da tabela) e aplicando os divisores, calculam-se os sete efeitos e a média global. Em cada cálculo são utilizadas todas as respostas.

Transformando a tabela de coeficientes de contraste em uma matriz **X** com elementos +1 ou -1, podem-se calcular todos os efeitos, a menos dos divisores, fazendo o produto $\mathbf{X^t y}$, onde $\mathbf{X^t}$ é a matriz transposta de **X** e **y** é o vetor coluna contendo os resultados das médias das respostas dos ensaios. O resultado deste produto é um vetor coluna. Divide-se o primeiro elemento deste vetor por 8 e os demais por 4, no caso de planejamento 2^3, e obtém-se, desta maneira, os valores dos efeitos. Observa-se que os efeitos aparecem, nas linhas do vetor, na mesma ordem das colunas da matriz **X**.

Os resultados dos efeitos das variáveis operacionais na resposta da operação de escrubagem de bauxita, em escala de laboratório, são observados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados dos efeitos para o planejamento fatorial 2^3 dos ensaios de escrubagem em laboratório

Média de Finos no Produto:	29,9 ± 0,95
Efeitos principais:	
1 (Grau de Enchimento)	3,81 ± 1,91
2 (Tempo de Residência de Polpa)	1,54 ± 1,91
3 (Velocidade de Rotação)	2,89 ± 1,91
Interação de dois fatores:	
12	0,04 ± 1,91
13	0,84 ± 1,91
23	-0,54 ± 1,91
Interação de três fatores:	
123	-0,14 ± 1,91

Inicialmente, precisa-se decidir quais dos efeitos calculados, são significativamente diferentes de zero, e portanto, significativos de interpretação. Neste planejamento, o erro padrão de um efeito é igual a 1,91. Multiplicando-o pelo valor do ponto da distribuição *t de Student* com 8 graus de liberdade (1,860), ver apêndice F, chega-se ao intervalo de 90% de confiança para o valor de um efeito, ± 3,6. Segundo Barros Neto et al. (2001), só considera-se estatisticamente significativo, com 90% de confiança, um efeito cujo valor absoluto for superior ao produto do erro padrão pelo ponto da distribuição *t de Student*. Aplicando esse critério aos valores da Tabela 8, observa-se que, somente o efeito do grau de enchimento é significativo, nesse nível de confiança.

Não há evidência de interação do grau de enchimento com os outros dois fatores, nesse nível de confiança, conforme pode ser observado na Tabela 8 os valores das interações próximos de zero.

Os resultados do planejamento fatorial 2^3, dos ensaios de escrubagem, em laboratório, podem ser melhor avaliados através da Figura 29.

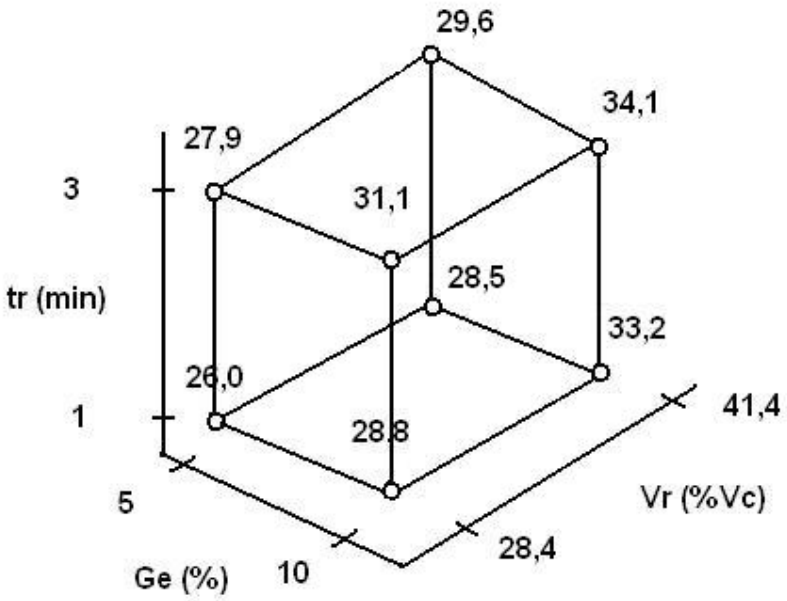

Figura 29 - Gráfico cúbico das respostas

Os menores valores de finos no produto (26,0%, em média) foram obtidos no ensaio 1, nos menores níveis das variáveis operacionais, cujas condições foram as seguintes: Ge 5%, t_r 1 min e Vr 28,4% Vc.

Os maiores valores de finos no produto (34,1%, em média) foram obtidos no ensaio 8, nas seguintes condições: Ge 10%, t_r 3 min, Vr 41,4% Vc.

Com aumento do grau de enchimento de 5% para 10%, ocorre um aumento médio de cerca de 3,8% na quantidade de finos no produto. Não há evidência de que esse aumento dependa dos níveis das outras variáveis, na faixa experimental investigada.

Pode-se observar na Figura 30 que, aumentando o grau de enchimento, aumenta-se a quantidade de finos no produto, mas o efeito é mais pronunciado com a velocidade de rotação de 41,4% Vc do que com a de 28,4% Vc.

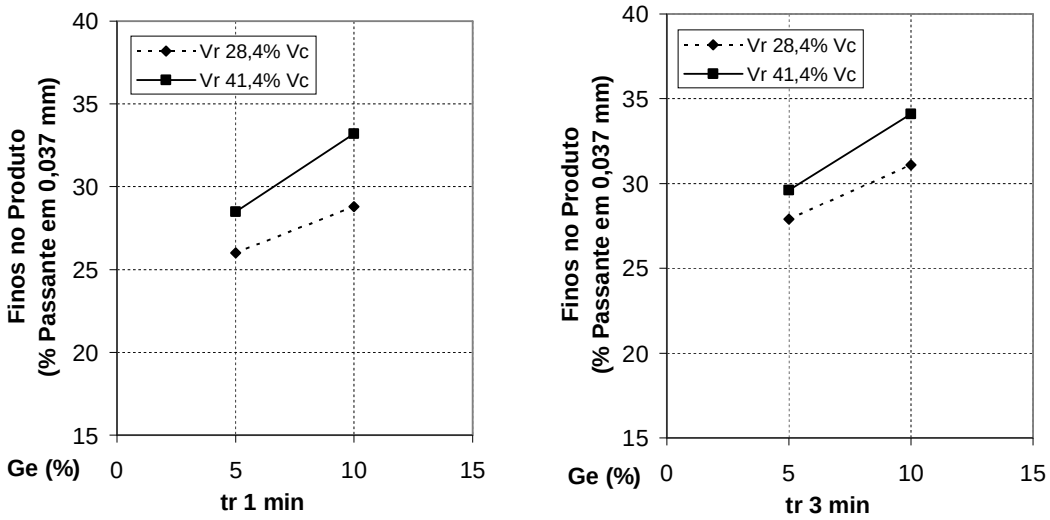

Figura 30 - Efeito do grau de enchimento na quantidade de finos no produto

5.2 ENSAIOS DE ESCRUBAGEM EM ESCALA PILOTO

5.2.1 Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios

Para cada ensaio foi coletada uma amostra do fluxo da alimentação do circuito de escrubagem. A partir das distribuições granulométricas dessas amostras, foi determinada a distribuição granulométrica média da alimentação e seus respectivos desvios-padrão. A distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios é mostrada na Figura 31.

A distribuição mostra que, cerca de 98% das partículas possuem tamanhos menores que 127 mm, 50% encontram-se abaixo de 6,35 mm e 32,6% estão abaixo de 0,037 mm. Os desvios variaram em torno de ±7% em média.

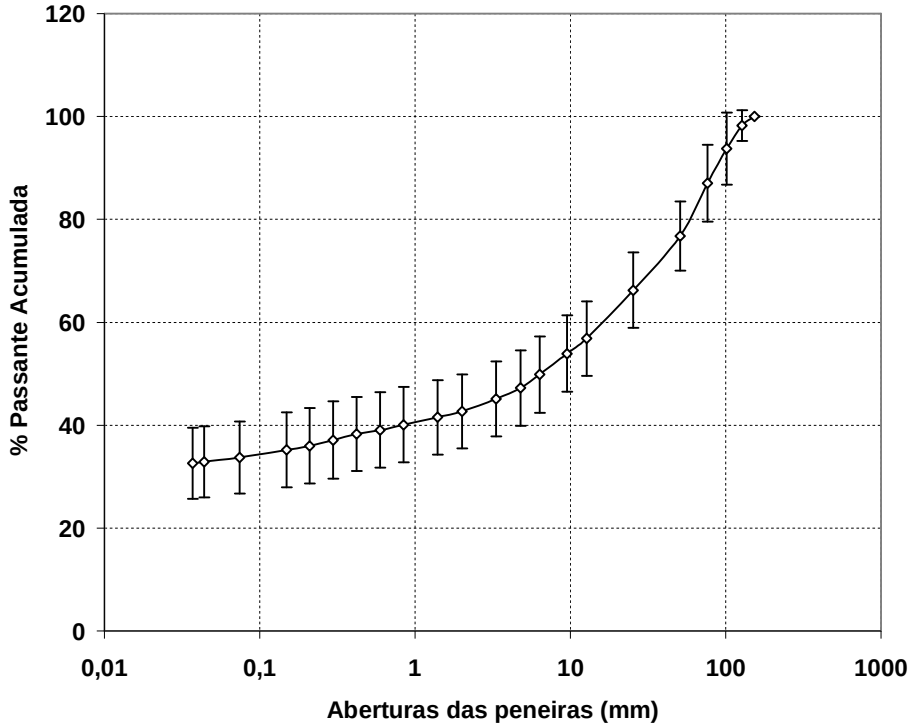

Figura 31 – Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios

Os resultados das análises granulométricas foram avaliados quanto a sua consistência, para identificar possíveis grandes erros na etapa de amostragem. É importante avaliar a consistência desses resultados, pois é comum ocorrerem erros nestas determinações, devido tanto a problemas de estabilidade da operação, como de amostragem e ainda de tratamento de amostras e análises em laboratório.

A Tabela 19, com os resultados das análises granulométricas do fluxo de alimentação de todos os dez ensaios, encontra-se no apêndice C.

Após esta avaliação, decidiu-se determinar a distribuição granulométrica média e os desvios-padrão sem levar em consideração as distribuições das amostras dos ensaios 2 e 9, por apresentarem valores extremos em suas distribuições.

Com isso, os altos valores de desvios-padrão observados na Figura 31 diminuiram para ±4% em média. Isto pode ser observado na Figura 32.

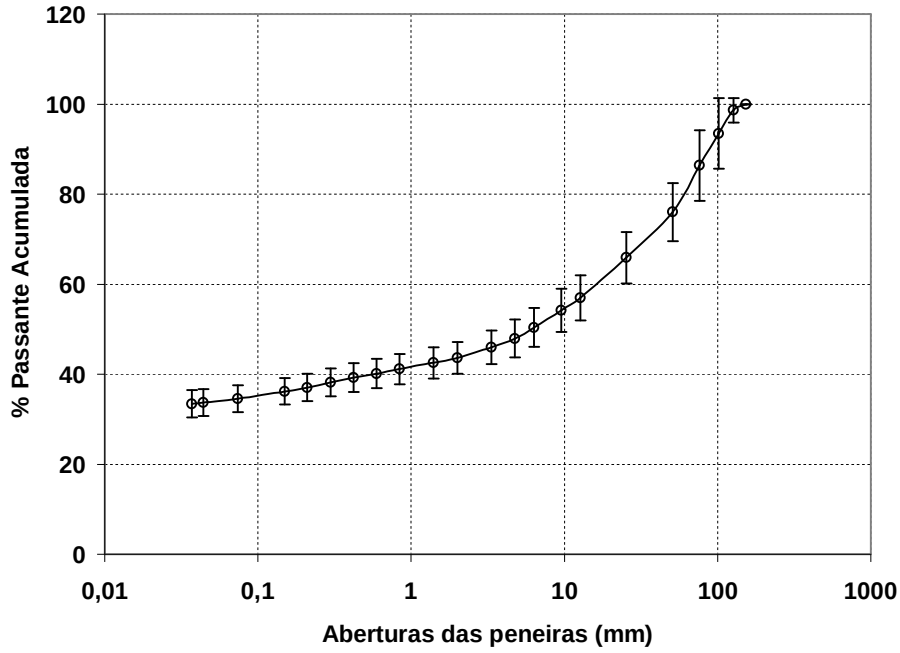

Figura 32 – Distribuição granulométrica média da alimentação dos ensaios determinada sem as distribuições das amostras dos ensaios 2 e 9

5.2.2 Balanço de Massas

Em virtude de o *scrubber* utilizado, ter anexado a ele um *trommel* em sua extremidade de saída, o fluxo do produto era dividido em uma fração retida na malha da peneira (*oversize*) e outra fração passante (*undersize*).

A Tabela 20, com os resultados das análises granulométricas dos fluxos do produto (*oversize* e *undersize*) de todos os dez ensaios, encontra-se no apêndice D.

Através do balanço de massas, foram calculados os parâmetros: vazão de polpa (Q_p), concentração de sólidos (C_w) e vazão de sólidos (Q_w) do fluxo do *undersize* dos dez ensaios. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

A distribuição granulométrica do produto do *scrubber* de cada ensaio foi determinada pela ponderação das vazões experimentais da alimentação, *oversize* e *undersize* com suas respectivas distribuições granulométricas.

Dessa forma, foi possível comparar as distribuições granulométricas da alimentação e do produto da escrubagem.

Tabela 9 – Resultados do balanço de massas para os ensaios piloto

Ensaio	Parâmetros Operacionais		Alimentação	*Oversize*	*Undersize*
1	t_r 3,24 min	Q_p (kg/h)	2000	442	1558
		C_w (%)	50,0	93,0	37,8
	Vr 41,4% Vc	Q_w (kg/h)	1000	411	589
2	t_r 3,24 min	Q_p (kg/h)	2000	494	1506
		C_w (%)	50,0	93,4	35,8
	Vr 28,4% Vc	Q_w (kg/h)	1000	461	539
3	t_r 3,73 min	Q_p (kg/h)	1818	457	1361
		C_w (%)	55,0	94,1	41,9
	Vr 41,4% Vc	Q_w (kg/h)	1000	430	570
4	t_r 3,73 min	Q_p (kg/h)	1818	347	1471
		C_w (%)	55,0	90,5	46,6
	Vr 28,4% Vc	Q_w (kg/h)	1000	314	686
5	t_r 1,62 min	Q_p (kg/h)	4000	879	3121
		C_w (%)	50,0	90,4	38,6
	Vr 41,4% Vc	Q_w (kg/h)	2000	795	1205
6	t_r 1,62 min	Q_p (kg/h)	4000	1043	2954
		C_w (%)	50,0	91,5	35,3
	Vr 28,4% Vc	Q_w (kg/h)	2000	957	1043
7	t_r 1,87 min	Q_p (kg/h)	3636	1038	2598
		C_w (%)	55,0	90,7	40,7
	Vr 41,4% Vc	Q_w (kg/h)	2000	942	1058
8	t_r 1,87 min	Q_p (kg/h)	3636	1274	2362
		C_w (%)	55,0	92,3	34,9
	Vr 28,4% Vc	Q_w (kg/h)	2000	1176	824
9	t_r 1,08 min	Q_p (kg/h)	6000	1568	4432
		C_w (%)	50,0	90,4	35,7
	Vr 41,4% Vc	Q_w (kg/h)	3000	1417	1583
10	t_r 1,08 min	Q_p (kg/h)	6000	1720	4280
		C_w (%)	50,0	86,5	35,3
	Vr 28,4% Vc	Q_w (kg/h)	3000	1488	1512

5.2.3 Influência das Variáveis Operacionais na Desagregação da Bauxita

Foram realizadas análises, através da comparação das distribuições granulométricas, da alimentação e do produto dos ensaios de escrubagem, em escala piloto, para verificar a influência das variáveis operacionais na desagregação da bauxita de Paragominas.

5.2.3.1 Efeito do tempo de residência da polpa

O efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita de Paragominas pode ser observado nos gráficos das Figuras 33, 34, 35 e 36, que comparam a distribuição granulométrica média da alimentação com as dos produtos, em diferentes tempos de residência, para cada condição estudada.

Na Figura 33, é possível observar uma mudança pouco significativa das distribuições granulométricas dos produtos, evidenciada pelo aumento da fração passante em praticamente todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação da bauxita. O efeito mais pronunciado na desagregação da bauxita foi obtido no t_r de 1,08 min.

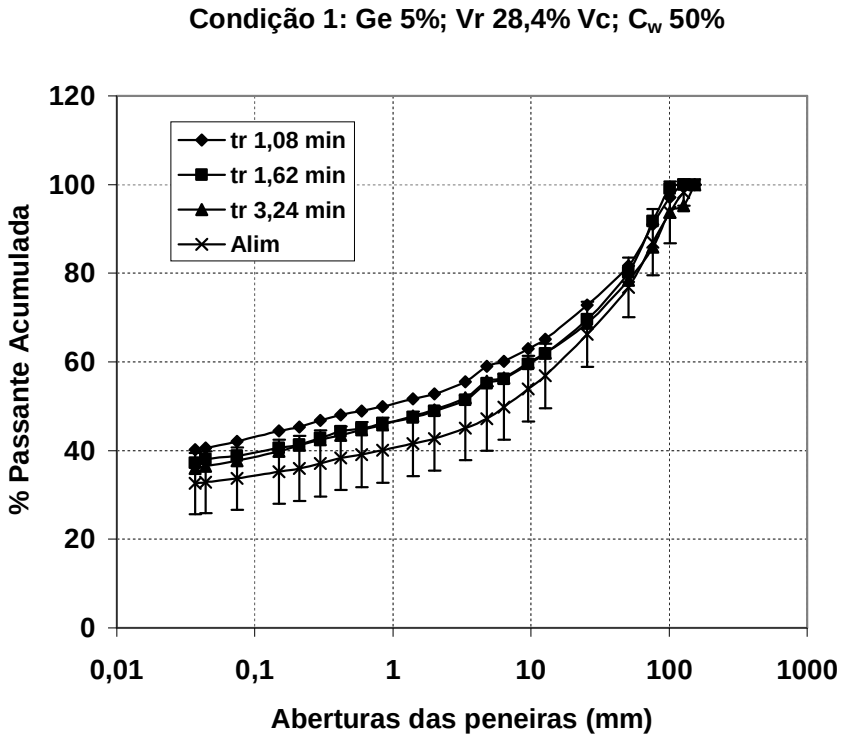

Figura 33 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 1

Observa-se na Figura 34, comportamento das distribuições semelhante as da Figura 33. A diferença aqui é que o efeito mais pronunciado na desagregação da bauxita foi obtido no t_r de 1,62 min.

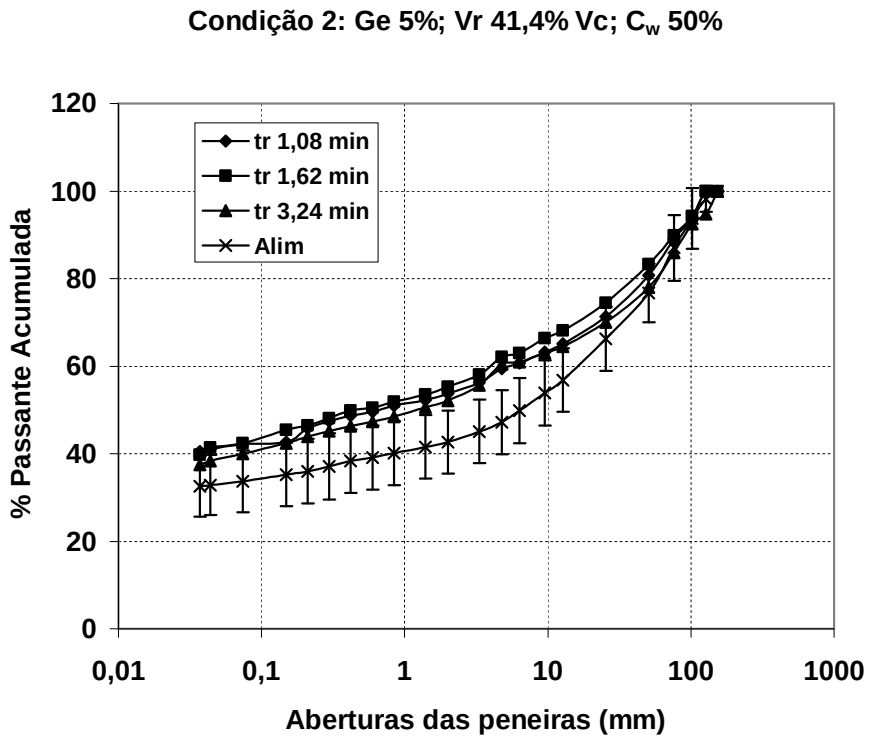

Figura 34 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 2

Na Figura 35, observa-se pouca mudança na distribuição granulométrica do produto, quando se trabalha com t_r de 1,87 min, em comparação com a distribuição da alimentação. Entretanto, a distribuição do produto, a um t_r de 3,73 min, apresenta uma mudança significativa, em comparação com a distribuição da alimentação, evidenciada pelo aumento das frações passantes nas aberturas das peneiras, indicando forte desagregação.

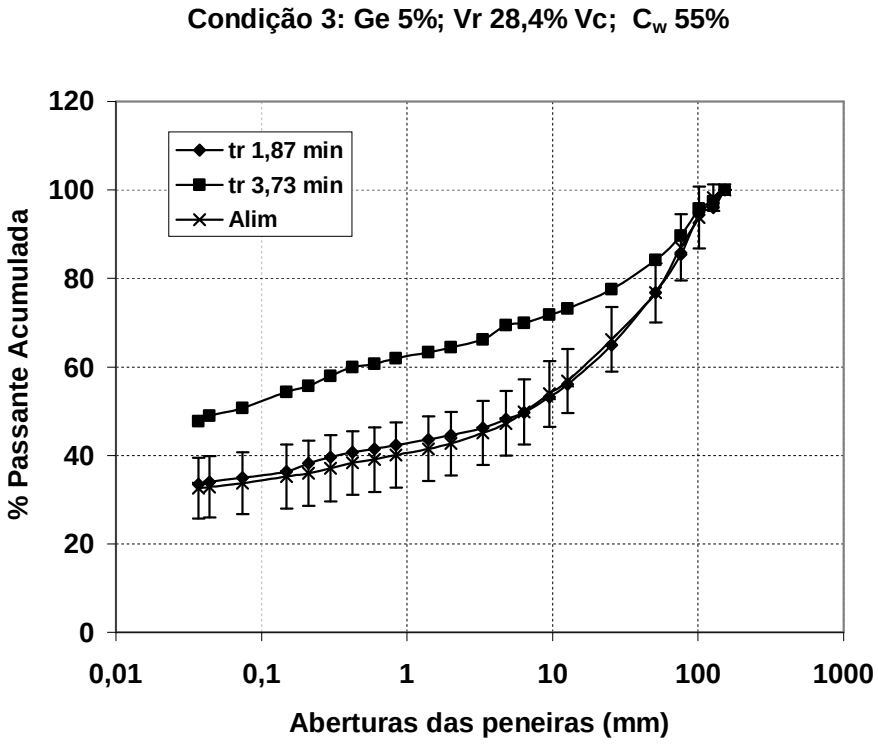

Figura 35 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 3

Observa-se na Figura 36 pouca mudança nas distribuições granulométricas dos produtos, em comparação com a distribuição da alimentação, evidenciada pelo aumento das frações passantes, nas aberturas das peneiras menores que 25,4 mm e praticamente os mesmos valores nas peneiras de aberturas acima de 25,4 mm. O efeito na desagregação da bauxita foi praticamente o mesmo, quando se alterou o t_r de 1,87 parta 3,73 min.

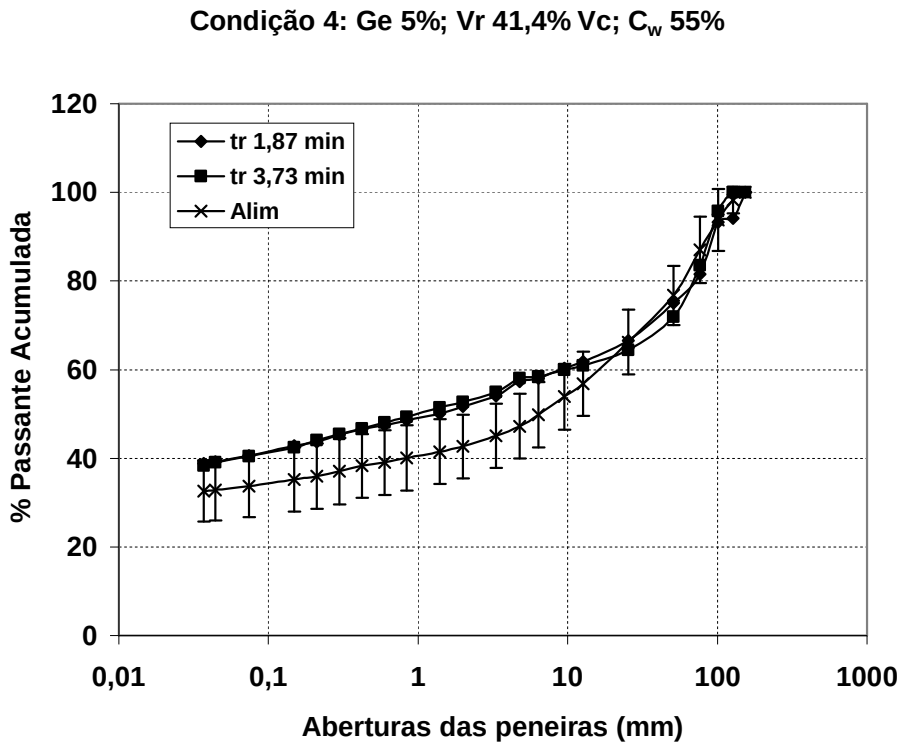

Figura 36 – Efeito do tempo de residência da polpa na desagregação da bauxita na condição 4

5.2.3.2 Efeito da velocidade de rotação

O efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita de Paragominas pode ser observado nos gráficos das Figuras 37, 38, 39, 40 e 41, que comparam a distribuição granulométrica média da alimentação com as dos produtos, em diferentes velocidades de rotação, para cada condição estudada.

Na Figura 37, é possível observar uma mudança pouco significativa das distribuições granulométricas dos produtos, evidenciada pelo aumento da fração passante em praticamente todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação da bauxita. O efeito mais pronunciado na desagregação da bauxita foi obtido na Vr de 41,4% Vc.

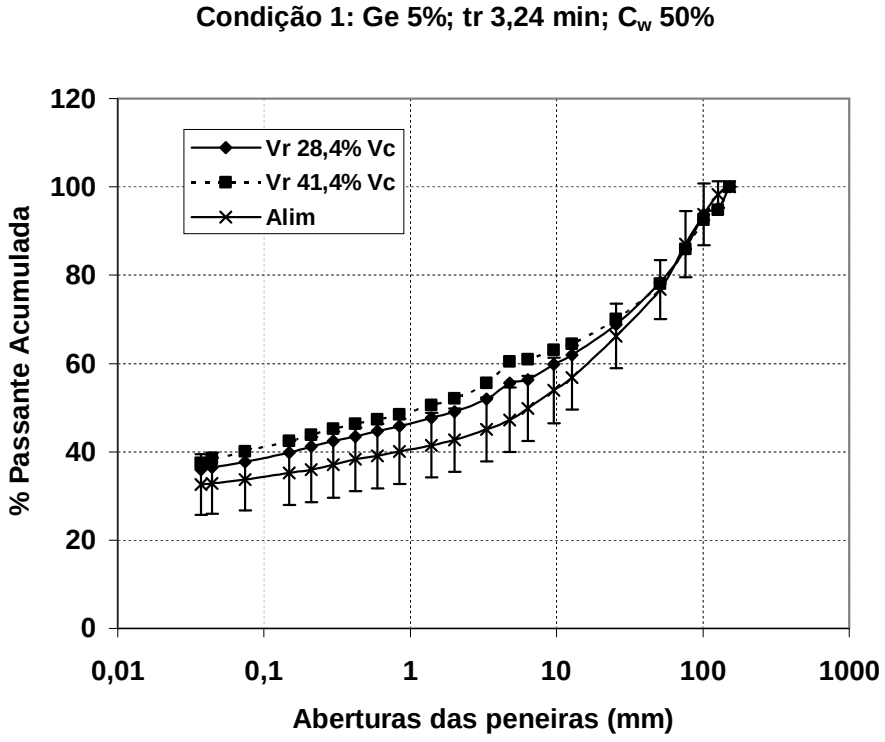

Figura 37 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 1

Observa-se na Figura 38, uma mudança significativa na distribuição granulométrica do produto a Vr de 28,4% Vc, evidenciada pelo aumento na fração passante em todas as aberturas das peneiras, quando comparada com a distribuição da alimentação, indicando uma desagregação da bauxita. Entretanto, a Vr de 41,4% Vc, não houve mudança significativa da distribuição granulométrica, quando comparada com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação da bauxita. O efeito mais pronunciado na desagregação da bauxita foi obtido na Vr de 28,4% Vc.

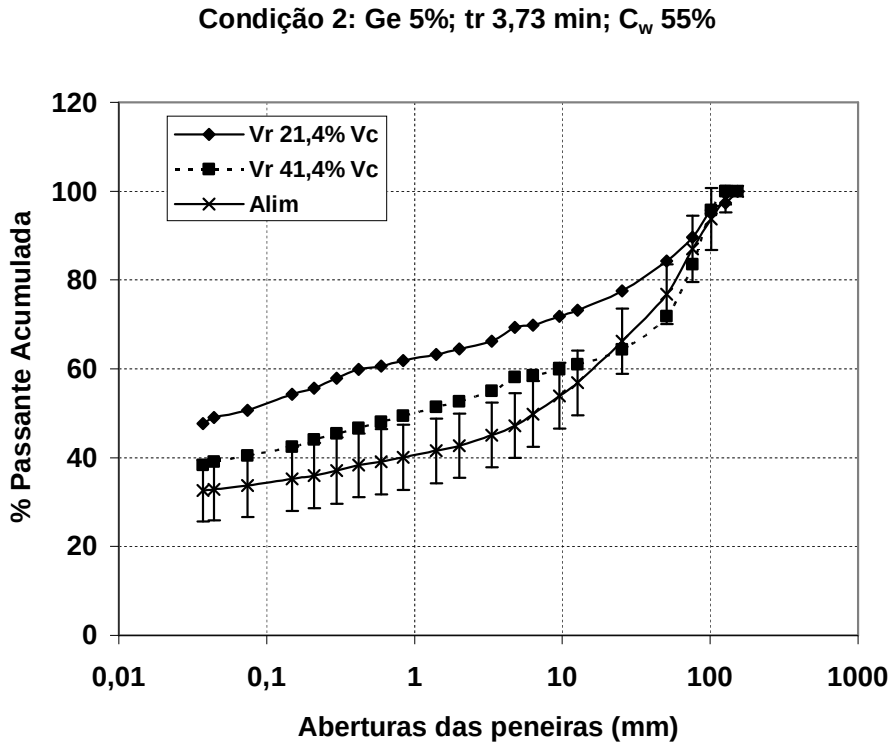

Figura 38 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 2

Na Figura 39, observa-se uma mudança significativa na distribuição granulométrica do produto, a Vr de 41,4% Vc, evidenciada pelo aumento na fração passante em todas as aberturas das peneiras, quando comparada com a distribuição da alimentação, indicando uma desagregação da bauxita. Entretanto, a Vr de 28,4% Vc, não houve mudança significativa da distribuição granulométrica, quando comparada com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação da bauxita. O efeito mais pronunciado na desagregação da bauxita foi obtido na Vr de 41,4% Vc.

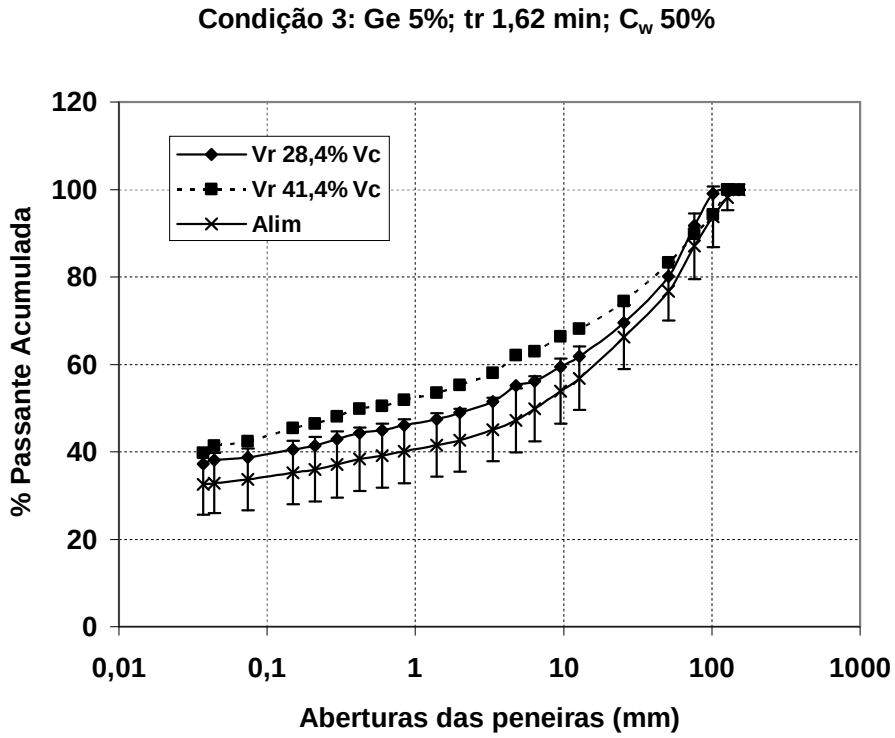

Figura 39 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 3

Observa-se na Figura 40, pouca mudança nas distribuições granulométricas dos produtos, em comparação com a distribuição da alimentação, evidenciada pelo aumento das frações passantes, nas aberturas das peneiras menores que 25,4 mm e praticamente os mesmos valores nas peneiras de aberturas acima de 25,4 mm. O efeito na desagregação da bauxita foi praticamente o mesmo, quando se alterou a Vr de 28,4 para 41,4% Vc.

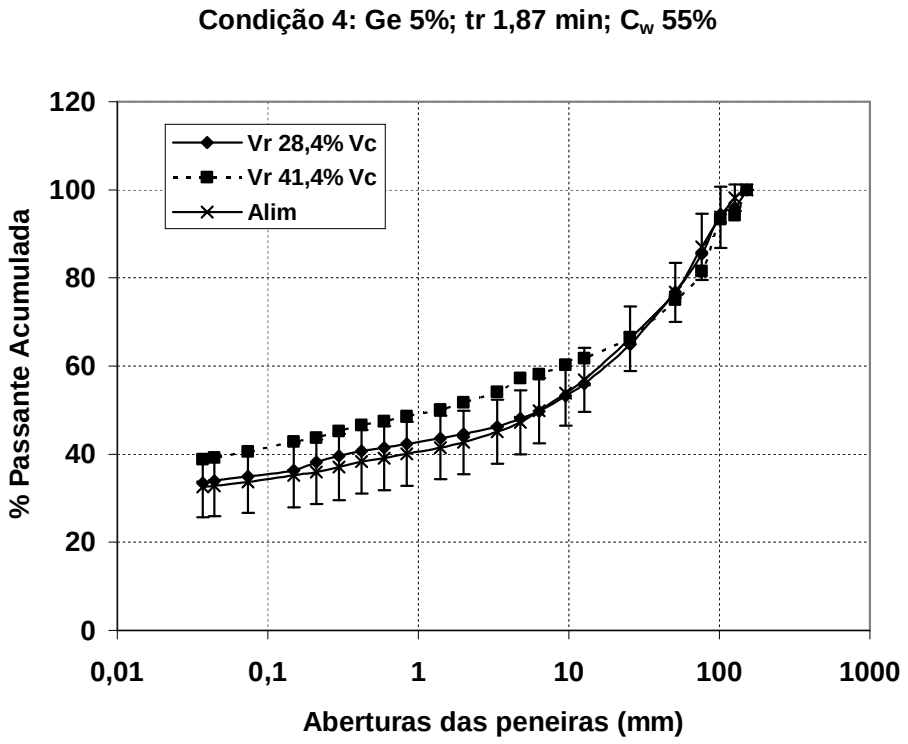

Figura 40 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 4

Na Figura 41, é possível observar uma mudança pouco significativa das distribuições granulométricas dos produtos, evidenciada pelo aumento da fração passante em praticamente todas as aberturas das peneiras, quando comparadas com a distribuição da alimentação, indicando uma leve desagregação da bauxita. O efeito na desagregação da bauxita foi, praticamente, o mesmo nas duas velocidades.

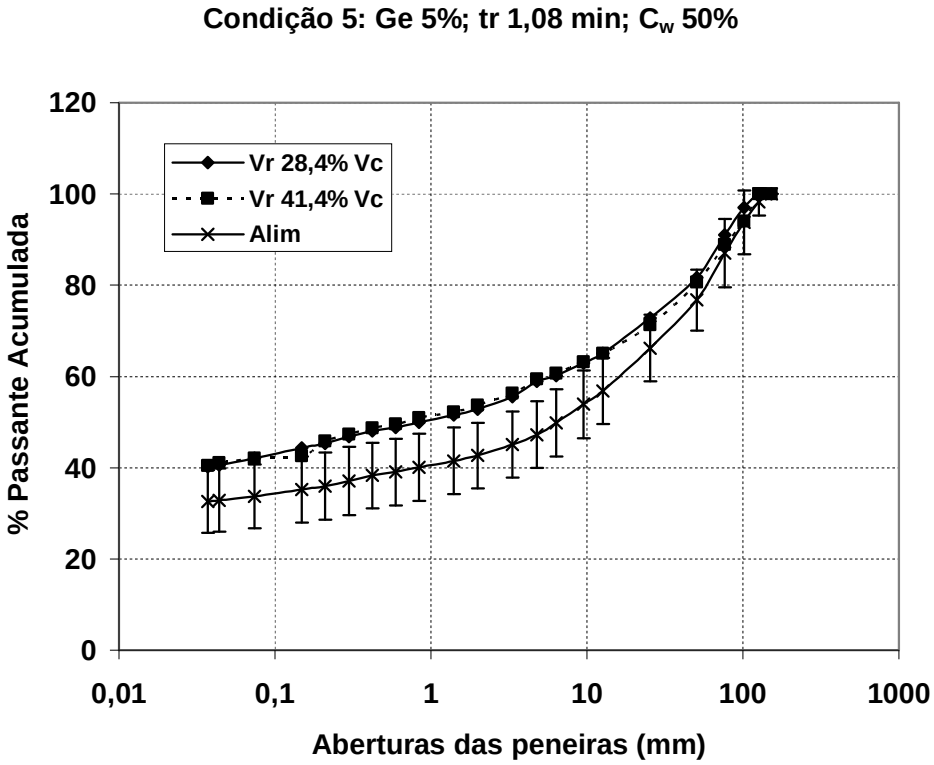

Figura 41 – Efeito da velocidade de rotação na desagregação da bauxita na condição 5

6 MODELAGEM DO PROCESSO

6.1 DEFINIÇÃO DO MODELO

Para definição do modelo, as variáveis operacionais selecionadas foram: o grau de enchimento, por ter apresentado o efeito mais significativo na desagregação da bauxita; e o tempo de residência da polpa, por ser um parâmetro de engenharia utilizado no dimensionamento de equipamentos de escrubagem.

Quanto à velocidade de rotação do *scrubber*, esta apresentou importância intermediária entre o grau de enchimento e o tempo de residência da polpa. Entretanto, decidiu-se generalizar o modelo sem explicitar esta variável.

O parâmetro quantidade de finos no produto, representado pela porcentagem passante em 0,037 mm, foi selecionado como resposta sendo relacionado com o grau de enchimento e o tempo de residência da polpa através do modelo proposto na equação 6.1:

$$FP = FN + Ge[\, 1 - \exp(-b.t_r)] \qquad (6.1)$$

Onde:

FP é quantidade de finos no produto (% passante em 0,037 mm);
FN é a quantidade inicial de finos naturais presentes no minério (% passante em 0,037 mm);
Ge é o grau de enchimento (%);
t_r é o tempo de residência da polpa no *scrubber* (min);
b é uma constante do modelo, característica do material, a ser estimada por meio de regressões.

De acordo com o modelo selecionado, o fenômeno da geração de finos de bauxita pode ser descrito por uma curva FP x t_r, com rápido crescimento inicial, determinado pela constante “b”, tendendo posteriormente a um valor assintótico, determinado pelo Ge. A constante FN representa a quantidade inicial de finos (menores que 0,037 mm) contidos no minério antes de ser desagregado. O termo $Ge[1 – exp(-b.t_r)]$ representa a quantidade de finos gerados. Em termos práticos, isto significa que a geração de finos é crescente, a partir de um determinado valor inicial, conforme o aumento do tempo de residência da polpa, até que um limite superior seja atingido, a partir do qual o processo de desagregação deixa de ocorrer.

Para fins de modelagem, decidiu-se realizar nova campanha de ensaios complementares de laboratório, com tempos de residência de polpa de 2 e 4 minutos, de forma a consolidar a base de dados e as análises subsequentes, conforme apresentados na Tabela 10. Eles foram executados em ordem aleatória e em duplicata.

Tabela 10 – Programa de ensaios complementares de escrubagem

Ensaio	Ge (%)	t_r (min)	Vr (%Vc)	Finos no Produto (% Passante em 0,037 mm)		Média
9	5	2	28,4	30,1	23,2	26,7
10	10	2	28,4	25,7	31,6	28,6
11	5	4	28,4	28,3	23,4	25,8
12	10	4	28,4	28,8	26,8	27,8
13	5	2	41,4	27,8	28,8	28,3
14	10	2	41,4	39,6	33,2	36,4
15	5	4	41,4	28,1	26,5	27,3
16	10	4	41,4	36,4	31,7	34,1

6.2 ESTIMAÇÃO DA CONSTANTE “b”

A Tabela 11 apresenta o sumário de todos os dados experimentais utilizados na estimação da constante “b” do modelo proposto, para o processo de escrubagem, em escala de laboratório, da bauxita de Paragominas.

A estimação numérica da constante “b” do modelo foi obtida por regressão não-linear, utilizando o *software Statistica@ Release 8*, por meio do método de Levenberg-Marquardt. A constante “b” do modelo foi estimada, utilizando-se os valores dos parâmetros Ge, t_r, FN e FP de todas as condições ensaiadas, simultaneamente, com um intervalo de confiança de 95% (α = 0,05), usando-se os dados da Tabela 11.

Tabela 11 – Dados experimentais utilizados na modelagem

Condição	**Variável Operacional não significativa**	**Ensaio**	**Ge(%)**	**t_r(min)**	**FP (% Passante em 0,037 mm)**
1	Vr 28,4% Vc	FN	0	0	22,8
		1	5	1	26,0
		9	5	2	26,7
		3	5	3	27,9
		11	5	4	25,8
2	Vr 28,4% Vc	FN	0	0	22,8
		2	10	1	28,8
		10	10	2	28,6
		4	10	3	31,1
		12	10	4	27,8
3	Vr 41,4% Vc	FN	0	0	22,8
		5	5	1	28,5
		13	5	2	28,3
		7	5	3	29,6
		15	5	4	27,3
4	Vr 41,4% Vc	FN	0	0	22,8
		6	10	1	33,2
		14	10	2	36,4
		8	10	3	34,1
		16	10	4	34,1

A Tabela 12 mostra os valores do coeficiente de determinação (R^2) e da constante "b" estimada, numérica e simultaneamente, para as 4 condições diferentes, da operação de escrubagem, utilizadas neste trabalho.

Tabela 12 – Estimativa da constante "b" do modelo

Modelo FP = FN + Ge[1 – exp(-b.t_r)]	
R^2	**b**
0,8511	1,765 ± 0,729

O coeficiente de determinação (R^2) indica a qualidade do ajuste do modelo através do exame dos resíduos. O valor máximo de R^2 é 1 e só ocorrerá se não houver resíduo algum e portanto toda a variação em torno da média for explicada pela regressão. Quanto mais próximo de 1 estiver o valor de R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados experimentais.

O valor de 0,8511 para o coeficiente de determinação indica que 85,11% da variância é explicada pelo modelo.

Os resultados do ajuste do modelo aos dados experimentais podem ser observados nos gráficos da Figura 42 e Figura 43, que mostram a distribuição do modelo e os pontos experimentais em cada condição de operação.

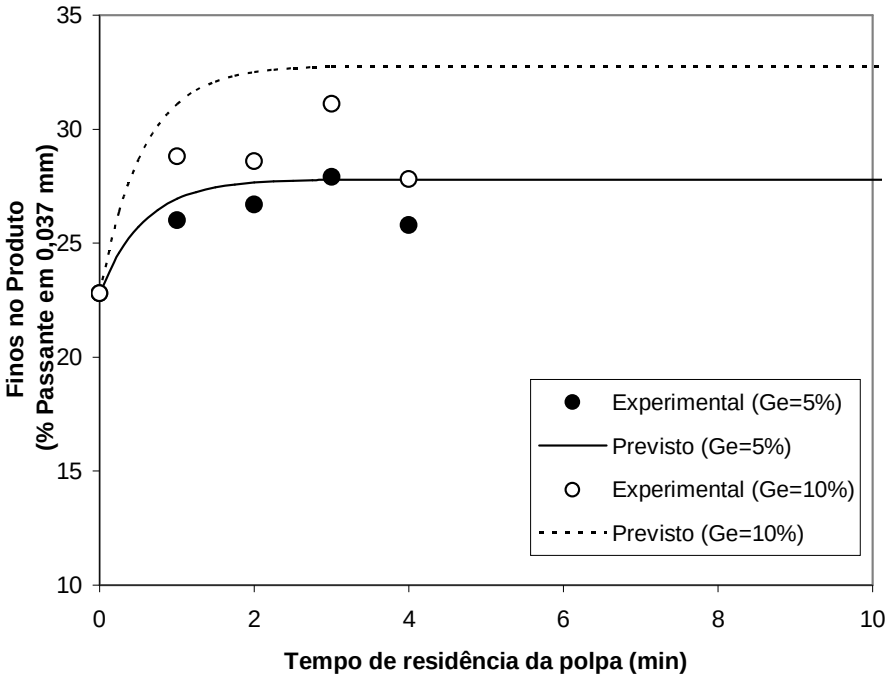

Figura 42 – Ajuste do modelo aos dados experimentais com velocidade de rotação de 28,4% Vc;

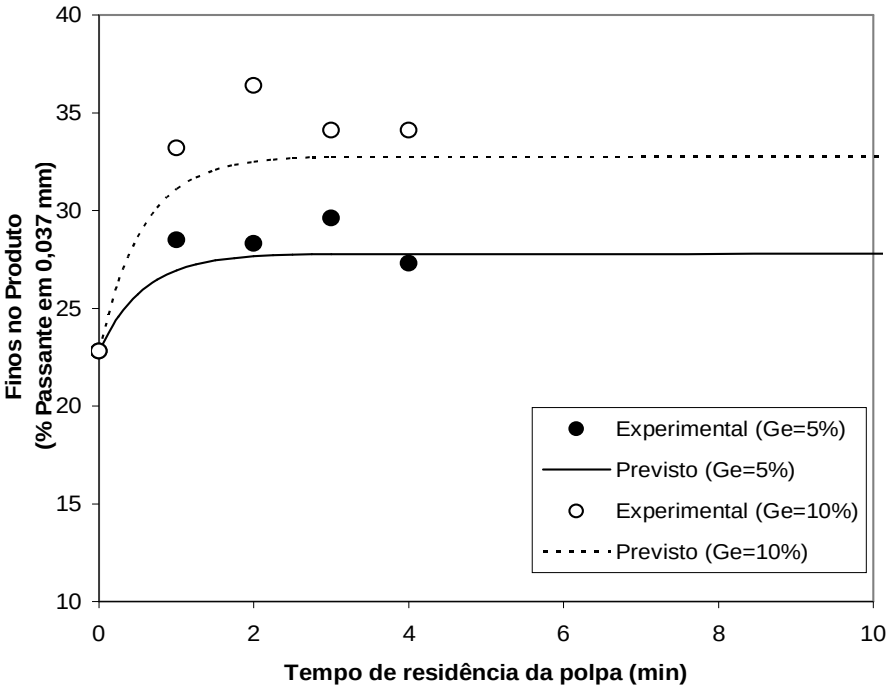

Figura 43 - Ajuste do modelo aos dados experimentais com velocidade de rotação de 41,4% Vc;

6.3 VERIFICAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO

A Figura 44 mostra a aderência entre os valores experimentais de finos no produto e os previstos pelo modelo. Nesta figura, pode ser observada uma boa concordância entre eles, e que a maioria dos pontos ficaram compreendidos entre as linhas de desvios de ± 10% em relação à reta identidade, que fornece a igualdade entre os valores experimentais e os previstos.

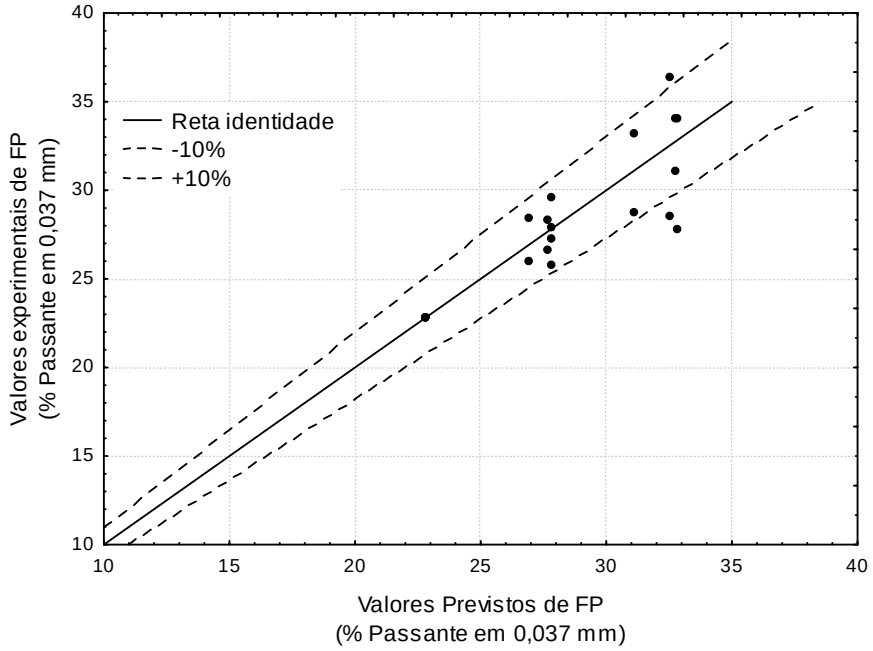

Figura 44 - Comparação entre os valores experimentais dos finos no produto e os valores previstos pelo modelo

Para verificar se o modelo está adequado para representar os dados é necessário verificar se as suposições feitas não foram violadas, ou seja, se os erros apresentam distribuição normal, são independentes e com variância constante. A violação dessas suposições pode ser investigada pela inspeção dos resíduos. Se o modelo estiver adequado, os resíduos devem se apresentar de maneira aleatória, não apresentando nenhum padrão evidente.

A verificação da adequação do modelo foi realizada com o software Statistica@ Release 8.

A diferença entre o valor experimental e o valor previsto pelo modelo é o chamado resíduo. Para verificar se os resíduos seguem uma distribuição normal, o procedimento formal é a construção do gráfico de probabilidade normal dos resíduos, ilustrado pela Figura 45, para os resíduos gerados pelo modelo matemático utilizado para descrever a geração de finos no processo de escrubagem da bauxita de Paragominas.

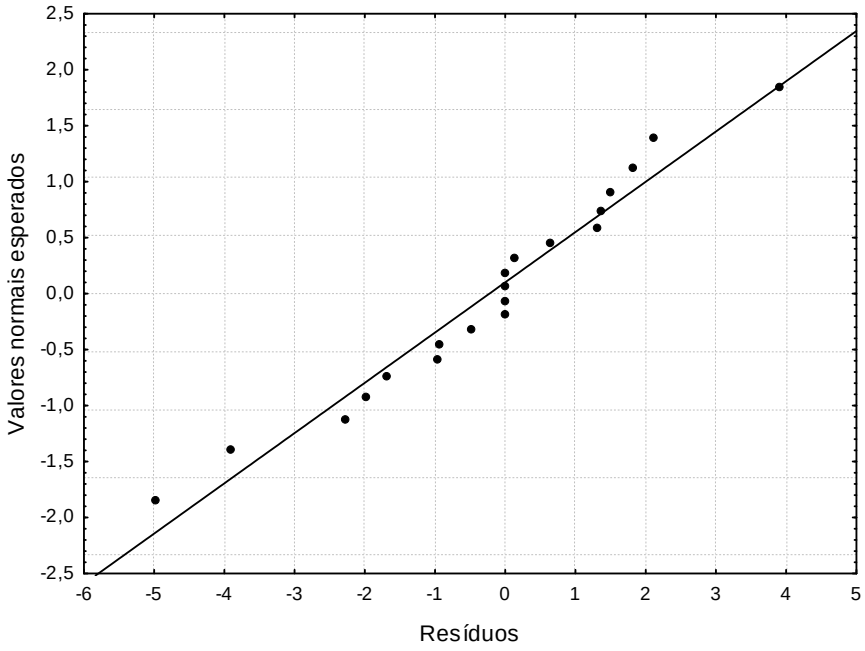

Figura 45 - Gráfico da distribuição normal dos resíduos

Pode ser observado na Figura 45 que há uma proximidade entre os pontos e a linha contínua, o que indica que a suposição de normalidade dos resíduos não está seriamente violada (CALADO; MONTGOMERY, 2003).

Para constatar a suposição de variância constante, os resíduos devem estar aleatoriamente distribuídos em torno do valor médio, que deve ser igual a zero. A verificação da aleatoriedade dos resíduos é obtida por meio do gráfico que relaciona os resíduos com os valores previstos da variável dependente. A Figura 46 fornece o gráfico dos resíduos em função dos valores previstos da variável FP.

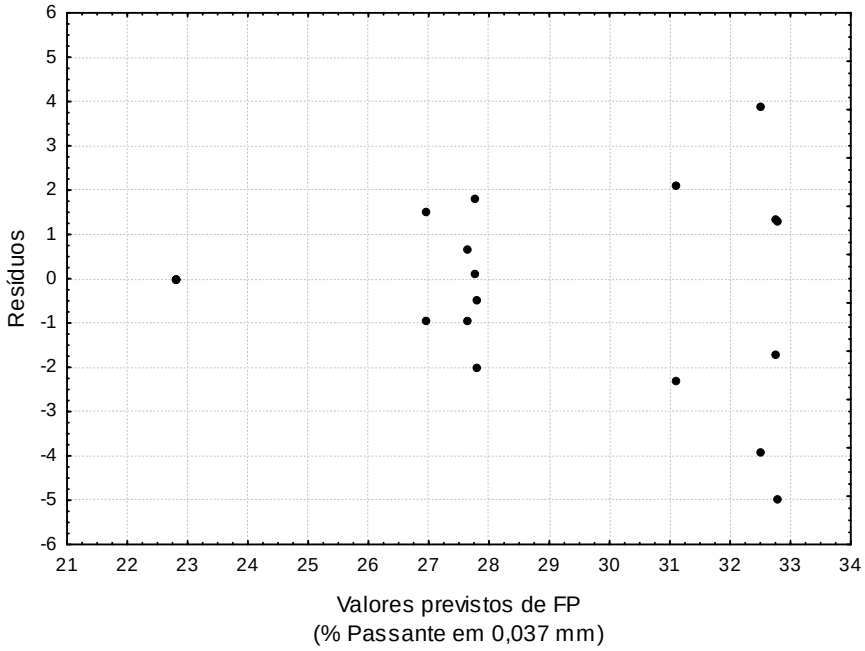

Figura 46 - Resíduos versus valores previstos de Finos no Produto

A Figura 46 indica que, para os resultados de finos no produto previstos pelo modelo, há uma distribuição randômica dos resíduos em torno da origem, o que sugere a não violação da suposição de variância constante dos resíduos.

7 VALIDAÇÃO E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Validar um modelo significa comprovar que ele gera resultados muito parecidos com os do sistema real. Vale ressaltar, que devido à aleatoriedade da obtenção dos dados, várias replicações devem ser feitas, com o objetivo de definir um valor médio, que melhor retrate a situação simulada. Este resultado médio é o parâmetro do modelo que deve ser verificado quanto a sua validade.

A validação consiste na comparação dos dados gerados pelo modelo com os obtidos do sistema real. Para tanto, devem ser utilizados procedimentos estatísticos. A estatística consiste no emprego de recursos como: análise de variância, determinação de intervalo de confiança, teste de hipóteses e análises de regressões.

Como apresentado anteriormente, a validação visa certificar-se que o modelo, ainda que restrito às condições ensaiadas, responde dentro de uma determinada precisão, com valores próximos aos obtidos neste conjunto de dados independentes.

A estatística dos testes paramétricos foi utilizada como forma de validar os resultados, previstos pelo modelo proposto, para os ensaios de escrubagem de bauxita em escala piloto. A seguir são apresentados os princípios básicos do método usado: o teste de hipóteses.

A descrição a seguir foi baseada no livro de Costa Neto (1977).

7.1 TESTE DE HIPÓTESES

Na estatística indutiva, definem-se testes paramétricos, as hipóteses sobre parâmetros populacionais. Admite-se que uma hipótese seja válida, até que se prove o contrário, para um dado parâmetro da população. Esta hipótese será testada com base em resultados amostrais sendo aceita ou rejeitada.

7.1.1 Conceitos Importantes

Designa-se por H_0, a hipótese a ser testada e por H_1, a hipótese alternativa. Considera-se H_1 como hipótese complementar de H_0. O teste levará á aceitação ou rejeição da hipótese H_0, o que corresponde, portanto, à rejeição ou aceitação de H_1. Entretanto, para manter uniformidade, enuncia-se a hipótese sempre em termos de H_0.

Em um teste de hipóteses podem ocorrer dois tipos de erros:

1. Erro tipo I : rejeitar H_0, sendo H_0 verdadeira;
2. Erro tipo II : aceitar H_0 , sendo H_0 falsa.

As probabilidades destes dois tipos de erros são designadas, respectivamente, por α e β. A probabilidade α do erro tipo I é denominada de nível de significância do teste. Os resultados da aplicação de um teste de hipóteses e as respectivas probabilidades de ocorrência estão na Tabela 13.

Tabela 13 – Tipos de decisões para um teste de hipóteses e suas probabilidades

		Realidade	
		H_0 verdadeira	**H_0 falsa**
Decisão	**Aceitar H_0**	Decisão correta (1- α)	Erro tipo II (β)
	Rejeitar H_0	Erro tipo I (α)	Decisão correta (1- β)

Deve-se notar que as probabilidades α e β são probabilidades condicionadas à realidade. Fica claro, também, que o erro tipo I só poderá ser cometido se H_0 for verdadeira e o erro tipo II, se H_0 for falsa.

7.1.2 Comparação de Duas Médias

A teoria do testes de hipóteses é estendida para casos em que se têm duas ou mais amostras, em princípio, de populações distintas. Com base nestas

amostras, são apresentadas comparações de parâmetros equivalentes das populações envolvidas.

Nesta análise estatística, em particular, testam-se as hipóteses referentes ao valor real da diferença entre duas médias populacionais, ou seja:

$$H_{0,}\ \mu_1 - \mu_2 = \Delta$$

Tendo especial interesse o caso de $\Delta = 0$, em que testa a hipótese da igualdade entre duas médias.

Dois casos devem ser considerados: dados emparelhados (ou populações correlacionadas) e dados não-emparelhados (populações não correlacionadas).

7.1.3 Dados Emparelhados

Os resultados de duas amostras são dados emparelhados, quando estão relacionados, dois a dois, segundo algum critério que introduz uma influência marcante, entre os diversos pares que se supõem influir igualmente sobre os valores de cada par.

É claro que, sempre que possível e justificável, deve-se promover o emparelhamento dos dados, pois se tem uma informação suplementar que levará a resultados estatisticamente mais fortes. Entretanto, se o emparelhamento for promovido sem haver condições físicas que o justifiquem, ressalta-se a perda do poder deste teste.

Se os dados das duas amostras estão emparelhados, calculam-se as diferenças (d_i) correspondentes a cada par de valores, reduzindo-se os dados a uma única amostra de n diferenças. Por outro lado, testar a hipótese de que a diferença entre as médias das duas populações emparelhadas seja igual a um valor Δ equivale a testar a hipótese de que a média de todas as diferenças seja igual Δ, o que decorre diretamente das propriedades da média, ou seja, testa-se apenas a hipótese:

$$H_{0,}\ \mu_d = \Delta,$$

Contra uma alternativa H_1 que poderá corresponder a um teste unilateral ou bilateral, conforme seja de interesse.

Realiza-se o teste através da comparação de *t de Student* experimental com o valor crítico obtido em função de α com (n – 1) graus de liberdade, através da equação 7.1:

$$t_{n-1} = \frac{d_m - \Delta}{s_d / \sqrt{n}} \qquad 7.1$$

Onde:

t_{n-1} é o *t de Student* experimental;

d_m é a média das amostras das diferenças;

Δ é o valor testado da média das diferenças nas populações;

s_d é o desvio-padrão da amostra das diferenças;

n é o tamanho da amostra das diferenças.

Com o valor de *t de Student* experimental compara-se com o valor crítico tabelado (Vide apêndice F), e através da Tabela 14, toma-se a decisão de aceitar ou rejeitar a hipótese H_0.

Tabela 14 – Teste de hipóteses para média de dados emparelhados

Hipóteses	**Rejeita-se H_0 se**
H_0, $\mu_d = \Delta$ H_1, $\mu_d < \Delta$	$t_{n-1} < -t_{n-1,\alpha}$
H_0, $\mu_d = \Delta$ H_1, $\mu_d > \Delta$	$t_{n-1} > t_{n-1,\alpha}$
H_0, $\mu_d = \Delta$ H_1, $\mu_d \neq \Delta$	$\lvert t_{n-1} \rvert > t_{n-1,\alpha/2}$

7.2 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS RESULTADOS

O teste de hipóteses foi empregado para verificar a aplicabilidade do modelo desenvolvido, em escala de laboratório, para a operação de escrubagem em escala piloto realizada.

Os resultados experimentais foram comparados com os previstos pelo modelo e admitiu-se a seguinte hipótese:

$$H_{0,}\ \mu_d = 0$$

$$H_{1,}\ \mu_d \neq 0$$

Ou seja, a hipótese nula de que os resultados não são diferentes. As hipóteses foram testadas com grau de confiança de 99% e bilateral, ou seja, nível de significância igual a 1%, conforme os dados da Tabela 15.

Tabela 15 – Resultados dos valores experimentais e previstos pelo modelo

Modelo: $FP = FN + Ge[1 - \exp(-b*t_r)]$

Modelo: $FP = 32,6 + 5[1 - \exp(-1,765*t_r)]$

		Variáveis Operacionais				Finos no Produto		
Condição	Ensaio	Ge	C_w	t_r	Vr	% Passante em 0,037 mm		
		(%)	(%)	(min)	(%Vc)	Experimental	Previsto	Diferença
	FN	0	0	0	0	32,6	32,6	0,0
	10	5	50	1,08	28,4	40,2	36,9	3,3
1	6	5	50	1,62	28,4	37,3	37,3	0,0
	2	5	50	3,24	28,4	36,0	37,6	-1,6
	FN	0	0	0	0	32,6	32,6	0,0
	9	5	50	1,08	41,4	40,5	36,9	3,6
2	5	5	50	1,62	41,4	39,7	37,3	2,4
	1	5	50	3,24	41,4	37,4	37,6	-0,2
	FN	0	0	0	0	32,6	32,6	0,0
3	8	5	55	1,87	28,4	33,5	37,4	-3,9
	4	5	55	3,73	28,4	47,7	37,6	10,1
	FN	0	0	0	0	32,6	32,6	0,0
4	7	5	55	1,87	41,4	38,8	37,4	1,4
	3	5	55	3,73	41,4	38,3	37,6	0,7

A Tabela 16 mostra o resultado do teste de hipóteses utilizado.

Tabela 16 – Resultado do teste de hipótese

α	**α/2**	**n**	**n – 1**	**s_d**	**d_m**	**$\|t_{n-1}\|$**	**$t_{n-1,\alpha/2}$**	**Resultado do teste**
1%	0,5%	14	13	3,21	1,13	1,32	3,012	ACEITA

O resultado do teste de hipótese foi de aceitar a hipótese nula, ou seja, a de que os resultados dos valores experimentais e os dos valores previstos não são diferentes, no nível de significância de 1%.

De acordo com Costa Neto (1977), a aceitação da hipótese nula corresponde, em geral, à insuficiência de evidência experimental, no nível de confiança desejado, para se chegar a sua rejeição. Esta aceitação, como o próprio nome sugere, não deve ser entendida como uma afirmação da hipótese nula.

Portanto, ao aceitar-se a hipótese de igualdade entre as médias dos valores experimentais e dos previstos, não se afirma que as médias dos valores são iguais. Constata-se, na realidade, que não há evidência de que as médias dos valores sejam diferentes, ou seja, que o modelo consegue prevê o desempenho da operação de escrubagem com uma precisão razoavelmente boa.

A Figura 47 mostra a comparação entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo para as condições 1 e 2 dos ensaios em escala piloto.

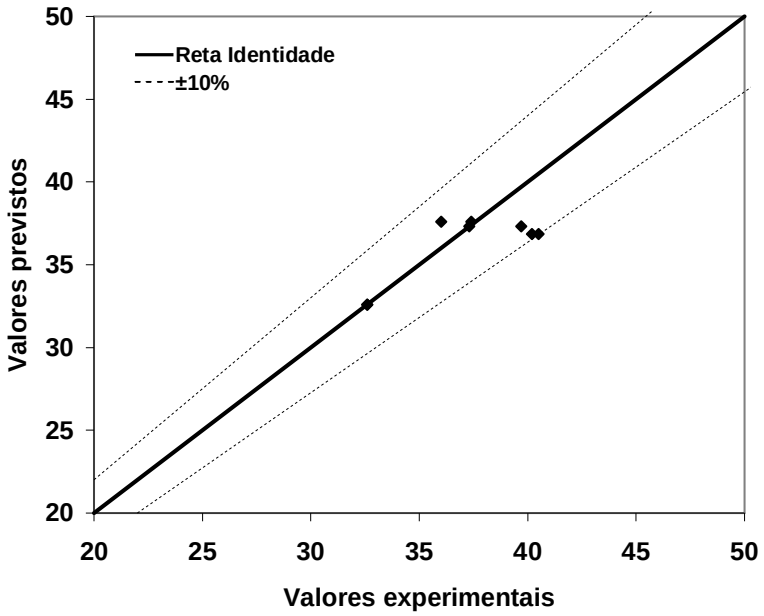

Figura 47 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo nas condições 1 e 2

Os valores da quantidade de finos, no produto escrubado, previstos pelo modelo nas condições 1 e 2 dos ensaios em escala piloto, apresentaram uma excelente aproximação com os dados experimentais, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de ±10% de desvio, em relação à reta identidade, que fornece a igualdade entre os valores experimentais e os previstos.

A Figura 48 mostra a comparação entre os valores experimentais e os valores previstos pelo modelo para as condições 3 e 4 dos ensaios em escala piloto.

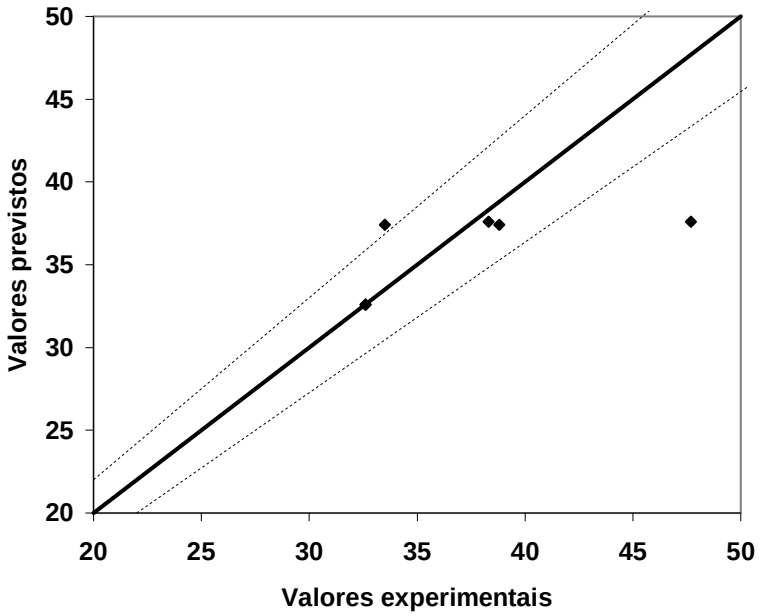

Figura 48 – Comparação entre os valores experimentais e os previstos pelo modelo nas condições 3 e 4

Os valores da quantidade de finos no produto escrubado, previstos pelo modelo para as condições 3 e 4 dos ensaios em escala piloto, apresentaram uma boa aproximação com os dados experimentais, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de ±10% de desvio, em relação à reta identidade.

Entretanto, para a condição 3, os resultados previstos pelo modelo de dois ensaios apresentaram desvios maiores que 10% (ensaios piloto 4 e 8).

8 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados dos ensaios experimentais, as principais conclusões do trabalho foram:

1. Dentre os parâmetros operacionais estudados em escala de laboratório, o grau de enchimento foi o que produziu efeito estatisticamente mais significativo, no nível de 90% de confiança, na desagregação da bauxita;

2. Não se verificou efeito de interação estatisticamente significativo na desagregação da bauxita, no nível de 90% de confiança, entre os parâmetros operacionais estudados na faixa experimental investigada;

3. O parâmetro tempo de residência da polpa não apresentou efeito estatisticamente significativo na desagregação da bauxita, no nível de 90% de confiança. Entretanto, este parâmetro foi considerado no desenvolvimento do modelo, juntamente com o grau de enchimento, por ele ser bastante utilizado no dimensionamento de unidades de escrubagem.

4. O modelo desenvolvido foi o seguinte:

$$FP = FN + Ge\left[1 - \exp\left(-b \cdot t_r\right)\right],$$

onde: FP é quantidade de finos produzidos na operação de escrubagem da bauxita, FN é a quantidade inicial de finos naturais presentes no minério e a parcela $Ge[1–\exp(-b.t_r)]$ representa a quantidade de finos gerados. Reitera-se que neste trabalho, considerou-se finos, as partículas com tamanhos inferiores a 0,037mm (400#).

5. Os valores da quantidade de finos, no produto escrubado, previstos pelo modelo apresentaram uma boa aproximação com os dados experimentais da operação em escala piloto, visto que a maioria dos valores se localizou dentro de uma faixa de ±10% de desvio, em relação à reta identidade.

6. O resultado do teste de hipótese foi de aceitar a hipótese nula, ou seja, a hipótese de que os resultados dos valores experimentais da operação de

escrubagem, em escala piloto, e os dos valores previstos pelo modelo, não são diferentes, no nível de significância de 1%.

7. O modelo proposto é empírico e restrito ao minério ensaiado.

8. Em função da ausência, na literatura consultada, de trabalhos dedicados à modelagem da operação de escrubagem, o modelo aqui desenvolvido representa, portanto, um recurso inovador para previsão de desempenho e otimização do processo de escrubagem de bauxita.

Para ampliar a aplicação do modelo desenvolvido, recomenda-se utilizar o método descrito com outras bauxitas, bem como, com minérios para os quais o beneficiamento inclua esta operação.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. E.; REIS, R. L. G. **Miraí, a mais nova unidade de bauxita da CBA já opera em ritmo quase normal**. Brasil Mineral, São Paulo, n. 276, p. 26 – 29, agosto 2008.

ANDREWS, W. H. Uses and specifications of bauxite. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. **Bauxite: proceedings**. New York: SME, 1984. Cap.3, p. 49 – 63.

BARROS NETO, B. et al. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. 401 p.

BRAY, E. L. Bauxite and alumina. **Mineral Commodity Sumaries** 2009, Washington: U. S. Geological Survey, 2009. p. 28 – 29. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf > Acesso em: 11 abr. 2009.

CALADO V.; MONTGOMERY, D. **Planejamento de experimentos usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-paper Serviços Editoriais, 2003. 260 p.

CHAVES, A. P. et al. The practice of bauxite ores processing. In: MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, 7., ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2007, Ouro Preto. **Proceedings**. Ouro Preto: UFOP, 2007. v. 1. p. 187 -192.

CHAVES, A. P. et al. Concentration of bauxite fines via froth flotation. In: INTERNATIONAL ALUMINUM CONGRESS, 3., 2007, São Paulo. **Congress Annals**. São Paulo: ABAL, 2007. p. 268 – 276. 1 CD-ROM.

CHAVES, A. P. **Teoria e prática do tratamento de minérios.** 2ª ed. São Paulo: Signus Editora, 2002. v. 1, 267 p.

CONSTANTINO, V. R. L. et al. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490 – 498, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422002000300024&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 10 ago. 2008. doi: 10.1590/S0100-40422002000300024.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264 p.

ENGENDRAR ENGENHEIROS ASSOCIADOS. **Scrubber / Trommel**. Campinas. 2 p. Catálogo explicativo do equipamento. Disponível em: < http://www.engendrar.com.br/images/catalogos/conc_PDF/CONC-CAT.pdf > Acesso em: 06 abr. 2009.

EVANS, K. A. **Industrial inorganic chemicals: production and uses**. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1995, Cap. 11, p. 277 – 349.

FLORES, J. C. C. ; DAMASCENO, E. C. **A bauxita e a indústria do alumínio**. São Paulo: EPUSP, 1998. 26p. BT/PMI/077.

GANDHI, R. et al. Design and operation of the world's first long distance bauxite slurry pipeline. In: TMS 2008 ANNUAL MEETING & EXHIBITION, 137., New Orleans, LA. **Lights Metals: Alumina and Bauxite**, 2008. v. 1. 6 p.

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

GREENWOOD, N. N. ; EARNSHAW, A. **Chemistry of the elements**. 2 ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 1997, p. 216 – 277.

GY, P. M. **Sampling of particulate materials:** theory and practice. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific, 1982. 431 p.

HILL, V. G.; OSTOJIC, S. The characteristics and classification of bauxites. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. **Bauxite: proceedings**. New York: SME, 1984. Cap.2, p. 31 – 48.

KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York: John Wiley & Sons, 1982. p. 201.

KIRK, O. **Encyclopedia of chemical technology**. 4ª ed. New York: John Wiley & Sons, 1992, vol. 2, p. 252-267.

LIMA, J. R. B. de. **Estudo da modelagem matemática da microciclonagem**. 1997. 162 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

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

MACHADO, R. C. A indústria do alumínio no Brasil. In: SEMANA DE ESTUDOS ALUMÍNIO E ZINCO, 2., 1961, Ouro Preto. **Alumínio e Zinco**. Ouro Preto: SICEG, 1962. p. 61 – 88.

MACHADO, R. C. **Apontamentos da história do alumínio primário no Brasil**. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1985.

MÁRTIRES, R. A. C. **Sumário mineral 2008**. Belém: DNPM, 2008. 2p. Disponível em:<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/aluminio.pdf > Acesso em: 22 abr. 2009.

MÁRTIRES, R. A. C.; SANTANA, A. L. **Informe mineral Pará 2007/2008**. Belém: DNPM, 2008. 10 p.

MENDES, F. A.; FEITOSA, F. E.; SUGDEN, D.; DELBONI JR., H.; SILVA, A. O. **Design, simulation and operation of the miltonia beneficiation circuit**. In: INTERNATIONAL ALUMINA QUALITY WORKSHOP, 8. Darwin, 2008.

METSO MINERALS. **Manual de britagem**. 6ª ed. Sorocaba: 2005a, p. 6-18.

METSO MINERALS. **Conceitos básicos em processamento de minerais**. 1ª ed. 2005b, p. 5:3.

MILLER, G. Drum scrubber design and selection. In: CONFERENCE ON METALLURGICAL PLANT DESING AND OPERATING STRATEGIES, 2004, Perth. **Metallurgical plant design and operating strategies.** Carlton: Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2004. p. 529 – 539. Disponível em: < http://www.millermet.com/index.php?page=papers >. Acesso em: 02 Mai. 2009.

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral comminution circuits:** their operation and optimization. Indooroopillly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996. 413 p.

NAPPIER-MUNN, T. J.; LYNCH, A. J. The modeling and computer simulation of mineral treatment process – current status and future trends. **Minerals Engineering**, v.5, n. 2, p 143-67, 1992.

NUNES, A. C. **Sistema computadorizado para ajuste de balanço de massas e metalúrgico.** 1992. 76 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

PATTERSON, S. H. Bauxite and nonbauxite aluminium resources and production: an up date. In: BAUXITE SYMPOSIUM, 1984, Los Angeles. **Bauxite: proceedings**. New York: SME, 1984. Cap.1, p. 3 – 30.

REIS, R. L. G. **Alcoa inaugura mina no primeiro trimestre de 2009**. Brasil Mineral, São Paulo, n. 276, p. 30 – 34, agosto 2008.

RÖHRLICH, M. et al. Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 18., 2001, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2001. p. 507 – 513.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM, 2005, p. 279 – 304.

TAGGART, A.F. **Handbook of mineral dressing**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1945. v.1, p.10-01 a 10-16

TRAJANO, R. B. **Princípios de tratamento de minérios: operações unitárias e aparelhos**. Rio de Janeiro, 1966. p. 62-63.

ULLMANN'S ENCYCLOPEDIA. **Industrial inorganic chemicals and products**. Weinheim: Willey-VCH, 1998, vol. 1, p. 25-83.

VALE. **A mais nova empresa do grupo CVRD, responsável pelo projeto bauxita de Paragominas**. Sala de imprensa. Releases. Disponível em:< http://www.vale.com/saladeimprensa >. Acesso em: 19 Jun. 2008.

VALE. **Unidades industriais de alumínio**. Disponível em:< http://www.vale.com/vale/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=566>. Acesso em: 21 Abr. 2009.

VALETON, I. **Bauxites**. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1972. p. 1- 2.

VARELA, J. J. Estado da arte do processo de lavagem de minérios: conceito, aplicação e desenvolvimento. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 23., 2009, Gramado. **Anais**. Porto alegre: s.n., 2009. v. 1. p. 225 – 232.

W&W3D CONSULTORIA E PLANEJAMENTO. **Tratamento mineral**. Belo Horizonte:2008. p. 90 – 93. Apostila para treinamento técnico operacional.

WHITAKER, W. **Técnicas de preparação de areia para uso na construção civil.** 2001. 202 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

Apêndice A – Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios de Laboratório

Tabela 17 – Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios em escala de laboratório

Malha	Aberturas das peneiras (mm)	% Passante Acumulada				
		Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Desvio Padrão
3”	76,2	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0
2”	50,8	82,7	94,0	88,8	88,5	5,7
1”	25,4	65,6	65,9	65,9	65,8	0,2
1/2”	12,7	55,0	55,2	54,8	55,0	0,2
3/8”	9,53	52,9	52,6	50,9	52,1	1,1
1/4”	6,35	48,3	47,9	45,1	47,1	1,7
4#	4,76	45,9	45,7	42,8	44,8	1,7
6#	3,32	43,6	43,0	40,2	42,3	1,8
9#	2,00	41,1	40,3	37,6	39,7	1,9
12#	1,40	39,4	38,7	35,7	37,9	2,0
20#	0,841	37,8	36,9	34,0	36,2	2,0
28#	0,595	36,7	35,3	32,4	34,8	2,2
35#	0,420	35,1	34,2	30,7	33,3	2,3
48#	0,297	34,2	32,4	29,4	32,0	2,4
65#	0,210	32,1	30,2	27,6	30,0	2,2
100#	0,149	30,6	27,9	25,8	28,1	2,4
200#	0,074	28,1	24,8	23,7	25,5	2,3
325#	0,044	25,0	23,3	22,3	23,5	1,3
400#	0,037	23,8	22,7	21,8	22,8	1,0

Apêndice B – Distribuição Granulométrica dos Produtos dos Ensaios de Escrubagem em Escala de Laboratório

Tabela 18 – Distribuição granulométrica dos produtos dos ensaios de escrubagem em escala de laboratório

Malha	Aberturas das peneiras (mm)	% Passante Acumulada							
		Ensaio							
		1	2	3	4	5	6	7	8
3”	76,2	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2”	50,8	100,0	86,6	89,9	88,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1”	25,4	72,2	78,8	71,5	76,5	78,7	76,1	79,0	72,0
1/2”	12,7	54,4	70,7	59,9	64,9	64,3	61,3	61,5	60,7
3/8”	9,53	51,8	67,1	57,2	61,5	57,3	57,0	57,4	55,9
1/4”	6,35	46,7	61,4	52,6	57,0	53,1	52,0	52,7	52,8
4#	4,76	44,5	58,9	50,1	54,3	49,5	48,7	49,5	50,2
6#	3,32	41,4	55,5	47,4	52,0	47,3	45,8	47,1	48,3
9#	2,00	38,9	52,5	45,0	48,7	44,2	43,4	44,3	45,3
12#	1,40	37,2	50,2	43,3	46,8	42,5	41,7	42,5	43,6
20#	0,841	35,7	48,2	41,6	44,9	40,9	40,2	40,9	42,0
28#	0,595	34,5	46,6	40,3	43,8	39,7	38,9	39,6	40,7
35#	0,420	33,4	45,3	39,1	42,1	38,4	37,8	38,6	39,6
48#	0,297	32,5	44,0	38,1	41,2	37,3	36,8	37,8	38,8
65#	0,210	31,0	42,7	36,4	39,6	35,9	35,4	36,6	37,5
100#	0,149	29,3	41,1	34,5	38,2	34,1	34,1	35,2	36,3
200#	0,074	26,5	37,1	31,1	35,6	33,4	31,5	32,0	33,8
325#	0,044	24,4	34,6	29,0	33,3	29,9	29,7	30,0	31,6
400#	0,037	23,5	33,6	28,1	32,5	28,8	29,1	29,0	31,0

Apêndice C – Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto

Tabela 19 – Distribuição granulométrica da alimentação dos ensaios em escala piloto

Malha	Aberturas das peneiras (mm)	Alimentação dos Ensaios											
		% Passante Acumulada											
		Amostra do Ensaio										Média	Desvio padrão
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
6”	152,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0,00
5”	127,0	96,4	93,3	100,0	100,0	100,0	100,0	92,5	100,0	100,0	100,0	98,2	3,01
4”	101,6	93,8	93,3	97,5	100,0	80,1	100,0	83,2	100,0	96,8	93,0	93,8	6,99
3”	76,2	89,2	84,4	89,2	91,8	74,4	86,4	77,4	98,8	95,1	83,7	87,0	7,50
2”	50,8	81,4	73,0	80,8	80,5	66,3	75,0	69,0	83,3	86,5	71,5	76,8	6,71
1”	25,4	70,5	56,6	70,5	69,8	57,7	62,7	59,5	72,9	78,8	63,3	66,2	7,32
1/2”	12,7	60,7	44,0	60,7	60,5	50,2	54,4	51,2	63,5	68,4	54,7	56,8	7,25
3/8”	9,53	57,7	39,9	58,0	57,6	47,5	51,7	48,7	60,4	65,6	51,9	53,9	7,42
1/4”	6,35	53,5	34,5	53,5	53,4	44,4	48,2	45,4	56,1	60,9	48,4	49,8	7,40
4#	4,76	50,8	31,4	51,1	50,9	42,1	45,5	43,2	53,5	57,4	46,2	47,2	7,32
6#	3,32	48,4	28,5	48,7	48,6	41,3	43,7	41,4	51,1	54,9	44,4	45,1	7,27
9#	2,00	45,7	25,7	46,1	46,2	39,1	41,5	39,3	48,6	52,0	42,3	42,7	7,22
12#	1,40	44,6	24,3	45,0	45,0	38,1	40,5	38,3	47,4	50,7	41,3	41,5	7,26
20#	0,841	43,0	22,5	43,5	43,5	36,8	39,2	37,0	45,9	49,3	40,1	40,1	7,31
28#	0,595	41,4	21,3	42,6	42,5	36,0	38,4	36,1	44,9	48,3	39,2	39,1	7,32
35#	0,420	41,1	21,2	42,2	37,8	35,4	38,0	35,7	44,6	48,0	39,0	38,3	7,20
48#	0,297	39,8	18,7	40,9	36,9	34,7	36,6	34,8	43,4	46,8	38,3	37,1	7,52
65#	0,210	39,1	18,1	39,6	35,7	33,8	34,8	33,7	42,1	45,6	37,5	36,0	7,36
100#	0,149	38,0	17,6	38,6	35,1	32,9	34,0	32,8	41,1	44,9	37,1	35,2	7,25
200#	0,074	36,3	16,9	36,9	33,5	31,5	31,7	31,4	39,3	43,3	36,2	33,7	7,02
325#	0,044	35,5	16,4	35,8	32,7	30,8	30,4	30,7	38,5	42,3	35,5	32,9	6,92
400#	0,037	35,1	16,2	35,4	32,4	30,6	30,0	30,4	38,2	42,0	35,3	32,6	6,89

Apêndice D – Distribuição Granulométrica dos Produtos dos Ensaios de Escrubagem em Escala Piloto

Tabela 20 – Distribuição granulométrica dos produtos *oversize (OS)* e *undersize (US*) dos ensaios de escrubagem em escala piloto

Malha	Aberturas das peneiras (mm)	% Passante Acumulada Ensaio																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US	OS	US
6”	152,8	100,0	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	100,0	-	96,7	-	100,0	-	100,0	-
5”	127,0	87,1	-	89,6	-	100,0	-	91,6	-	100,0	-	100,0	-	87,6	-	94,1	-	100,0	-	100,0	-
4”	101,6	81,7	-	86,2	-	90,2	-	86,5	-	85,6	-	98,1	-	85,8	-	92,1	-	87,3	-	94,0	-
3”	76,2	65,8	-	69,5	-	61,8	-	67,2	-	74,4	-	82,6	-	60,9	-	89,8	-	76,5	-	81,9	-
2”	50,8	46,4	-	53,1	-	34,6	-	49,8	-	57,9	-	58,5	-	47,1	-	88,0	-	59,1	-	62,9	-
1”	25,4	27,1	-	32,3	-	17,2	-	28,7	-	35,9	-	36,4	-	28,9	-	86,6	-	39,2	-	45,2	-
1/2”	12,7	13,5	-	17,6	-	9,3	-	14,6	-	19,8	-	20,3	-	18,8	-	84,3	-	26,1	-	29,6	-
3/8”	9,53	9,9	-	13,0	-	6,9	-	10,2	-	15,3	-	15,3	-	15,6	-	81,5	-	22,1	-	25,3	-
1/4”	6,35	4,9	-	5,4	-	3,5	-	4,2	-	6,83	-	8,32	-	11,0	-	77,3	-	16,8	-	19,7	-
4#	4,76	3,6	-	3,8	-	2,6	-	2,6	-	4,7	-	6,3	-	9,3	-	74,9	-	14,2	-	17,2	-
6#	3,32	3,3	92,0	3,5	93,3	2,4	94,7	2,4	95,4	4,4	93,5	5,8	93,4	8,6	94,6	72,7	96,7	13,1	94,9	16,2	94,3
9#	2,00	3,0	86,3	3,3	88,4	2,3	90,8	2,3	92,9	4,1	89,1	5,4	88,9	7,9	90,6	71,9	94,1	12,2	90,9	15,2	89,9
12#	1,40	2,9	83,7	3,2	85,9	2,2	88,5	2,3	91,3	4,0	86,3	5,2	86,2	7,6	88,0	96,7	92,1	11,8	88,4	14,8	87,9
20#	0,841	2,8	80,3	3,0	82,5	2,1	85,2	2,2	89,2	3,8	83,5	5,0	83,7	7,2	85,4	94,1	89,8	11,3	86,5	14,3	85,1
28#	0,595	2,7	78,5	2,9	80,4	2,0	82,9	2,1	87,5	3,6	81,4	4,8	81,7	7,0	83,5	92,1	88,0	11,1	84,1	14,0	83,2
35#	0,420	2,6	76,7	2,9	78,3	2,0	80,5	2,1	86,4	3,6	80,4	4,7	80,6	6,8	81,9	89,8	86,6	10,8	82,7	13,6	81,9
48#	0,297	2,5	74,8	2,8	76,5	1,9	78,3	2,0	83,5	3,4	77,6	4,5	78,0	6,6	79,7	88,0	84,3	10,5	80,4	13,3	79,7
65#	0,210	2,5	72,7	2,7	74,1	1,8	76,0	1,9	80,3	3,3	74,8	4,4	75,3	6,3	77,0	86,6	81,5	10,1	77,8	12,9	77,2
100#	0,149	2,4	70,3	2,6	71,7	1,7	73,3	1,9	78,3	3,2	73,2	4,2	73,9	6,1	75,5	84,3	77,3	9,8	72,0	12,5	75,8
200#	0,074	2,3	66,4	2,4	68,0	1,5	69,8	1,7	73,1	2,9	68,4	3,9	70,8	5,7	71,7	81,5	74,9	9,1	71,7	11,6	72,0
325#	0,044	2,2	63,4	2,3	65,8	1,4	67,5	1,5	70,7	2,9	66,7	3,8	69,6	5,5	69,1	77,3	72,7	8,8	69,8	11,1	69,6
400#	0,037	2,2	62,0	2,2	64,9	1,2	66,2	1,5	68,9	2,7	64,2	3,7	68,1	5,4	68,5	74,9	71,9	8,5	69,1	10,9	69,0

Apêndice E – Distribuição Granulométrica do Produto Desagregado dos Ensaios em Escala Piloto

Tabela 21 – Distribuição granulométrica do produto desagregado nos ensaios em escala piloto

Malha	Aberturas das peneiras (mm)	% Passante Acumulada									
		Ensaio									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6”	152,8	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
5”	127,0	94,7	95,2	100,0	97,4	100,0	100,0	94,1	96,0	100,0	100,0
4”	101,6	92,5	93,7	95,8	95,8	94,3	99,1	93,3	94,4	94,0	97,0
3”	76,2	86,0	85,9	83,6	89,7	89,8	91,7	81,6	85,4	88,9	91,0
2”	50,8	78,0	78,4	71,9	84,2	83,3	80,1	75,1	76,8	80,7	81,6
1”	25,4	70,1	68,8	64,4	77,6	74,5	69,6	66,5	64,9	71,3	72,8
1/2”	12,7	64,5	62,0	61,0	73,2	68,1	61,8	61,8	56,0	65,1	65,1
3/8”	9,53	63,0	59,9	59,9	71,8	66,3	59,5	60,3	53,2	63,2	63,0
1/4”	6,35	61,0	56,3	58,5	69,9	63,0	56,1	58,1	49,7	60,7	60,2
4#	4,76	60,4	55,6	58,1	69,4	62,1	55,1	57,3	48,1	59,5	58,9
6#	3,32	55,6	51,9	55,0	66,2	58,1	51,5	54,1	46,2	56,3	55,6
9#	2,00	52,1	49,1	52,7	64,5	55,3	48,9	51,7	44,6	53,7	52,8
12#	1,40	50,6	47,8	51,4	63,3	53,5	47,5	50,1	43,6	52,2	51,6
20#	0,841	48,5	45,8	49,4	61,9	51,8	46,0	48,6	42,3	51,0	50,0
28#	0,595	47,3	44,6	48,1	60,7	50,5	44,9	47,4	41,4	49,6	48,9
35#	0,420	46,3	43,5	46,7	59,9	49,9	44,3	46,5	40,7	48,7	48,0
48#	0,297	45,2	42,5	45,5	57,9	48,1	42,9	45,3	39,6	47,4	46,8
65#	0,210	43,9	41,2	44,1	55,7	46,4	41,3	43,7	38,2	45,8	45,3
100#	0,149	42,4	39,8	42,5	54,3	45,4	40,5	42,8	36,3	42,6	44,4
200#	0,074	40,0	37,7	40,5	50,7	42,4	38,8	40,6	35,0	42,1	42,0
325#	0,044	38,3	36,5	39,1	49,0	41,4	38,1	39,1	33,9	41,0	40,6
400#	0,037	37,4	36,0	38,3	47,7	39,7	37,3	38,8	33,5	40,5	40,2

Apêndice F – Distribuição *t de Student*

Tabela 22 – Pontos de probabilidade da distribuição *t* com *v* graus de liberdade

	Área de Probabilidade						
v	0,4	0,25	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005
1	0,325	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	0,289	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,277	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,271	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,267	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,265	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,263	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,449
8	0,262	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,261	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,260	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	0,260	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	0,259	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	0,259	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	0,258	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	0,258	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	0,258	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	0,257	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	0,257	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,257	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,257	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
∞	0,253	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

Fonte: Barros Neto et al. (2001)