

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**  
**(PPGEM)**

**O USO DE ESPECTRO-COLORIMETRIA PARA A SELETIVIDADE NA LAVRA E  
O TRATAMENTO DE CAULINS DA JAZIDA MORRO DO FELIPE (AP)**

SYDNEY SABEDOT

Dissertação para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
1997

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais**  
**(PPGEM)**

**O USO DE ESPECTRO-COLORIMETRIA PARA A SELETIVIDADE NA LAVRA E  
O TRATAMENTO DE CAULINS DA JAZIDA MORRO DO FELIPE (AP)**

**SYDNEY SABEDOT**

Geólogo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM) como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia*.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral

Porto Alegre

1997

Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Petter, UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, UFRGS

Prof. Dr. Adelir José Strieder, UFRGS

Dr. Luís Marcelo M. Tavares, CNPq

Prof. Dr. Luís Frederico Pinheiro Dick

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, outubro de 1997

Dedico esse trabalho à minha esposa Flor  
e aos meus filhos Aline e Arthur

## **AGRADECIMENTOS**

O autor agradece as pessoas e a entidade abaixo relacionadas, que foram fundamentais para a realização desse estudo.

Ao professor orientador, Dr. Carlos Otávio Petter, pelas diretrizes dos estudos, pelas valiosas informações e sugestões técnicas, sem as quais o trabalho não teria êxito, e por ter acreditado nas idéias discutidas durante a realização do mestrado.

Ao professor coordenador do LAPROM, Dr. Carlos Hoffmann Sampaio, pelo apoio técnico e administrativo e pela disponibilidade dos recursos operacionais do laboratório.

À banca examinadora, pelas sugestões apresentadas, valiosas para a redação final desse texto.

Aos colegas de mestrado e de doutorado, pelas sugestões e idéias discutidas durante a realização dos trabalhos; aos bolsistas de iniciação científica Aline Gamba Correia, Rita Elise Vaghetti Ribeiro, Luciana Mendes Andrade, Luciano Capponi, e à bolsista de iniciação técnica Fátima Cristiane Pereira Borba, pelas colaborações nas atividades laboratoriais e computacionais.

Aos funcionários da empresa Caulim da Amazônia S/A (CADAM), pelo apoio operacional e administrativo, especialmente aos senhores Sérgio Cabo, Orlando dos Santos Ferreira, Paulo Sérgio Rueda Criscuolo, Carlos Alberto Sá Pereira, Guido Brito e Luciano Júnior Rocha, pelo apoio logístico, pelo fornecimento das informações e dos dados operacionais e pela amizade cultivada no período do estágio.

À empresa CADAM, pela oportunidade do estágio no laboratório químico e pelas amostras remetidas.

Às demais pessoas e entidades que não foram acima citadas, mas que contribuíram para a realização dessa importante etapa da vida acadêmica do autor.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	xii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	xv
<b>RESUMO</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 O CAULIM</b> .....	4
2.1 MINERALOGIA .....	4
2.2 GÊNESE DAS JAZIDAS.....	5
<b>2.2.1 Depósitos primários</b> .....	5
<b>2.2.2 Depósitos secundários</b> .....	6
2.3 PRINCIPAIS DEPÓSITOS .....	7
<b>2.3.1 Brasil</b> .....	7
<b>2.3.2 Demais países</b> .....	7
2.4 PROPRIEDADES .....	9
<b>2.4.1 Físicas e químicas</b> .....	9
<b>2.4.2 Reológicas</b> .....	10
<b>2.4.3 Óticas</b> .....	11
2.5 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS .....	11
<b>2.5.1 Papel</b> .....	12
<b>2.5.2 Cerâmica</b> .....	13
<b>2.5.3 Tinta</b> .....	13
<b>2.5.4 Plástico e borracha</b> .....	14
<b>2.5.5 Outras aplicações</b> .....	14
2.6 MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS .....	14
2.7 MÉTODOS DE LAVRA.....	15
2.8 TRATAMENTO DO MINÉRIO.....	16
<b>2.8.1 Dispersão</b> .....	17
<b>2.8.2 Desareamento</b> .....	18
<b>2.8.3 Hidrosseparadores</b> .....	18
<b>2.8.4 Centrífugas</b> .....	19
<b>2.8.5 Hidrociclones</b> .....	19

<b>2.8.6 Delaminação</b> .....	20
<b>2.8.7 Separação magnética</b> .....	20
<b>2.8.8 Lixiviação</b> .....	21
<b>2.8.9 Flotação</b> .....	22
<b>2.8.10 Floculação seletiva e coagulação</b> .....	23
<b>2.8.11 Calcinação</b> .....	23
<b>2.8.12 Floculação</b> .....	24
<b>2.8.13 Filtragem</b> .....	24
<b>2.8.14 Secagem</b> .....	24
<b>3 A JAZIDA MORRO DO FELIPE (AP)</b> .....	25
3.1 ASPECTOS HISTÓRICOS .....	25
3.2 GEOLOGIA LOCAL .....	27
<b>3.2.1 Tipos litológicos</b> .....	29
3.3 LAVRA .....	30
3.4 BENEFICIAMENTO .....	34
<b>3.4.1 Dispersão</b> .....	34
<b>3.4.2 Desareamento</b> .....	34
<b>3.4.3 Centrifugação</b> .....	36
<b>3.4.4 Separação magnética</b> .....	37
<b>3.4.5 Branqueamento</b> .....	37
<b>3.4.6 Floculação</b> .....	37
<b>3.4.7 Filtragem</b> .....	38
<b>3.4.8 Extrusão</b> .....	38
<b>3.4.9 Secagem</b> .....	39
3.4.9.1 Linha <i>lump</i> .....	39
3.4.9.2 Linha <i>spray dried</i> .....	39
<b>3.4.10 Estocagem e embarque</b> .....	40
3.5 DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS FINAIS DA CADAM .....	40
<b>4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS RELEVANTES</b> .....	42
4.1 AMOSTRAGEM DA JAZIDA .....	42
4.2 VALIDAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	42
<b>4.2.1 Dispersão do caulim ROM</b> .....	43
4.2.1.1 Procedimentos .....	43
4.2.1.1.1 Dispersão mecânica .....	44
4.2.1.1.2 Dispersão manual .....	44
4.2.1.2 Resultados .....	44

4.2.1.2.1	Dispersão mecânica .....	44
4.2.1.2.2	Dispersão manual .....	46
<b>4.2.2</b>	<b>Efeito do método de confecção de pastilha na medição da alvura .....</b>	<b>48</b>
4.2.2.1	Procedimentos .....	48
4.2.2.2	Resultados.....	49
<b>4.2.3</b>	<b>Variação lateral da alvura na pastilha .....</b>	<b>50</b>
4.2.3.1	Verificação do erro médio das leituras .....	50
4.2.3.2	Procedimentos .....	51
4.2.3.3	Resultados.....	51
<b>4.2.4</b>	<b>Avaliação granulométrica do material grosso (&gt; 44 µm) do ROM.....</b>	<b>51</b>
4.2.4.1	Procedimentos .....	51
4.2.4.2	Resultados.....	53
<b>4.2.5</b>	<b>Avaliação granulométrica do material fino (&lt; 44 µm) do ROM.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Avaliação da performance do granulômetro Cilas.....</b>	<b>55</b>
4.2.6.1	Procedimentos .....	55
4.2.6.1.1	Massa de amostra.....	56
4.2.6.1.2	Volume de solução dispersante e tempo de ultra-som .....	56
4.2.6.2	Resultados.....	56
4.2.6.3	Comparações de resultados entre granulômetros .....	57
4.3	BENEFICIAMENTO DAS AMOSTRAS ROM .....	61
<b>4.3.1</b>	<b>Dispersão .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Desareamento.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Centrifugação.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Separação magnética.....</b>	<b>63</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Branqueamento.....</b>	<b>64</b>
<b>4.3.6</b>	<b>Floculação, filtragem e secagem .....</b>	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROM E DOS PRODUTOS DO BENEFICIAMENTO .....</b>	<b>66</b>
5.1	RECUPERAÇÃO MÁSSICA DAS AMOSTRAS BENEFICIADAS .....	66
5.2	ANÁLISES QUÍMICAS .....	67
5.3	ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	72
5.4	ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS .....	72
5.5	AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA.....	74
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DE TIPOLOGIAS DE CAULINS POR COLORIMETRIA .....</b>	<b>89</b>
6.1	ESPECTROS DE REFLECTÂNCIAS DAS AMOSTRAS ROM .....	89
6.2	A IMPORTÂNCIA DOS GRUPOS COLORIMÉTRICOS A, B, C, D .....	91

<b>7</b>	<b>RELAÇÕES MATEMÁTICAS ENTRE ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA, ALVURA ROM E ALVURA DO PRODUTO FINAL .....</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>112</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>113</b>
	<b>ANEXO 1.....</b>	<b>119</b>
	<b>ANEXO 2.....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Relação entre o empacotamento das partículas e a viscosidade.....	11
FIGURA 2: Mapa de localização da jazida Morro do Felipe (AP). .....	26
FIGURA 3: Perfil típico da seqüência caulínica da jazida Morro do Felipe (AP).....	28
FIGURA 4: Caracterização textural dos caulins tipos 0, I e II da jazida Morro do Felipe (AP). .....	31
FIGURA 5: caracterização textural dos caulins tipos IIIa, IIIb e IIIg da jazida Morro do Felipe (AP). .....	32
FIGURA 6: Caracterização textural dos caulins tipos III, IV e V da jazida Morro do Felipe (AP). .....	33
FIGURA 7: Fluxograma básico das operações de beneficiamento de caulim na CADAM. ....	35
FIGURA 8: Distribuições granulométricas de minerais de quartzo, originados por dispersões mecânica e manual de caulim ROM da CADAM, na faixa -500 $\mu\text{m}$ + 44 $\mu\text{m}$ . 54	54
FIGURA 9: Distribuições granulométricas de minério de caulim ROM, passante em malha 44 $\mu\text{m}$ , após dispersões mecânica e manual. ....	54
FIGURA 10: Gráficos dos testes de granulometria ( $D_{50}$ ) com amostras de produtos das centrífugas, relativos aos quadros 12 (amostra 1) e 13 (amostra 2). ....	59
FIGURA 11: Distribuições granulométricas de materiais diferentes analisados em granulômetros Sedigraph e Cilas.....	60
FIGURA 12: Fluxograma da geração das amostras a partir do caulim ROM.....	65
FIGURA 13: Distribuições granulométricas das amostras LA-AM1 e LI-AM2, que apresentaram, respectivamente, o $D_{50}$ de valor mais baixo e o $D_{90}$ de valor mais elevado entre as amostras ROM coletadas na jazida. ....	74
FIGURA 14: Distribuições granulométricas do ROM e das alíquotas Desareada e Produto da Centrífuga Branqueado, da amostra LI-AM1. ....	76
FIGURA 15: Distribuições granulométricas dos rejeitos do beneficiamento da amostra LI-AM1.....	77
FIGURA 16: Espectros de reflectância do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LA-AM2. ....	83
FIGURA 17: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LB-AM3.....	84
FIGURA 18: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LC-AM1.....	84
FIGURA 19: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LC-AM3.....	85
FIGURA 20: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LD-AM1. ....	85

FIGURA 21: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LD-AM4. ....	86
FIGURA 22: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LE-AM3. ....	86
FIGURA 23: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LF-AM4. ....	87
FIGURA 24: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LG-AM3. ....	87
FIGURA 25: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LI-AM1. ....	88
FIGURA 26: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LJ-AM3. ....	88
FIGURA 27: Espectros de reflectâncias, na faixa do visível, de alguns tipos de caulins não branqueados (A); derivada segunda dos espectros anteriores (B); derivada segunda dos espectros de diversos minerais de ferro (C). ....	92
FIGURA 28: Espectro de absorbância (absorção de luz) de 3 amostras ROM. ....	93
FIGURA 29: Derivada segunda dos espectros das 3 amostras ROM, mostrados na figura 28. ....	93
FIGURA 30: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo A. ....	95
FIGURA 31: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo B. ....	95
FIGURA 32: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo C. ....	96
FIGURA 33: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo D. ....	96
FIGURA 34: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo E. ....	97
FIGURA 35: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo F. ....	97
FIGURA 36: Curva de correlação entre as alvuras do ROM e dos produtos finais de 10 amostras, na faixa de comprimento de onda do visível. ....	102
FIGURA 37: Correlação entre as alvuras ROM de 10 amostras e os correspondentes ganhos de alvura após beneficiamento, no comprimento de onda 450 nm. ....	102
FIGURA 38: Coeficiente de correlação polinomial de 3º grau entre as alvuras ROM e produtos finais de 10 amostras, na faixa de comprimentos de onda do visível. ....	103
FIGURA 39: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador linear. ....	103
FIGURA 40: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador polinomial. ....	104

FIGURA 41: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador redes neurais.....	104
FIGURA 42: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador redes neurais e diâmetros $D_{10}$ , $D_{50}$ e $D_{90}$ . ....	105
FIGURA 43: Ilustração das alvuras obtidas na amostra LA-AM2, medida no beneficiamento (PSM-BRANQ) e previstas com os interpoladores matemáticos.....	106
FIGURA 44: Ilustração das alvuras obtidas na amostra LC-AM1, medida no beneficiamento (PSM-BRANQ) e previstas com os interpoladores matemáticos.....	106
FIGURA 45: Fenômeno da reflexão da luz em diferentes tipos de superfícies, com o aumento da rugosidade. ....	123
FIGURA 46: Espectros de reflectâncias de objetos opacos e coloridos, na faixa de comprimento de onda do visível. ....	123
FIGURA 47: Relação entre os parâmetros tonalidade, saturação e intensidade. ....	124
FIGURA 48: Em cada comprimento de onda, a quantidade de luz que chega no observador é obtida pela multiplicação de $E \times T$ .....	126
FIGURA 49: Diagrama de cromaticidade. ....	128
FIGURA 50: Diagrama do sistema CIELAB. ....	129

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Principais produtores de caulim para <i>coating</i> e <i>filler</i> no Brasil, em 1995. ..8	8
QUADRO 2: Principais estatísticas para o caulim no Brasil. ....8	8
QUADRO 3: Oferta mundial de caulim nos principais países produtores.....9	9
QUADRO 4: Características fundamentais do caulim como carga e como cobertura.....13	13
QUADRO 5: Resultados dos testes de dispersão mecânica com múltiplas variações em amostras ROM. ....45	45
QUADRO 6: Massa retida em peneiras após dispersão manual em 200 g de minério ROM. ....47	47
QUADRO 7: Massa retida (%) em peneiras granulométricas, após dispersões mecânica e manual em amostras ROM do mesmo tipo litológico. ....48	48
QUADRO 8: Alvura média do minério ROM com variação de procedimentos de pulverização. ....49	49
QUADRO 9: Resultados de medições de alvuras em variadas posições e no centro das pastilhas. ....52	52
QUADRO 10: Comparação entre as granulometrias de amostras <i>bulk</i> na fração -500 µm +44 µm após dispersões mecânica e manual. ....53	53
QUADRO 11: Comparação entre as granulometrias de amostras <i>bulk</i> na fração -44 µm, após dispersões mecânica e manual. ....53	53
QUADRO 12: ANOVA para os testes de granulometria (D <sub>50</sub> ) com e sem volume de solução dispersante e variados tempos de ultra-som em amostras do prod.das centrífugas58	58
QUADRO 13: ANOVA para os testes de granulometria (D <sub>50</sub> ) com variados volumes de solução dispersante e tempos de ultra-som em amostras do produto das centrífugas. ....58	58
QUADRO 14: Comparação entre os valores médios de granulometria de três <i>kits</i> de quartzo analisados nos laboratórios Cilas e LAPROM, no mesmo modelo de granulômetro. ....61	61
QUADRO 15: Análises granulométricas em caulins da CADAM, nos laboratórios CILAS e LAPROM. ....61	61
QUADRO 16: Amostras beneficiadas e as respectivas denominações litológicas usadas na CADAM. ....62	62
QUADRO 17: Recuperação mássica das amostras beneficiadas no laboratório da CADAM. ....67	67
QUADRO 18: Análises químicas por fluorescência de raios-x nas 44 amostras do minério ROM.....69	69

QUADRO 19: Análises químicas por fluorescência de raios-x nas alíquotas das 11 amostras beneficiadas. ....	70
QUADRO 20: Análises químicas por fluorescência de raios-x nos rejeitos das 11 amostras beneficiadas. ....	71
QUADRO 21: Principais granulometrias de amostras ROM obtidas em granulômetro a difração laser. ....	73
QUADRO 22: Granulometrias dos principais produtos do beneficiamento do caulim ROM. ....	75
QUADRO 23: Parâmetros colorimétricos das amostras ROM analisadas no LAPROM e na CADAM. ....	78
QUADRO 24: Dados colorimétricos da amostra LA-AM2. ....	80
QUADRO 25: Dados colorimétricos da amostra LB-AM3. ....	80
QUADRO 26: Dados colorimétricos da amostra LC-AM1. ....	80
QUADRO 27: Dados colorimétricos da amostra LC-AM3. ....	80
QUADRO 28: Dados colorimétricos da amostra LD-AM1. ....	81
QUADRO 29: Dados colorimétricos da amostra LD-AM4. ....	81
QUADRO 30: Dados colorimétricos da amostra LE-AM3. ....	81
QUADRO 31: Dados colorimétricos da amostra LF-AM4. ....	81
QUADRO 32: Dados colorimétricos da amostra LG-AM3. ....	82
QUADRO 33: Dados colorimétricos da amostra LI-AM1. ....	82
QUADRO 34: Dados colorimétricos da amostra LJ-AM3. ....	82
QUADRO 35: Identificações litológicas visuais (CADAM) e colorimétricas (LAPROM) das 44 amostras ROM coletadas na jazida Morro do Felipe. ....	94
QUADRO 36: Cores detectadas pelo olho humano, na faixa do comprimento de onda do visível. ....	121

**LISTA DE SÍMBOLOS**

nm	Nanômetro
$\mu\text{m}$	Micrômetro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m	Metro
$\text{m}^2$	Metro quadrado
$\text{m}^3$	Metro cúbico
km	Quilômetro
mg	Miligrama
g	Grama
kg	Quilograma
t	Tonelada
ml	Mililitro
s	Segundo
h	Hora
$^{\circ}\text{C}$	Grau centígrado
$^{\circ}\text{K}$	Grau Kelvin
rpm	Rotação por minuto
mPas	Mili Pascal
cp	Centipoises
$\sigma$	Desvio-padrão
kHz	Quilohertz
$\lambda$	Comprimento de onda
T	Período de vibração de uma onda elétrica
$\nu$	Frequência
E	Energia da luz visível
US\$	Dólar americano
$L^*, a^*, b^*$	Coordenadas colorimétricas

## LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise de variância, do inglês Analysis of variance
CADAM	Caulim da Amazônia S/A
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CIE	Comissão Internacional de Iluminação, do francês Commission International de l'Eclairage
CIF	Cost, Insurance, Freight
ECC	English China Clay
EPR	Ressonância Eletrônica Paramagnética, do inglês Eletronic Paramagnetic Resonance
FOB	Free On Board
HGMS	Separador Magnético de Alto Gradiente, do inglês High-Gradient Magnetic Separator
IG	Instituto de Geociências
ISO	International Standard Organization
LAPROM	Laboratório de Processamento Mineral
PAA	Ácido poliacrílico
PETROBRÁS	Petróleo Brasileiro Sociedade Anônima
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
ROM	Run-of-mine
TAPPI	Associação Técnica da Indústria de Papel e de Polpa, do inglês Technical Association of the Pulp and Paper Industry
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
USA	Estados Unidos da América, do inglês United States of America

## RESUMO

Esse estudo relaciona-se com o minério de caulim da jazida Morro do Felipe, AP, em lavra pela empresa Caulim da Amazônia S/A, onde define-se uma técnica para a identificação de grupos litológicos de caulins, distintos na jazida, por meio da avaliação de seus parâmetros colorimétricos. O objetivo é apresentar uma ferramenta alternativa e auxiliar para o técnico da lavra, na definição dos blocos que devem ser beneficiados. Na lavra, a identificação dos blocos é visual, isto é, subjetiva, através das características mineralógicas, texturais e pela cor do minério. Algumas variedades de caulim são facilmente identificadas através desse processo: ou são avermelhadas, indicando minério não econômico, com elevadas concentrações de óxidos de ferro e de titânio, ou são de cores esbranquiçadas, indicando um minério de excelente alvura, qualidade importante para o caulim. As variedades de cores intermediárias devem ser criteriosamente avaliadas antes de serem mandadas para a planta de processamento. Essas variedades causam preocupação e é para elas que essa ferramenta foi desenvolvida. Os métodos de avaliação, nesse estudo, estão baseados na identificação dos parâmetros colorimétricos do minério através do equipamento espectro-colorímetro. A avaliação é feita em pastilhas do material, que passa por processos de pulverização e prensagem. Para esses processos, algumas técnicas precisaram ser otimizadas durante os trabalhos. O resultado da avaliação no espectro-colorímetro é a formação de um espectro de reflectância na faixa de comprimentos de onda do visível (360 a 750 nm). A formação dos espectros tem relação com a quantidade de luz refletida pela superfície da pastilha analisada. Através desse processo, identificou-se 6 formas diferentes de espectros, com a análise de 44 amostras de minério bruto. Essas formas são indicativas de que existem características texturais e/ou mineralógicas diferentes no minério analisado, as quais influenciam o formato do espectro, razão pela qual seguiu-se a continuidade do estudo nessa direção, com uma quantidade de amostras abrangentes para todo o corpo mineralizado.

## ABSTRACT

This investigation is concerned with the kaolin ore from the Morro do Felipe (AP) being exploited by the company Cadam, where techniques for the identification of distinct lithological types of the deposit have been identified, through a detailed analysis of their colorimetric parameters. The objective is to provide an alternative tool to the mining technician and to aid in the selection of blocks for processing. During mining, the identification of blocks is by visual inspection, using their mineralogical, texture and ore color features. Some varieties of kaolin are easily identified through this process: some are red colored, indicating a non-economic ore with high concentrations of iron and titanium oxides and, on the other hand, there are light colored clays, indicating an ore of excellent brightness – an important characteristic in this type of ore. The intermediate color types must be carefully characterized prior to processing. These types are of concern and the current study is particularly devoted to these ores. The methods of evaluation are based on the identification of colorimetric parameters of the ore using a spectrophotometer. The measurements are made on a pastille of the pulverized ore sample after pressing. The process of preparation of these pastilles has been studied during this work. These measurements consist of determining the reflectance spectrum in the interval of wavelength corresponding to visible light (360 to 750 nm). The formation of spectra are related to the amount of reflected light from the surface of the analyzed pastille. Through this process, 6 different forms of spectra were identified, from the analysis of 44 samples of the bulk ore. There is strong indication that this clustering in the data may in fact be related to characteristics of the ore that are highly relevant to processing, such as texture, and type and quantity of contaminants. That, however, will require a more detailed work in the future, involving a larger number of samples.

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo apresentado nessa dissertação de mestrado está relacionado com minério de caulim. Faz parte de um convênio entre o Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM), do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a empresa Caulim da Amazônia S/A (CADAM). Tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a aplicação de técnicas espectro-colorimétricas na lavra seletiva de caulim da jazida Morro do Felipe, no estado do Amapá. A seletividade dos blocos é fundamental para o tratamento do minério.

A jazida é considerada uma das mais importantes reservas de caulim sedimentar no contexto mundial. Classificada como um corpo mineral homogêneo, apresenta litologias diferenciadas por suas características mineralógicas e texturais, distribuídas irregularmente na jazida. Algumas dessas litologias não são consideradas econômicas e são facilmente identificadas pela cor avermelhada dos óxidos de ferro e de titânio, presentes em concentrações excessivas. Esses caulins são descartados quando identificados. Os caulins que apresentam características litológicas bem definidas, e que também são facilmente identificados visualmente pela coloração esbranquiçada, dão origem a um produto final de excelente qualidade.

Entretanto, alguns caulins apresentam colorações intermediárias entre o branco e o rosa (causadas por concentrações variadas de óxidos de ferro e de titânio) que, às vezes, não permitem a identificação correta com base na percepção visual. Isso pode causar dúvidas quanto ao aproveitamento econômico do bloco. Durante o estágio realizado na empresa, observou-se que caulins contendo óxidos em demasia, não identificados durante o desmonte e alimentados no circuito de beneficiamento, provocam alterações operacionais, com reflexos na alteração de rotas e, até mesmo, na obtenção do produto final esperado. A seletividade de litologias baseada na percepção visual, portanto, nem sempre é eficaz. Quando ineficaz, costuma provocar problemas operacionais que podem refletir no custo e na produção.

Nesse estudo, a avaliação do minério bruto permitiu uma classificação litológica baseada nos parâmetros colorimétricos medidos em espectro-colorímetro. Os minerais contaminantes do caulim absorvem a luz incidente na amostra, em faixas determinadas de comprimentos de onda, gerando formas distintas de espectros de reflectâncias. Essas formas diferem conforme a natureza dos minerais contaminantes (MALENGREAU, 1994).

A espectro-colorimetria deve ser considerada uma ferramenta alternativa para os técnicos que operam na lavra. Naturalmente, a experiência e a prática dos profissionais continuarão sendo importantes e decisivas. Com a introdução e o desenvolvimento dessa nova técnica pretende-se que seja auxiliar quando a percepção visual não permitir definir se o bloco deve ser rejeitado ou beneficiado.

O estudo foi desenvolvido com as amostras coletadas na jazida Morro do Felipe para a caracterização tecnológica do minério, em conjunto com a empresa CADAM. As amostras foram tratadas sob diferentes processos laboratoriais, alguns dos quais desenvolvidos no LAPROM. Essas amostras e as alíquotas geradas pelos processos de beneficiamento foram analisadas para definição de suas características químicas, mineralógicas, granulométricas e colorimétricas.

Os trabalhos foram orientados para o estabelecimento de possíveis relações colorimétricas entre o minério bruto e o produto final, beneficiado. A idéia inicial era relacionar o ganho de alvura nas etapas de beneficiamento com as fases minerais contaminantes do ROM (*run-of-mine*), que basicamente são quartzo e minerais de ferro e de titânio. Esses últimos impregnam o minério com a cor róseo-avermelhada, indesejável nos blocos expostos para desmonte.

O processo de desareamento, primeira etapa da classificação industrial do minério, gera cerca de 8% a 15% de massa de rejeito com granulometria superior a 44  $\mu\text{m}$ . Havia uma expectativa de que esse material grosso fosse essencialmente quartzoso. Com essa proporção na jazida, poderia ter influência no espectro de reflectância do ROM e ser um caminho para o estabelecimento das relações pretendidas.

Os primeiros trabalhos de dispersão física do minério no laboratório, entretanto, já indicavam que a quantidade de quartzo grosso na jazida era inferior a 1% e que, portanto, outras opções deveriam ser pesquisadas. A escolha foi direcionada para a análise do conjunto de espectros de reflectâncias das amostras disponíveis. Observou-se que havia variações das formas dos espectros com os diferentes tipos litológicos amostrados.

A jazida é considerada extremamente uniforme em termos granulométricos, mas apresenta uma variedade de litologias localmente classificadas em tipos litológicos, segundo suas características mineralógicas e texturais. Esses tipos litológicos variam de acordo com a presença dos minerais contaminantes e devem ser rejeitados durante a lavra, quando as concentrações dos contaminantes são excessivas.

De um modo geral, minério com contaminantes em excesso corresponde a tipos

litológicos de cores avermelhadas, que são facilmente identificados em campo apenas pela percepção visual. Entretanto, quando os contaminantes ocorrem em concentrações menores no minério, a decisão de rejeitar, ou de aceitar determinados blocos com base na percepção visual pode comprometer a qualidade do produto final desejado. O problema pode ser agravado no período das chuvas, porque o minério esbranquiçado e úmido tem um aspecto visual diferente em relação ao mesmo minério seco.

A disponibilidade de informações detalhadas sobre os contaminantes da jazida é uma opção impraticável e antieconômica. Além disso, análises químicas costumam ter procedimentos demorados, constituindo uma alternativa inviável quando se deseja resultados rápidos. A alternativa apresentada tem como base as características colorimétricas do minério bruto, que são medidas física e matematicamente. Esse estudo se insere na etapa inicial do convênio entre o LAPROM e a CADAM e consistiu das etapas de amostragem, do estabelecimento da metodologia de análise, da análise espectro-colorimétrica das amostras e, por fim, da definição dos agrupamentos resultantes. No anexo 1, apresenta-se uma abordagem teórica sobre colorimetria, permitindo que o leitor tenha noções mais abrangentes sobre o tema.

## 2 O CAULIM

Esse capítulo aborda temas relacionados com o caulim, considerados importantes para o estudo. Destaca-se os aspectos mineralógicos e genéticos das jazidas, as características dos principais depósitos e as propriedades que fazem do caulim uma matéria-prima importante nas aplicações industriais. Comenta-se sobre as principais aplicações industriais, sobre as matérias-primas alternativas, sobre os métodos de lavra e sobre os processos industriais aplicados no beneficiamento do minério.

### 2.1 MINERALOGIA

O mineral caulinita, também denominado caolinita por alguns autores, faz parte do grupo dos minerais argilosos que são, essencialmente, silicatos de alumínio hidratados (DANA, 1974). Sua composição química é  $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ , contendo:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 39,5%;

$\text{SiO}_2$ : 46,5%;

$\text{H}_2\text{O}$ : 14%.

O mineral é formado pelo empilhamento regular de camadas 1:1, onde cada camada consiste de uma folha de tetraedros  $\text{SiO}_4$  e uma folha de octaedros  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ , ligados entre si em uma única camada, por meio de oxigênio em comum, dando uma estrutura fortemente polar (SANTOS, 1975).

Há importantes diferenças entre as argilas. O grupo desses minerais divide-se em quatro subgrupos: canditas, ilitas, esmectitas e vermiculitas. A caulinita pertence ao subgrupo das canditas, juntamente com os polimorfos dickita, nacrita e a forma hidratada haloisita (DEER *et al.*, 1981).

O sistema cristalográfico da caulinita é monoclinico. O mineral tem forma prismática, em placas diminutas, delgadas e configuradas em hexágono ou rombo (DANA, 1974).

As principais propriedades físicas são:

- clivagem: {001}, perfeita;

- dureza: 2 - 2,5 (escala de Mohs);

- densidade: 2,61 - 2,68;

- cor: branca, por vezes com tonalidades avermelhadas, acastanhadas ou azuladas e incolor em lâmina delgada;

- dispersão: fraca;
- geminação: rara;
- pleocroísmo: muito fraco (DEER *et al.*, 1981).

## 2.2 GÊNESE DAS JAZIDAS

Caulim é uma palavra que identifica uma rocha composta essencialmente de caulinita, com baixo teor de ferro e de cor geralmente branca. O termo também é utilizado para denominar o produto final do beneficiamento da rocha, de real valor econômico.

A caulinita é o mineral mais comum e o mais importante do subgrupo *canditas*. A haloisita forma depósitos haloisíticos e o demais minerais do subgrupo raramente ocorrem em depósitos econômicos.

Quanto a gênese, os depósitos de caulim são classificados em dois tipos: primários e secundários.

### 2.2.1 Depósitos primários

Também denominados depósitos residuais, os caulins primários são originados pelo intemperismo das rochas primárias, principalmente das ígneas. Ocorrem próximos à ou na superfície, exceto quando formados durante ciclos de intemperismo antigos e recobertos por rochas mais recentes (MURRAY & PATTERSON, 1983).

A formação de caulim primário, ou caulinização, ocorre por intemperismo, por diagênese e por ação hidrotermal. No intemperismo de rochas feldspáticas, especialmente em climas tropicais, em baixas temperaturas e envolvendo fluidos meteóricos, ocorre a liberação dos álcalis e da sílica. Na diagênese, a alteração dos feldspatos ocorre durante a sedimentação. A diagênese inicia onde o intemperismo acaba e se estende para profundidades de até 5 km e em temperaturas superiores a 200° C. Na ação hidrotermal, o mecanismo de formação de caulinita a partir de rochas aluminossilicatadas ocorre pela alteração das rochas durante a circulação de fluidos quentes (MANNING, 1995).

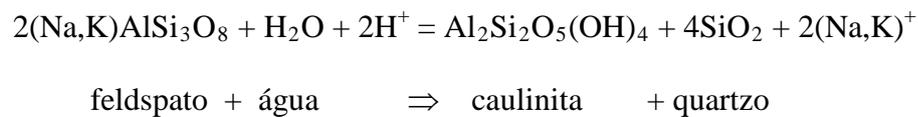
Solfataras é outra ocorrência de caulim, associada com os estágios finais de vulcanismo ácido, onde ocorre a caulinização de rochas vulcânicas ácidas (MANNING, 1995; BRISTOW, 1987).

A decomposição por intemperismo ocorre em temperaturas próximas a do ambiente. Inicia nos minerais ferromagnesianos, atinge os feldspatos e depois as micas. Os feldspatos

dão origem à caulinita quando é possível a eliminação total do potássio e quando a movimentação das águas é restrita. Se a drenagem da água é fácil os feldspatos podem dar origem à haloisita, ou misturas de caulinita com haloisita (SANTOS, 1975).

A caulinição de rochas primárias geralmente afeta o feldspato e a muscovita. Alguns minerais, como o quartzo e a turmalina, podem resistir ao processo de caulinição, enquanto que outros, como a biotita, podem se decompor, formando produtos contaminantes do caulim, que reduzem seu valor comercial (MANNING, 1995).

No processo de caulinição ocorrem as seguintes reações químicas:



Os depósitos originados por alteração hidrotermal das rochas são irregulares, geralmente alongados e relacionados com os alinhamentos de juntas e falhas, por onde percolam as soluções quentes. Geralmente são depósitos de pequeno porte. A ação da água superaquecida sobre pegmatitos, granitos e gnaisses favorece a decomposição dos feldspatos sódico-potássicos. As águas ácidas dissolvem inicialmente o sódio e depois o potássio, formando caulinita como o argilomineral predominante (SANTOS, 1975).

As formas dos depósitos primários geralmente são irregulares e suas espessuras mantêm relação com o intemperismo das zonas saprolíticas na rocha fonte (MURRAY & PATTERSON, 1983).

### 2.2.2 Depósitos secundários

Os caulins secundários são depósitos que apresentam maior amplitude volumétrica quando comparados com os primários, constituindo uma característica econômica importante. As maiores jazidas econômicas são as de origem sedimentar. Os caulins sedimentares podem ser classificados em três grupos: caulim sedimentar, areias caulínicas e *ball clays*. Há, entre esses grupos, tipos transicionais contínuos entre dois e até três grupos (BRISTOW, 1987).

Os caulins secundários formam-se por meio de três processos básicos: erosão, transporte e deposição de caulinitas já formadas; formação de caulinitas durante o processo de transporte e deposição; pela combinação desses dois processos (MURRAY & PATTERSON, 1983). A sedimentação ocorre em variados ambientes de deposição. Os mais importantes são os ambientes marinho, lacustre, fluvial e deltáico.

As formas mais comuns dos depósitos secundários são lentes tabulares e camadas contínuas ou descontínuas. Atingem espessuras de até algumas dezenas de metros e extensões laterais superiores a um quilômetro.

## 2.3 PRINCIPAIS DEPÓSITOS

Ocorrências de caulim são comuns em diversos países. Devido a importância do Brasil no contexto mundial, os depósitos brasileiros foram abordados em separado dos demais países que possuem reservas importantes.

### 2.3.1 Brasil

O Brasil é um dos mais importantes produtores mundiais de caulim em termos de volume, valor e qualidade. As reservas brasileiras estão distribuídas em diversos estados e, em 1992, as estimativas de reservas totais foram de 1,7 bilhão de toneladas. Destacam-se, nesse contexto, os estados do Pará e do Amapá que detêm cerca de 70% das estimativas oficiais (LOUGHBROUGH, 1993). Esses depósitos são do tipo sedimentar. Os estados do Centro-Sul detêm reservas predominantemente primárias. Com os dois novos projetos (Pará Pigmentos S/A e Rio Capim Caulim), em conjunto com as reservas da CADAM no Morro do Felipe, o Brasil aumentou sua força no mercado global da indústria do caulim e, em razão disso, tem sido considerado como uma nova Geórgia (KENDALL, 1996), em referência ao estado produtor norte-americano. A produção total, em 1995, ultrapassou 2 milhões de toneladas, das quais 1,07 milhões corresponderam aos caulins dos tipos *coating* e *filler*, tratadas em usinas de beneficiamento (LOUGHBROUGH, 1993). O quadro 1 mostra os números dos principais produtores.

A exportação brasileira atingiu 580 mil toneladas em 1995, ou 54% da produção, onde a CADAM participou com 98% do total. Os principais compradores foram Bélgica, Itália, Finlândia e Japão e o valor das exportações atingiu US\$57,2 milhões (LOUGHBROUGH, 1993). O quadro 2 mostra os principais dados estatísticos sobre produção, importação, exportação, consumo e preços de caulim no Brasil.

### 2.3.2 Demais países

As principais reservas e os maiores produtores de caulim são os Estados Unidos, nos estados da Geórgia, Carolina do Sul e Alabama. As reservas desse cinturão estão estimadas

entre 7 e 10 bilhões de toneladas e isso representa as maiores reservas mundiais de caulim sedimentar (LOUGHBROUGH, 1993).

QUADRO 1: Principais produtores de caulim para *coating e filler* no Brasil, em 1995.

ESTADO	PRODUÇÃO (t)	%	PRINCIPAIS EMPRESAS
AMAPÁ	640.000	60	Caulim da Amazônia S/A
SÃO PAULO	285.000	27	ECC do Brasil Mineração Ltda. Empresas de Mineração Hori Ltda.
MINAS GERAIS	100.000	9	Empresa de Caulim Ltda. Mineração Caolinita Ltda.
RIO G. SUL PARAÍBA PARANÁ	45.000	4	
TOTAL	1.070.000	100	

Fonte: DNPM - Sumário Mineral (1996).

QUADRO 2: Principais estatísticas para o caulim no Brasil.

ITEM	UNIDADE	1993	1994	1995
PRODUÇÃO BRUTA	t	1.560.000	1.800.000	2.020.000
PRODUÇÃO BENEFICIADA	t	830.000	953.000	1.070.301
IMPORTAÇÃO	t	1.628	2.044	2.363
	US\$ CIF	780.000	927.000	1.012.000
EXPORTAÇÃO	t	586.867	615.540	579.810
	US\$ FOB	61.013.696	51.711.000	57.229.265
CONSUMO	t	244.761	339.504	492.854
PREÇO MÉDIO	US\$/t FOB	104	105	107

Fonte: DNPM - Sumário Mineral (1996), modificada.

Na Europa, o Reino Unido é o segundo maior produtor mundial de caulim de alta qualidade, nas localidades de Devon e Cornwall, sudoeste do país. Ainda na Europa, Alemanha, França, Grécia, Espanha e Portugal também são importantes produtores de caulim de alta qualidade, em quantidades que variam de 100 a 300 mil toneladas/ano (BRISTOW, 1987).

Na América Latina, merecem atenção a Argentina, o Chile, o Suriname e o Equador. Nos demais continentes, os países com reservas importantes, são: Austrália, Indonésia, Índia, África do Sul e Irã. Estatísticas mais recentes incluem a União Soviética, a China e a

República da Coreia como principais produtores. O quadro 3 mostra a oferta mundial de caulim, ressaltando as reservas e a produção nos principais países.

QUADRO 3: Oferta mundial de caulim nos principais países produtores.

PAÍS	RESERVAS (1)		PRODUÇÃO (2)	
	(10 <sup>3</sup> t)	%	(10 <sup>3</sup> t)	%
Estados Unidos	8.500.000	70,83	8.770	38,47
Brasil	1.700.000	14,17	953	4,18
União Soviética (CEI)	1.000.000	8,33	800	3,51
Reino Unido	300.000	2,50	2.654	11,64
China	200.000	1,67	700	3,07
República da Coreia	50.000	0,42	2.600	11,40
Outros Países	250.000	2,08	6.323	27,53
<b>TOTAL</b>	<b>12.000.000</b>	<b>100,0</b>	<b>22.800</b>	<b>100,0</b>

Fonte: DNPM - Sumário Mineral (1996).

(1): Reservas totais estimadas 1989 (exceto Brasil, 1992).

(2): Produção Mundial 1994.

## 2.4 PROPRIEDADES

A origem geológica confere propriedades diferentes aos caulins. O caulim primário, ou residual, geralmente contém caulinita, quartzo e muscovita. A caulinita apresenta-se bem cristalizada, tem morfologia lamelar euédrica, possui baixa plasticidade e baixa resistência mecânica a cru. O caulim secundário, ou sedimentar, geralmente contém caulinita bem ou mal cristalizada, é de granulometria fina, tem boa plasticidade e mostra apreciável resistência mecânica a cru (SANTOS, 1975).

O aproveitamento industrial de uma jazida está associado com as características do depósito. Assim, propriedades como alvura, tamanho de partículas e mineralogia associada, entre outras, indicarão o uso adequado após beneficiamento.

### 2.4.1 Físicas e químicas

Cristalinidade, tamanho e forma das partículas são fatores importantes que influenciam nas propriedades reológicas e óticas dos caulins. Essas, por sua vez, têm influência na aplicação industrial, por exemplo, no papel. Os caulins bem cristalizados contêm caulinitas com formas pseudo-hexagonais bem definidas, enquanto que nos caulins mal

cristalizados os grãos geralmente são de morfologia indefinida e tendem a apresentar tamanhos menores (MURRAY).

O tamanho das partículas influencia na aplicação comercial e o ponto de controle é 2  $\mu\text{m}$ ; isto é, na avaliação da jazida, é importante a quantidade de partículas abaixo dessa granulometria. Partículas superpostas de caulinita, formando livros, ou pilhas, ocorrendo em abundância na jazida, podem influenciar de forma negativa no seu aproveitamento econômico.

Os caulins apresentam outras propriedades físicas importantes:

- pH natural: 4 - 7;
- índice de refração: 1,57;
- temperatura de fusão: 1.850° C.

A caulinita tem a propriedade de ser quimicamente inerte (MURRAY, 1964; VAN OLPHEN, 1977). Nas jazidas, as principais substâncias químicas são os óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e os de silício ( $\text{SiO}_2$ ), mas há outros óxidos em quantidades diminutas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), cujas concentrações são geralmente inferiores a 3%. Quando os óxidos de ferro e de titânio ocorrem em concentrações mais elevadas, inviabilizam o aproveitamento econômico da jazida (MURRAY).

#### **2.4.2 Reológicas**

A reologia está relacionada com o fluxo da matéria e com a viscosidade dos fluídos. As propriedades reológicas nas suspensões de caulins são complexas e exercem influência no controle operacional de cobertura na indústria do papel. As variáveis mais importantes são: a área superficial, o tamanho e o empacotamento das partículas (MURRAY).

A reologia de baixo cisalhamento tem relação com a área superficial das partículas; isto é, a viscosidade é maior, quanto menor o tamanho das partículas. A reologia de alto cisalhamento tem relação com o empacotamento das partículas (MURRAY), conforme mostrado na figura 1. A medida da viscosidade é feita em polpa com 70% a 71% de sólidos.

A máxima fluidez da polpa é obtida com a dispersão total das partículas. A característica hidrofílica da superfície da caulinita favorece a sua dispersão. No estado natural, o caulim tem pH ácido e encontra-se flocculado. A dispersão ocorre em pH neutro, ou levemente alcalino, com o uso de agentes dispersantes, principalmente hexametáfosfato de sódio e poliacrilatos (MURRAY).

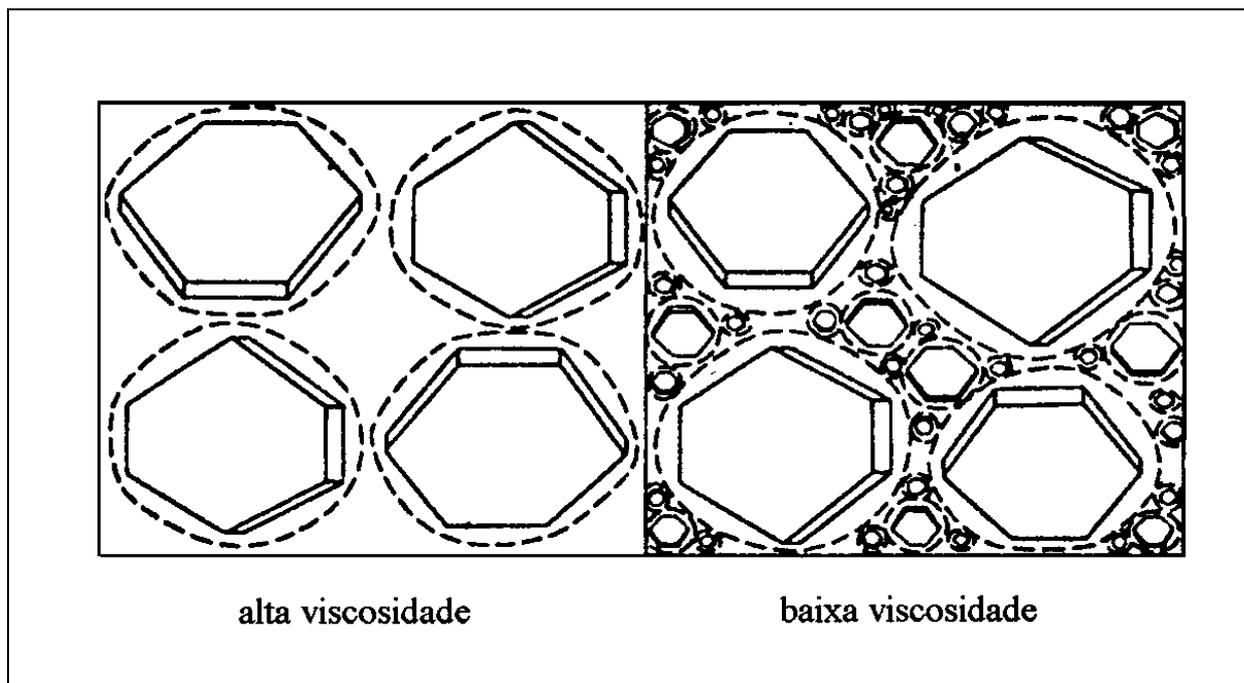


FIGURA 1: Relação entre o empacotamento das partículas e a viscosidade.

Fonte: MURRAY.

### 2.4.3 Óticas

A principal propriedade ótica avaliada em caulins é a alvura. É definida como sendo a relação, expressa em porcentagem, da quantidade de energia refletida por um corpo, comparativamente a um difusor que assume o valor de 100% de reflectância. O valor da alvura pode ser expresso pela reflectância em diferentes comprimentos de onda (GRIMSHAW, 1971).

Minerais contaminantes de uma jazida de caulim, como o quartzo e principalmente os minerais de ferro e de titânio, afetam o valor da alvura do minério ROM. Se presentes no produto final, afetam o valor comercial desse produto. Os processos de beneficiamento objetivam a retirada dos contaminantes e a elevação do valor da alvura.

## 2.5 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

O caulim apresenta propriedades físicas e químicas que permitem seu uso como matéria-prima em diversos produtos industrializados. Produtos inseticidas, cosméticos, veterinários, catalisadores para refino do petróleo, fármacos, cimentos e detergentes, entre outros, contêm caulim em suas composições (CLARK, 1982; MURRAY, 1964). Mas é em

um grupo principal de produtos industrializados que se concentra o uso do caulim mundialmente produzido: papéis, tintas, cerâmicas, borrachas e plásticos.

### 2.5.1 Papel

A indústria do papel é, de longe, a maior consumidora de caulim. Na maioria dos países produtores, como Estados Unidos e Brasil, a maior parte da produção é aplicada na fabricação de papéis (CLARK, 1982; HOFFMANN, 1985; BUNDY & ISHLEY, 1991). A tendência do mercado americano é aumentar ainda mais a participação do caulim na indústria do papel (LOUGHBROUGH, 1992).

Nessa indústria, o caulim pode ser utilizado sob duas formas: como carga (*filler*) e como cobertura (*coating*). Como carga, o caulim é adicionado à celulose com a finalidade de melhorar a formação e a opacidade durante a produção do papel. Como cobertura (ou revestimento), é empregado na cobertura do papel destinado à impressão de alta qualidade, conferindo-lhe brilho, maciez e alvura maiores.

As propriedades do caulim, de grande valor para a indústria do papel, são (MURRAY, 1964; McVEY & HARBER, 1989):

- Alvura: quanto maior, melhor.
- Opacidade: é a propriedade que impede que se leia o que está impresso no lado oposto de uma folha de papel. Quanto maior a percentagem de partículas de tamanhos menores que 2  $\mu\text{m}$ , maior é a opacidade do caulim.
- Abrasividade: causada pela presença de quartzo. Quanto menor, melhor.
- Tamanho das partículas: o critério é o tamanho em torno de 2  $\mu\text{m}$ . Quanto menor o tamanho médio ( $D_{50}$ ) e maior a homogeneidade das partículas, melhor.
- Viscosidade: quanto menor, melhor.
- Maciez das placas hexagonais.

Essas propriedades são exigidas para qualquer mineral industrial utilizado na indústria do papel (McVEY & HARBER, 1989).

O quadro 4 mostra as características fundamentais para os caulins usados como carga e como cobertura.

### 2.5.2 Cerâmica

A excelente propriedade dielétrica e a inércia química do caulim permitem seu uso na fabricação de componentes isolantes para a indústria da eletricidade (MURRAY, 1964). Além disso, propriedades como plasticidade, cor, ponto de vitrificação (PCE), retração linear e resistência mecânica à deformação permitem o uso do caulim na indústria cerâmica para fabricação de pisos, azulejos e louças sanitárias (MURRAY, 1979).

Para aplicação na cerâmica, a granulometria média das partículas deve ser menor que 45  $\mu\text{m}$  e são toleráveis quantidades de quartzo e feldspato livres na composição mineralógica, desde que mantenham a qualidade e que não produzam efeitos negativos nas propriedades das cerâmicas (HOFFMANN, 1985).

QUADRO 4: Características fundamentais do caulim como carga e como cobertura.

POPRIEDADE	CARGA	COBERTURA	
		MÍNIMO	ALTA QUALIDADE
Alvura (ISO 2470)	> 78%	> 85%	> 88%
Resíduos:			
> 45 $\mu\text{m}$	< 0,05%		< 0,03%
> 25 $\mu\text{m}$	< 1%		< 0,5%
Partículas < 2 $\mu\text{m}$	45%		60 a 96%
Abrasividade	< 30 mg quartzo	< 10 mg	< 2 mg
Viscosidade:			
Brookfield	-		500 mPas
Hércules	-	> 800 $\text{min}^{-1}$	1.100 $\text{min}^{-1}$

Fonte: HOFFMANN (1985).

### 2.5.3 Tinta

A aplicação de caulim em tintas é devido à sua inércia química, à sua insolubilidade, ao seu alto poder de cobertura, às suas boas propriedades de fluxo e ao seu baixo custo (MURRAY, 1964).

Utilizado como carga, melhora as propriedades reológicas de uma tinta, auxilia a formação de suspensão e a de pigmentos (FAZANO, 1995).

#### **2.5.4 Plástico e borracha**

Nas indústrias de plásticos e de borrachas especiais, o caulim é utilizado como carga. Nos plásticos, o uso do caulim proporciona superfícies lisas, boa estabilidade e alta resistência ao ataque químico (MURRAY, 1964). Caulim calcinado, aplicado nos plásticos, oferece boa resistência elétrica. Uma pequena quantidade de caulim calcinado nos revestimentos plásticos pode melhorar a resistência desses produtos (BRISTOW, 1987).

O diminuto tamanho e a forma das partículas, as cores claras, a relativa baixa densidade, a resistência química e a baixa dureza permitem o uso do caulim nas borrachas para aumentar a durabilidade, a resistência a abrasão e a rigidez dos produtos de borrachas sintéticas ou naturais (MURRAY, 1964; HOFFMANN, 1985).

#### **2.5.5 Outras aplicações**

O caulim é hidrofílico e pode ser disperso em água e em outros sistemas. Devido à natureza química de sua superfície, pode ser quimicamente modificado e tornar-se hidrofóbico, organofílico ou ambos (MURRAY, 1964). Essas modificações permitem estudos para novas aplicações, principalmente na engenharia das cerâmicas e na dos plásticos (BRISTOW, 1987; VOLZONI & TAVANI, 1996).

Estão em desenvolvimento estudos para o uso da caulinita no tratamento de efluentes industriais. Experimentos com suspensões aquosas contendo caulinita bem cristalizada e diferentes proporções de cromo, mostraram que, após um tempo de 60 minutos, o cromo fica adsorvido à caulinita. Testes em efluentes de tratamento da indústria coureira mostraram resultados semelhantes (VOLZONI & TAVANI, 1996).

### **2.6 MATÉRIAS-PRIMAS ALTERNATIVAS**

A principal aplicação do caulim é na indústria do papel. Nos últimos anos, a demanda foi estável para os segmentos refratário, borracha e cerâmica. Na indústria do papel, a demanda vem crescendo significativamente (LUZ & DAMASCENO, 1993).

O caulim ainda é o mineral mais amplamente utilizado na indústria do papel, mas existem outros minerais que estão sendo aplicados como alternativos. Os principais concorrentes são o calcário (carbonato de cálcio) e o talco.

A procura de materiais alternativos tem por objetivo melhorar a qualidade da produção papelreira, mas considera-se que essa produção ocorra em patamares de custos competitivos.

Em 1989, na Europa, o carbonato de cálcio natural participou com 33% da matéria-prima usada na indústria do papel e o talco participou com 10%. O primeiro produto, nos Estados Unidos, teve participação de 11% (VELHO & GOMES, 1992).

A substituição do caulim por carbonato de cálcio foi acelerada entre as décadas de 70 e 90, quer como carga ou como cobertura de papel. O talco tem uso restrito, exceto nos países que possuem extensos depósitos, como a Finlândia (VOLZONI & TAVANI, 1996). O mesmo acontece na Suécia, com relação ao gesso (VELHO & GOMES, 1992). No Brasil, desde 1990, a empresa Magnesita está explorando uma jazida de talco de média a alta qualidade, destinado, principalmente, à indústria cerâmica. Atualmente, produz cerca de 25.000 t/ano e, com o uso de separação magnética e flotação, o produto final atinge alvura superior a 90% ISO (International Standard Organization). O produto também é vendido para as indústrias de papel, de tintas e de plásticos (KENDALL, 1996).

O carbonato de cálcio brasileiro possui alto índice de alvura. Mas a presença de sílica confere maior abrasividade ao produto, o que pode ser corrigido por processo de flotação (AGUIAR, 1997).

Outros produtos também são utilizados como carga ou como cobertura mineral em substituição ao caulim, mas possuem aplicações restritas tanto por suas propriedades como pelo custo muito elevado: carbonato de cálcio precipitado, dióxido de titânio, silicatos sintéticos, mica, gesso, wolastonita e barita (McVEY & HARBEN, 1989; LOUGHBROUGH, 1992; BRISTOW, 1987; VOLZONI & TAVANI, 1996; VELHO & GOMES, 1992).

## 2.7 MÉTODOS DE LAVRA

O método de lavra em uma jazida de caulim depende de certas características físicas e geológicas do depósito: forma, tamanho, espessura e composição. O desmonte pode ser por meio de jatos de água (monitores) em jazidas de variados portes, ou com o uso de *moto-scrapers* em jazidas de grande porte. Em algumas áreas é necessário o auxílio de explosivos e o minério pode ser transportado por caminhões até a estação de tratamento (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Geralmente é necessário a remoção da cobertura estéril, realizada por meio de grandes *draglines* ou *moto-scrapers*. Lavra seletiva é importante em certas áreas, devido a variabilidades texturais e mineralógicas na jazida (MURRAY & PATTERSON, 1983).

Na maioria dos países produtores há uma grande preocupação com o meio ambiente, razão pela qual, durante a lavra, há um controle da rede de drenagem e cuidados com a poeira. Após a lavra, é feita a regularização da topografia e a recomposição da cobertura vegetal (MURRAY & PATTERSON, 1983).

O desmonte hidráulico é a operação mais comum nos depósitos primários, como em algumas áreas na Inglaterra e no Brasil. A polpa é transportada por bombeamento até a estação de tratamento (MURRAY & PATTERSON, 1983; BRISTOW, 1987; TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Nas grandes jazidas sedimentares, como na Geórgia (USA) e no Amapá (Brasil), o caulim é extraído e transportado por *moto-scrapers* que formam pilhas do minério em área próxima à estação de desareamento que, geralmente, fica junto à lavra (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Na maioria das minas de caulim são aplicados os métodos de lavra a céu aberto, porque as jazidas geralmente ocorrem próximas à superfície e nos métodos de lavra subterrânea os custos são elevados e as condições de sustentação são precárias, tornando esse método proibitivo para lavra de caulins (LUZ, 1994).

## 2.8 TRATAMENTO DO MINÉRIO

O caulim é uma matéria-prima industrial onde a qualidade e a homogeneidade são itens cada vez mais exigidos dos produtores. O destino do produto final depende de suas especificações, as quais dependem dos processos industriais implementados no produto ROM.

Cada jazida possui características físicas e mineralógicas próprias e o conhecimento desses dois fatores é fundamental para o planejamento do método de beneficiamento (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Existem, basicamente, dois processos diferentes usados para o beneficiamento de caulins: via seca e via úmida. O processo a seco é muito simples e origina um produto de baixo custo operacional, mas de baixa qualidade. Nesse processo, o caulim é britado, secado, pulverizado e classificado para a remoção das partículas mais grossas. O tratamento a seco é indicado para jazidas de considerável qualidade de alvura e baixo conteúdo de quartzo e grãos

grossos (MURRAY & PATTERSON, 1983). Essas características não são comuns nos jazimentos de caulins, razão pela qual o tratamento a úmido é o processo mais amplamente utilizado.

O beneficiamento via úmida de caulins resume-se a três etapas distintas: desagregação e liberação em suspensão aquosa; classificação por meio de processos físicos e químicos para a obtenção do produto desejado; filtragem, secagem e ensacamento do produto final (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Essas etapas são necessárias para a produção de uma matéria-prima que seja de maior alvura e de distribuição granulométrica uniforme. Isso é obtido por meio da remoção de partículas grossas e da remoção de minerais contaminantes do caulim que são, basicamente, quartzo, feldspatos, micas e os minerais de ferro e de titânio.

Os processos no produto bruto são variados e a instalação de sistemas de estágios múltiplos ou simples depende tanto da jazida como do produto final desejado. Os principais processos aplicados no tratamento a úmido de caulins serão a seguir comentados.

### **2.8.1 Dispersão**

Esse processo é o início do tratamento. O caulim bruto é colocado em grandes tanques agitadores (*blungers*) com água, formando uma polpa que varia de 30% a 60% de sólidos. O objetivo é a desagregação e a dispersão entre os minerais formadores do minério (MURRAY & PATTERSON, 1983; HOFFMANN, 1985; TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Existem equipamentos que fazem a desagregação por agitação: os agitadores com correntes, que consistem de tanques circulares rasos, dotados de um sistema de braços radiais, com pesadas correntes penduradas que quebram o material, dispersando-o; o tambor giratório, que consiste de um tanque de aço, ou concreto, contendo um sistema de facas que atua na desagregação; o lavador de facas, que consiste de um sistema de facas fixado a um eixo em ângulo, onde a desagregação ocorre mais pela fricção do que pela ação das lâminas das facas (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Os *blungers* funcionam como liqüidificadores. Os agitadores rotativos de média rotação (700 a 1.150 rpm) contêm uma hélice dupla na extremidade para provocar a desagregação entre os minerais. É importante que trabalhem com alta concentração de sólidos para aproveitar a fricção entre as partículas (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

Concomitante com a alimentação do caulim, dispersantes e modificadores de pH são adicionados na polpa para evitar a atração entre os argilominerais, cujas faces e bordas apresentam cargas opostas e favorecem a formação de agregados (MURRAY & PATTERSON, 1983; PRASAD *et al.*, 1991). Os principais dispersantes utilizados são: poliacrilato de sódio, silicato de sódio e hexametáfosfato de sódio. Os modificadores de pH são: carbonato de sódio (barilha) e hidróxido de sódio (LUZ, 1994).

### 2.8.2 Desareamento

O desareamento é a primeira etapa da classificação. Consiste da separação de frações granulométricas em suspensão e dispersas na polpa. Esse processo provoca a separação do material grosso ( $> 44 \mu\text{m}$ ), geralmente constituído por quartzo, feldspatos, minerais de ferro e de titânio e caulinita grossa (pilhas de caulinita), ou não dispersa. Os principais equipamentos utilizados nesse processo são: hidrosseparadores, centrífugas e hidrociclones (MURRAY & PATTERSON, 1983; TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

O material grosso é rejeito que passa, posteriormente, pelo processo de delaminação para a recuperação da caulinita, que é o mineral predominante. Além da delaminação, as empresas também desenvolvem dispositivos apropriados às características desse rejeito.

O material fino ( $< 44 \mu\text{m}$ ) segue para os hidrociclones, ou centrífugas. Além desses, o fracionamento pode ocorrer pela força da gravidade em tanques de sedimentação, ainda utilizados em algumas minas. Nesses tanques, a polpa defloculada permanece por um determinado tempo em repouso. Após a sedimentação do material mais grosso, a suspensão restante é retirada. Esse sistema também pode ocorrer no desareamento (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

### 2.8.3 Hidrosseparadores

Os hidrosseparadores são tanques cilíndricos de fundo cônico, onde pás fixadas em braços radiais removem o sedimentado (*underflow*) para a descarga no centro e no fundo, em um processo contínuo. O *overflow* contém as partículas finas e o controle granulométrico é feito pela adequada vazão da alimentação (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

#### 2.8.4 Centrífugas

As centrífugas são equipamentos utilizados para a classificação das partículas do caulim e obtenção de um produto com granulometria uniforme. Basicamente, são compostas de um rotor e de um helicóide interno que gira numa rotação diferente do rotor. A separação das partículas ocorre por ação da força centrífuga, que chega até 100 vezes a força da gravidade (PEREIRA *et al.*, 1995).

A aceleração radial no campo centrífugo produz, principalmente, dois efeitos. Por um lado, as forças de cisalhamento e as viscosidades estruturais são vencidas dentro do campo centrífugo. Por outro lado, a aceleração centrífuga produz um aumento acentuado da velocidade de sedimentação, aumentando a eficiência da classificação (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980).

As centrífugas trabalham com concentrações de 30% de sólidos e atingem separações de até 2  $\mu\text{m}$ . Nem todos os caulins podem ser tratados em centrífugas devido a viscosidade ou a abrasividade. Caulins com pouco quartzo, como os da Geórgia e os do Amapá, são ideais para as centrífugas (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980). Quando há muito quartzo, utilizam-se os hidrociclones que são equipamentos mais resistentes.

#### 2.8.5 Hidrociclones

Como as centrífugas, os hidrociclones também aplicam a força centrífuga para a obtenção de um material com granulometria uniforme.

Atualmente, a indústria do caulim visando *fillers* está incrementando a aplicação de hidrociclones no tratamento do minério, principalmente devido a dois fatores: os caros e grandes tanques de concreto, usados para os hidrosseparadores, podem ser substituídos por compactos e baratos sistemas de hidrociclones; o fracionamento com hidrosseparadores envolve floculação e defloculação química, enquanto que em hidrociclones não há necessidade do uso de produtos químicos (COCKS, 1991).

O procedimento mais econômico é o uso de hidrociclones de pequenos diâmetros (50 a 115 mm). Nas usinas de tratamento de caulins é comum o uso combinado de 10 a 1.000 hidrociclones de tamanhos variados (TRAWINSKI & EISENLOHR, 1980). Naturalmente, cada produtor desenvolve combinações apropriadas para otimizar o tratamento com hidrociclones (DALLMANN *et al.*, 1988).

### 2.8.6 Delaminação

A delaminação é um processo aplicado no material grosso do processo de desareamento do caulim. Esse material geralmente contém caulinita agregada, ou em pilhas, e sua separação dá-se por meio da moagem, ou da extrusão do material (MURRAY & PATTERSON, 1983). O processo objetiva à recuperação máxima do ROM alimentado, constituindo, na prática, um processo de dispersão.

Testes desenvolvidos em caulins portugueses, com aplicação de métodos mecânicos, com controles de área superficial específica, pH, tamanho de grãos e análises químicas, demonstraram que houve considerável aumento da alvura e diminuição do *yellowness* após a delaminação. O tratamento foi mais eficiente com o uso de hidrazina e em agitação mecânica (VELHO & GOMES, 1991).

O efeito da extrusão na distribuição granulométrica depende do tipo de mineral na jazida. O processo consiste da agitação da polpa, com alta taxa de cisalhamento. Estudos sobre o efeito da delaminação em caulins da Espanha mostraram o aumento da recuperação nas frações mais finas de caulim delaminado, comparados com o material não delaminado: na fração de 4 a 2  $\mu\text{m}$  a massa aumentou de 7% para 17%, e na fração inferior a 2  $\mu\text{m}$ , aumentou de 23% para 37%. O processo aumenta a área superficial específica. O estudo foi realizado em polpas com 75% de sólidos (PENA *et al.*, 1988).

### 2.8.7 Separação magnética

O uso de separação magnética no tratamento de caulins tem sido implementado nas grandes empresas, devido a grande eficácia obtida na eliminação dos minerais de ferro das polpas submetidas ao tratamento.

As empresas, como a English China Clay, têm usado esses equipamentos desde a década de 70 e relatam eliminação acima de 40% dos minerais de ferro da polpa submetida ao processo (LOFTHOUSE, 1981).

Alguns autores apresentam vantagens econômicas com o uso dos separadores magnéticos sobre a flotação e a lixiviação. Outros, apregoando o crescimento industrial, associam o uso dos separadores magnéticos à proteção ambiental e ao combate da poluição (YAN *et al.*, 1989), embora o uso desses equipamentos não elimine a aplicação de produtos químicos para o aumento da alvura das polpas cauliníticas.

A aplicação da força magnética na separação dos minerais de ferro (hematita, magnetita, ilmenita, etc.) baseia-se na susceptibilidade magnética desses minerais (D'ASSUMPÇÃO *et al.*, 1996).

A maioria dos equipamentos de separação magnética possui um sistema blindado denominado *canister*. Em seu interior, abriga uma solenóide geradora de alto campo magnético e uma matriz de aço inoxidável que ocupa cerca de 6% do volume do *canister*. Dependendo da polpa argilosa, o tempo de retenção no *canister* varia de 50 a 90 segundos (WINTERS & SELVAGGI, 1990). A velocidade do fluxo e a percentagem de sólidos na polpa têm influência na qualidade da separação (MAURYA & DIXIT, 1988).

Existem dois tipos principais de separadores magnéticos de alta intensidade (HGMS). Um, denominado separador magnético convencional, gera um campo magnético de até 2 tesla e é utilizado em minérios destinados à indústria cerâmica e como carga nas indústrias de papel e de tintas. (LOFTHOUSE, 1981; SHOUMKOV *et al.*, 1987).

O segundo tipo, denominado separador magnético com supercondutor, gera um campo de até 5 tesla e é refrigerado com hélio, num sistema também conhecido como criogênico. Tem sido utilizado principalmente em caulins destinados a produtos mais nobres, como cobertura na indústria do papel (D'ASSUMPÇÃO *et al.*, 1996; WINTERS & SELVAGGI, 1990).

Testes em separador magnético convencional com caulins da Índia, variando o pH das polpas de 2 até 11, mostraram que as argilas estudadas melhoraram suas alvuras na faixa de pH alcalino (MAURYA & DIXIT, 1990).

### **2.8.8 Lixiviação**

A lixiviação é um processo químico para aumentar a alvura dos caulins. Também conhecida como operação de branqueamento, o processo é aplicado depois dos processos físicos do fracionamento.

O processo permite a remoção posterior do ferro presente na polpa, na forma de óxidos nos minerais ilmenita, magnetita, rutilo, mica e turmalina, contaminantes cuja concentração varia entre 0,5% e 3% no caulim (VEGLIO *et al.*, 1993).

Dependendo da natureza dos contaminantes, a lixiviação poderá ser oxidante ou redutora. A lixiviação oxidante pode ser usada para caulins residuais contendo matéria

orgânica, com a aplicação de uma solução com peróxido de hidrogênio na presença de catalisadores, como o nitrato de ferro (LUZ, 1994).

A lixiviação redutora é o processo mais amplamente aplicado nas polpas caulínicas. Consiste da redução do ferro trivalente para ferro divalente com a aplicação de ditonito de sódio em um meio ácido. Nessa forma, o ferro é posteriormente removido durante a operação de desaguamento ou filtragem (MURRAY & PATTERSON, 1983; FERRON *et al.*, 1991).

O processo necessita de certas condições para ser otimizado: meio ácido (pH = 3), leve agitação, polpa com 20% a 25% de sólidos e temperatura ambiente (FERRON *et al.*, 1991).

O hidrossulfito de sódio é outro agente redutor possante, porém instável. As soluções de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  são mais estáveis quando estão mais concentradas. A decomposição ocorre rapidamente em concentrações mais baixas e é acelerada quando o pH é muito baixo e a temperatura é mais elevada. A decomposição será dez vezes mais rápida em uma solução a 55° C, em relação a uma solução a 10° C, em pH 3,5 (BAUDET & MORIO, 1974).

Um processo alternativo, denominado lixiviação redutora *in situ*, usando partículas pulverizadas de ferro e gás  $\text{SO}_2$  e com controle de pH (que deve ser igual a 3), tem sido utilizado em laboratório por algumas indústrias, em substituição ao hidrossulfito de sódio. Esse tratamento produz alvura e viscosidade iguais ou melhores que o tratamento com o hidrossulfito, e significativo menor custo de produção (FORBUS *et al.*, 1993).

Também há referências ao uso de processo microbiológico com bactérias heterotróficas e fermentação, mas ainda há alguns problemas insolúveis com relação a aplicação industrial do processo. Há, ainda, um processo que utiliza uma solução com ácido sulfúrico na presença de sucrose, constituindo uma substância redutora em pressão atmosférica (VEGLIO *et al.*, 1993).

### **2.8.9 Flotação**

A flotação é considerada como um dos mais eficientes métodos para a remoção de impurezas de caulins, embora algumas variações do método convencional devem ser implementadas para melhorar os resultados (YOON *et al.*, 1992).

O processo é aplicado na remoção dos minerais de titânio (anatásio e ilmenita). É conduzido sobre o produto previamente beneficiado por outros processos, nos quais aqueles minerais não são removidos por serem de pequenas dimensões ( $< 2 \mu\text{m}$ ) e ocorrerem em

pequenas quantidades (< 3%) (YOON *et al.*, 1992; GROUNDS, 1964). Também é aplicado na remoção de feldspatos dos caulins, devido a proximidade entre as densidades dos dois minerais. Essa característica dificulta a separação por outros processos (KÖSTER *et al.*, 1992).

Na prática, a flotação convencional em caulins é um processo por vezes ineficiente, devido ao diminuto tamanho das partículas em relação ao tamanho das bolhas, grandes demais para capturar o anatásio. Nessa situação, a ótima flotação exigiria um tempo de 45 a 100 minutos, considerado excessivo (YOON *et al.*, 1992).

Novos produtos são utilizados como coletores e vários estudos têm sido desenvolvidos para diminuir o tempo e aumentar a eficiência do processo. Os produtos utilizados têm sido os ácidos graxos, alquil hidroxamatos e a combinação de ácido oleico com óleo neutro, entre outros (YOON *et al.*, 1992; KÖSTER *et al.*, 1992; XUEDE & KEWU, 1993; CHIA & SOMASUNDARAN, 1983).

#### **2.8.10 Floculação seletiva e coagulação**

Por definição, floculação seletiva envolve a agregação de minerais indesejáveis (ganga) em flocos, permanecendo os demais minerais (econômicos) em suspensão. A separação da ganga é completada com flotação (ORUMWENSE, 1994). Para o caulim, o processo tem aplicação na remoção das impurezas titaníferas.

Em laboratório, o processo consiste da adição de dispersante químico na polpa. Quando a polpa está no estado superdisperso, as partículas de anatásio encontram-se mais liberadas da argila. Nesse estado, as partículas coagulam-se mutuamente, provavelmente devido ao alto poder iônico do dispersante químico. Coaguladas, as partículas sedimentam deixando a polpa argilosa progressivamente clareada (MAYNARD *et al.*, 1969).

Amido e ácido poliacrílico (PAA) representam as duas maiores categorias de floculantes comercialmente disponíveis, constituindo, respectivamente, polímeros natural e sintético (RAVISHANKAR & KHOSLA, 1995).

#### **2.8.11 Calcinação**

A calcinação de caulins é outro processo amplamente utilizado para a produção de produtos especiais. Quando o caulim é aquecido a temperaturas próximas de 1.050° C, transforma-se em mulita, espinélio ou cristobalita. Nessas formas, o produto tem maior

alvura, maior brilho e melhores propriedades de cobertura (devido a opacidade), mas apresenta maior abrasividade (MURRAY & PATTERSON, 1983).

### **2.8.12 Floculação**

Esse processo é o início da fase final do beneficiamento. A polpa floculada permite a filtração para a drenagem da água (PEREIRA *et al.*, 1995).

O processo também é conhecido como espessamento e ocorre após a etapa de branqueamento químico. Há um ajuste de pH entre 3 e 5 com adição de sulfato de alumínio que também age na coagulação (PEREIRA *et al.*, 1995; LUZ, 1994).

### **2.8.13 Filtração**

A filtração da polpa ocorre após a floculação onde é eliminada a água que contém o ferro solubilizado na etapa de branqueamento químico.

Dois sistemas principais de filtros são utilizados na filtração de polpas caulínicas: filtro prensa e filtro a vácuo de tambor rotativo. Na filtração, a concentração de sólidos que é cerca de 30% na polpa, passa para cerca de 65% nas tortas (PEREIRA *et al.*, 1995).

### **2.8.14 Secagem**

Esse é o último processo aplicado no caulim e gera um produto final com cerca de 6% de umidade (PEREIRA *et al.*, 1995).

A indústria utiliza dois sistemas de secagem: secador de esteira e *spray dryer*. No primeiro, após filtração e extrusão das tortas para a formação de “macarrões” (*lump*), o caulim é descarregado numa esteira e passa no interior do forno durante um determinado tempo. No segundo, a torta é inicialmente pré-dispersa e a polpa é pulverizada no interior de uma câmara de secagem. Em contato com a corrente de ar quente, a água evapora e origina um material finamente granuloso que cai para o fundo da câmara (PEREIRA *et al.*, 1995; MURRAY & PATTERSON, 1983).

### **3 A JAZIDA MORRO DO FELIPE (AP)**

Nesse capítulo, aborda-se os aspectos históricos e geológicos locais da jazida Morro do Felipe, comenta-se os métodos de lavra e os de beneficiamento do minério praticados na empresa CADAM e descreve-se os produtos finais gerados por esses métodos.

A jazida Morro do Felipe localiza-se no estado do Amapá, numa distância de 180 km e a 57° sudoeste da capital Macapá, junto à margem esquerda do rio Jari, cujo curso é a fronteira entre os estados do Amapá e do Pará. As coordenadas geográficas aproximadas são: meridiano 52° 30'; paralelo 0° 45'. O local pertence ao município de Laranjal do Jari.

A área industrial localiza-se na margem direita do rio Jari, no estado do Pará, distante 8 km da jazida, no local denominado Munguba, que pertence ao município de Almeirim. O acesso às áreas a partir de Belém, no estado do Pará, pode ser por via aérea ou por via fluvial. Por via aérea, há vôos comerciais diários para Monte Dourado, distrito de Almeirim, com duração de uma hora e meia. Por via fluvial, o tempo de uma viagem comercial nos rios Amazonas e Jari dura cerca de 30 horas. De Monte Dourado até Munguba o acesso é por estrada de terra num percurso de 18 km. A figura 2 mostra a localização da jazida.

#### **3.1 ASPECTOS HISTÓRICOS**

A jazida Morro do Felipe é considerada uma das mais importantes jazidas de caulim no contexto mundial (MARQUES & RODRIGUES, 1994). As primeiras ocorrências de caulim na Amazônia foram observadas pelos naturalistas Spix e Von Martius em 1820, em suas incursões exploratórias naquela região. A jazida foi descoberta por geólogos que percorriam a área no final de 1967, quando identificaram blocos rolados de material branco nas encostas do morro coberto pela vegetação (CADAM, 1973).

Os Pedidos de Pesquisa datam de maio/88 e o primeiro Alvará de Pesquisa foi concedido três meses após, para a Mineração Santa Mônica Ltda. Posteriormente, a empresa Caulim da Amazônia Ltda. fez um contrato de arrendamento com a primeira empresa para a exploração do depósito.

Os primeiros estudos tecnológicos foram desenvolvidos em um laboratório especializado no processamento de caulim, em Geisenhein (Alemanha). Outros estudos foram realizados na Universidade de Heidelberg (Alemanha) e em laboratórios especializados em papel, na Geórgia (Estados Unidos). Comprovada a qualidade do caulim, a empresa decidiu

pela implantação de uma usina de beneficiamento na margem direita do rio Jari, próximo à jazida. A área da jazida estava desenvolvida com plantações de *Gmelina arborea*, destinadas ao Projeto Jari Florestal, para a produção de celulose.

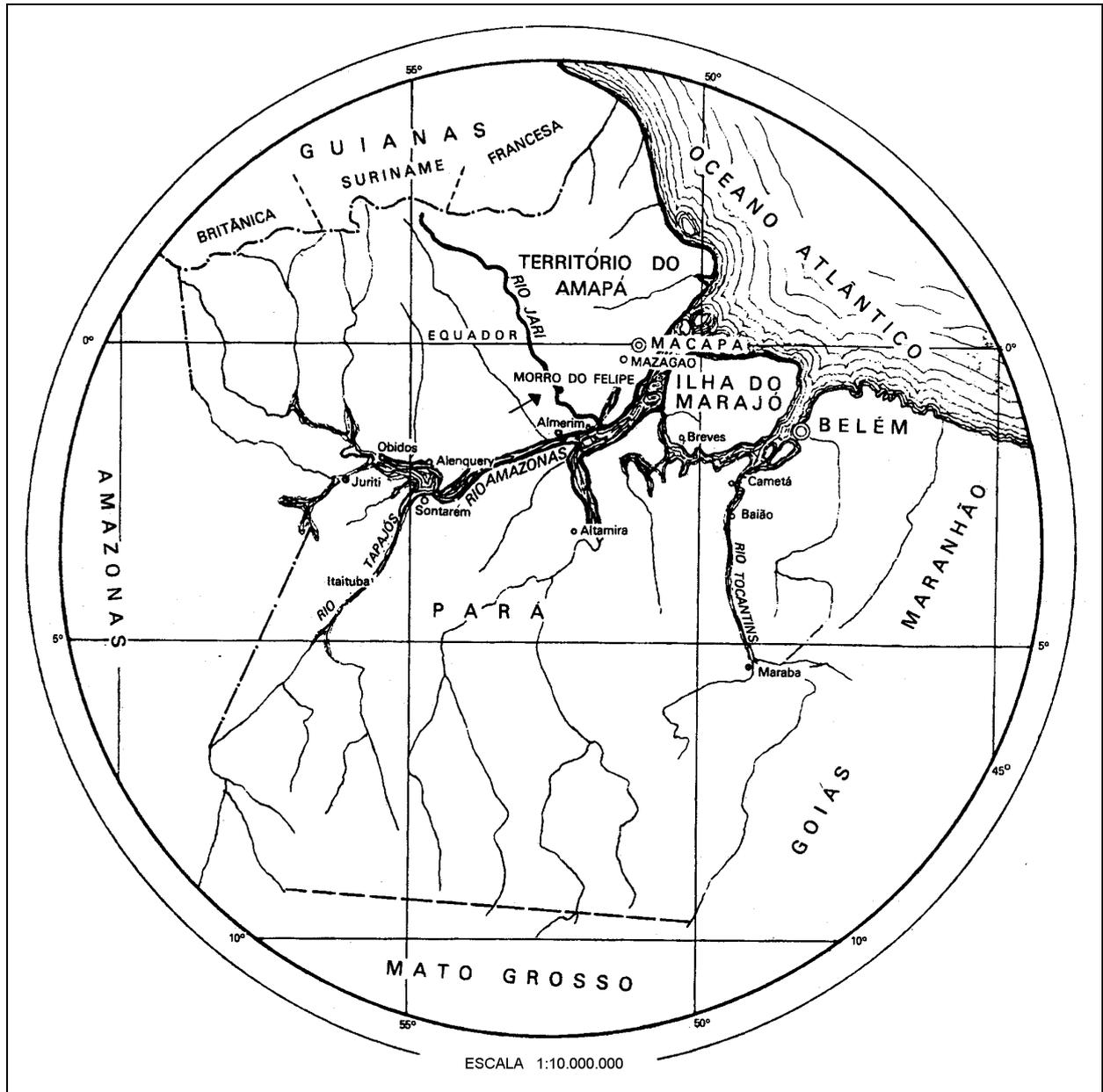


FIGURA 2: Mapa de localização da jazida Morro do Felipe (AP).

As reservas originais foram avaliadas, em 1973, em 42,5 milhões de toneladas de caulim de boa qualidade (alvura superior a 78%). A produção inicial prevista era de 220 mil t/ano. Esses dados foram dimensionados sem nenhum trabalho de sondagem. Em 1983, a empresa Geoklock iniciou um programa de sondagem rotativa no local. As informações alimentaram um banco de dados que ainda é utilizado pela equipe de lavra. A área do projeto é de 10 mil hectares, correspondendo a 10 áreas englobadas em um Grupamento Mineiro.

### 3.2 GEOLOGIA LOCAL

O depósito caulínítico Morro do Felipe pertence à Formação Barreiras, do período Terciário Superior (Plioceno), da era Cenozóica. Essa formação rochosa é constituída por uma seqüência de arenitos inconsolidados, areias argilosas e argilas caulíníticas, com espessura de até 700 metros, comprovada nas sondagens da PETROBRÁS (LOCZY, 1966).

Os sedimentos superiores à Formação Barreiras receberam a denominação de Argilas Belterra, que têm origem lacustre e que têm a cadeia andina como área fonte (SOMBROEK, 1966). Estudos posteriores indicaram que as Argilas de Belterra tiveram, como área fonte, uma região muito mais próxima que a região andina (TRUCKENBRODT & KOTSCHOUBEY, 1981). É neste horizonte que ocorre o caulim do Morro do Felipe. O substrato arenoso argiloso pertence à Formação Alter do Chão (DUARTE & KOTSCHOUBEY, 1994).

Platôs planos com até 200 metros de altura representam a topografia local. Eles constituem restos de superfícies pós-pliocênicas amplamente distribuídas na região (TRUCKENBRODT & KOTSCHOUBEY, 1981). As elevações encontram-se modeladas por vertentes abruptas, vales profundos e separados por drenagem secundária (GEOKLOCK, 1984).

A figura 3 mostra o perfil típico das ocorrências caulíníticas na área do Morro do Felipe. As sondagens da empresa Geoklock indicaram as seguintes características: a parte superior do depósito é formada por argilas de composição aluminosa laterítica (caulinita, gibsitita, ghoetita, etc.) de cor marrom-amarelada e com espessuras variando entre 7 e 8 metros desde a superfície. A base dessa seqüência é uma zona nodular de concreções ferruginosas e aluminosas, com matriz caulínítica e com espessura variando entre 0,5 e 3 metros. Abaixo da zona nodular, segue um caulim variegado e manchado de cores vermelhas, marrons e brancas, com espessura média de 16 metros.

Sotoposto ao nível manchado, ocorre a seqüência caulínítica propriamente dita, com espessura média de 36 metros. Essa seqüência subdivide-se em dois pacotes denominados caulim superior e caulim inferior, separados por uma camada de areia com espessura média de 3,5 metros e apresentando cores roxas-avermelhadas. O caulim superior tem menos quartzo e o caulim inferior é geralmente mais impuro, localmente quartzoso e bastante colorido.

Abaixo do caulim inferior, ocorre uma espessa camada de areia fina, constituindo a base da seqüência caulínítica. Essa camada contém menos de 1% de minerais opacos

(magnetita, ilmenita, titanomagnetita, martita, etc.), sem representar importância econômica (GEOKLOCK, 1984).

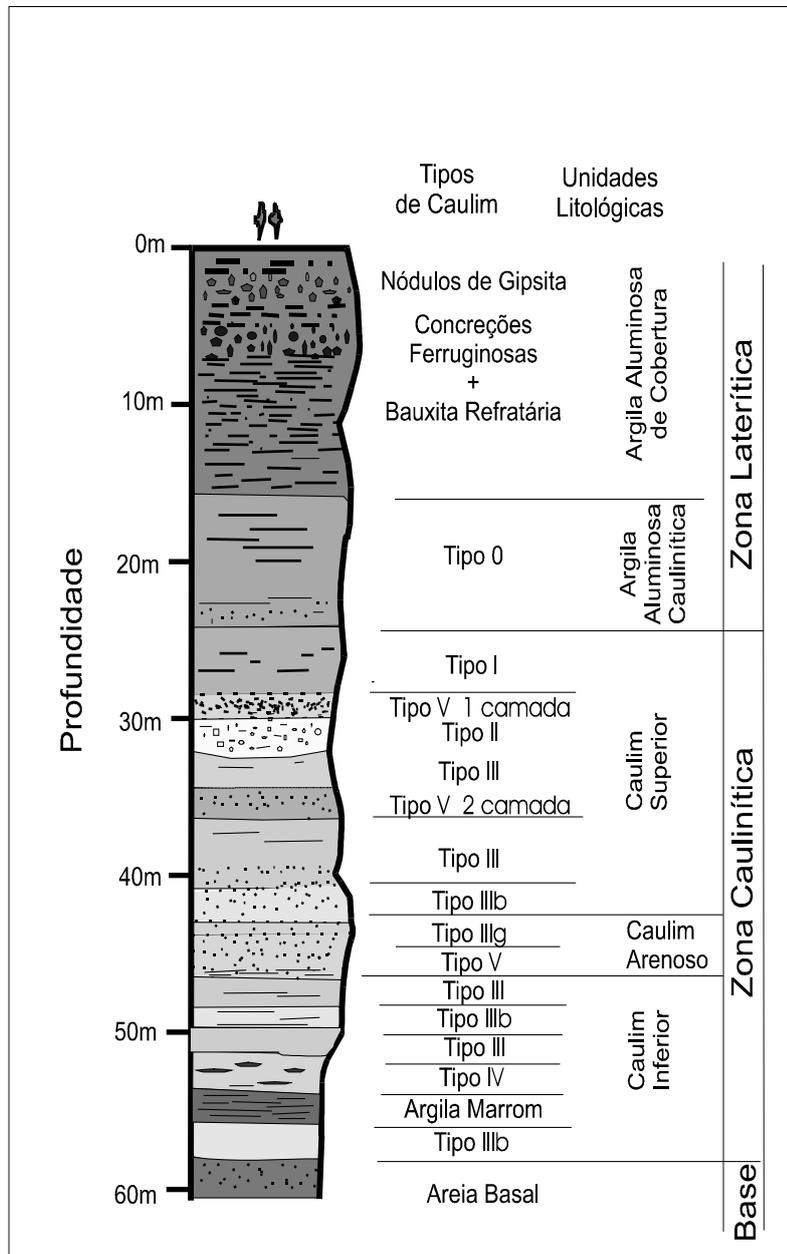


FIGURA 3: Perfil típico da seqüência caulínica da jazida Morro do Felipe (AP).Fonte: CADAM.

As reservas indicadas do Morro do Felipe são de 264 milhões de toneladas de caulim. O platô em lavra, Felipe II, tinha uma reserva original de 18 milhões de toneladas, das quais 7,3 milhões já foram lavradas.

Quanto a gênese, o depósito Morro do Felipe apresenta as características granulométricas texturais que muito se assemelham ao caulim tipo *hard* descrito por PICKERING & HURST (1989):

- acima de 80% composto por grãos mais finos que 2  $\mu\text{m}$ ;
- altas concentrações de ferro e de titânio;
- ausência de *books* de caulinita;
- camadas apresentando alto grau de selecionamento dos grãos;
- grãos subanédricos a anédricos misturados com grãos euédricos.

Essas características, entre outras, indicam sedimentação marinha de considerável extensão lateral em ambiente geológico de águas calmas e distante das áreas fontes (PICKERING & HURST, 1989).

Ensaio de microscopia eletrônica de varredura, executados na empresa Geoklock, evidenciaram a existência de ferro intercrystalino (não removível nos atuais processos de beneficiamento) e o alto grau de desordenamento dos cristais, comprovando, segundo a empresa, uma gênese sedimentar para o caulim do Morro do Felipe. Ainda segundo a Geoklock, isso significa que o caulim já foi depositado em seu estado atual, proveniente da alteração dos escudos cristalinos circundantes da antiga Bacia de Barreiras, constituídos de rochas ígneas do embasamento Guyanense.

Análises de difração de raios-x em caulinitas presentes na laterita mostraram que a reflexão basal da caulinita é relativamente ampla e de intensidade muito reduzida quando comparada com os raios-x padrão da caulinita presente no caulim. Isso pode sugerir que a caulinita está sendo alterada para minerais de ferro, como goetita e hematita (MURRAY, 1981).

### 3.2.1 Tipos litológicos

O estudo geológico da seqüência caulínica, por meio das sondagens, permitiu definição de seis tipos de caulins (GEOKLOCK, 1984), cujas denominações são utilizadas nas operações atuais. São eles:

Tipo 0: caulim friável, com freqüentes manchas róseas e avermelhadas e nódulos irregulares argilosos e gibsíticos.

Tipo I: caulim poroso, de consistência compacta, com matriz esbranquiçada e com planos de fraturas preenchidos com material ferruginoso.

Tipo II: caulim muito poroso (20% a 25%), compacto, ocasionalmente manchado e com freqüentes grãos de quartzo corroídos preenchendo os poros.

Tipo III: caulim granular, pastoso quando úmido, com ocasionais manchas púrpuras e avermelhadas. É dividido em três sub-tipos:

sub-tipo IIIa: branco e sem manchas;

sub-tipo IIIb: abundantes manchas púrpuras;

sub-tipo IIIg: com presença de opacos e de mica branca.

Tipo IV: caulim impuro, textura brechóide, localmente laminado (ambiente deposicional instável) e de cor acinzentada.

Tipo V: caulim arenoso (> 30% quartzo) e de coloração variada.

As figuras 4, 5 e 6 mostram a caracterização sumária dos tipos de caulim acima descritos.

### 3.3 LAVRA

As operações básicas de lavra no Morro do Felipe são: preparação da área, extração, transporte de estéril e minério e reabilitação das áreas lavradas (PEREIRA *et al.*, 1995).

Os tipos economicamente lavráveis são: I, II, III, III a, III b e III g.

A preparação da área de lavra consiste da abertura de acessos, desmatamentos e limpeza do terreno com o uso de tratores de esteiras, moto-serras e machados.

A remoção do estéril e do minério é feita com tratores de esteiras, motoniveladoras, retroescavadeiras e *moto-scrapers*. O solo orgânico é removido e estocado em local pré-determinado para reabilitação posterior das áreas lavradas.

Para o decapeamento do estéril, são utilizados *moto-scrapers* auxiliados por tratores de esteiras *pushers*, que escavam, carregam, transportam e descarregam o estéril em área já lavrada.

A lavra do minério de caulim ocorre em *strip mining*, compatibilizando a forma horizontal das camadas da jazida. O minério é escarificado por tratores de esteiras e posteriormente escavado, carregado e transportado por *moto-scrapers*, em operações semelhantes à remoção do estéril. O descarregamento é feito na pilha de estocagem próxima à estação de mistura, onde é executada a primeira etapa do beneficiamento do caulim.

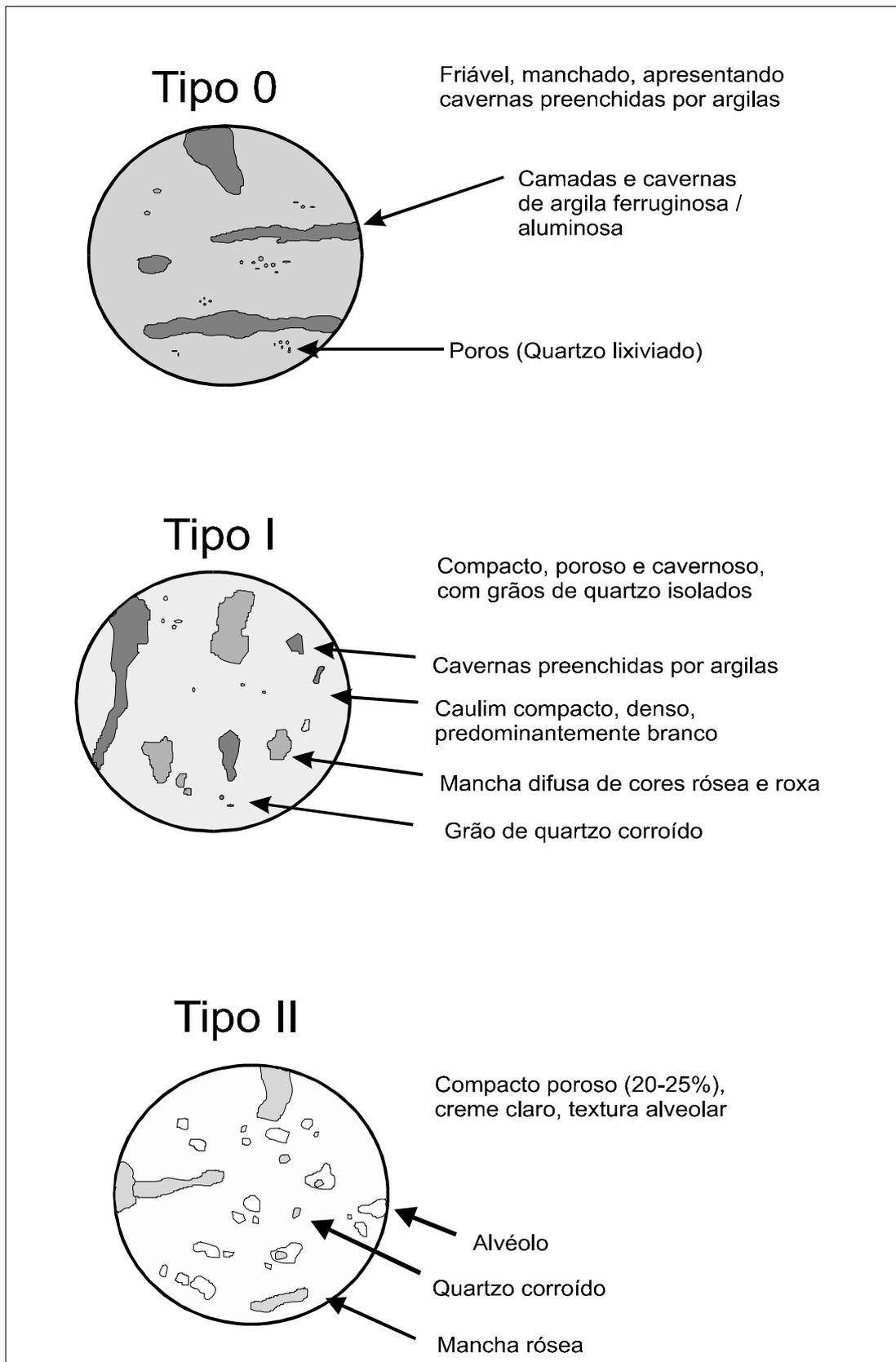


FIGURA 4: Caracterização textural dos caulins tipos 0, I e II da jazida Morro do Felipe (AP). Fonte: CADAM.

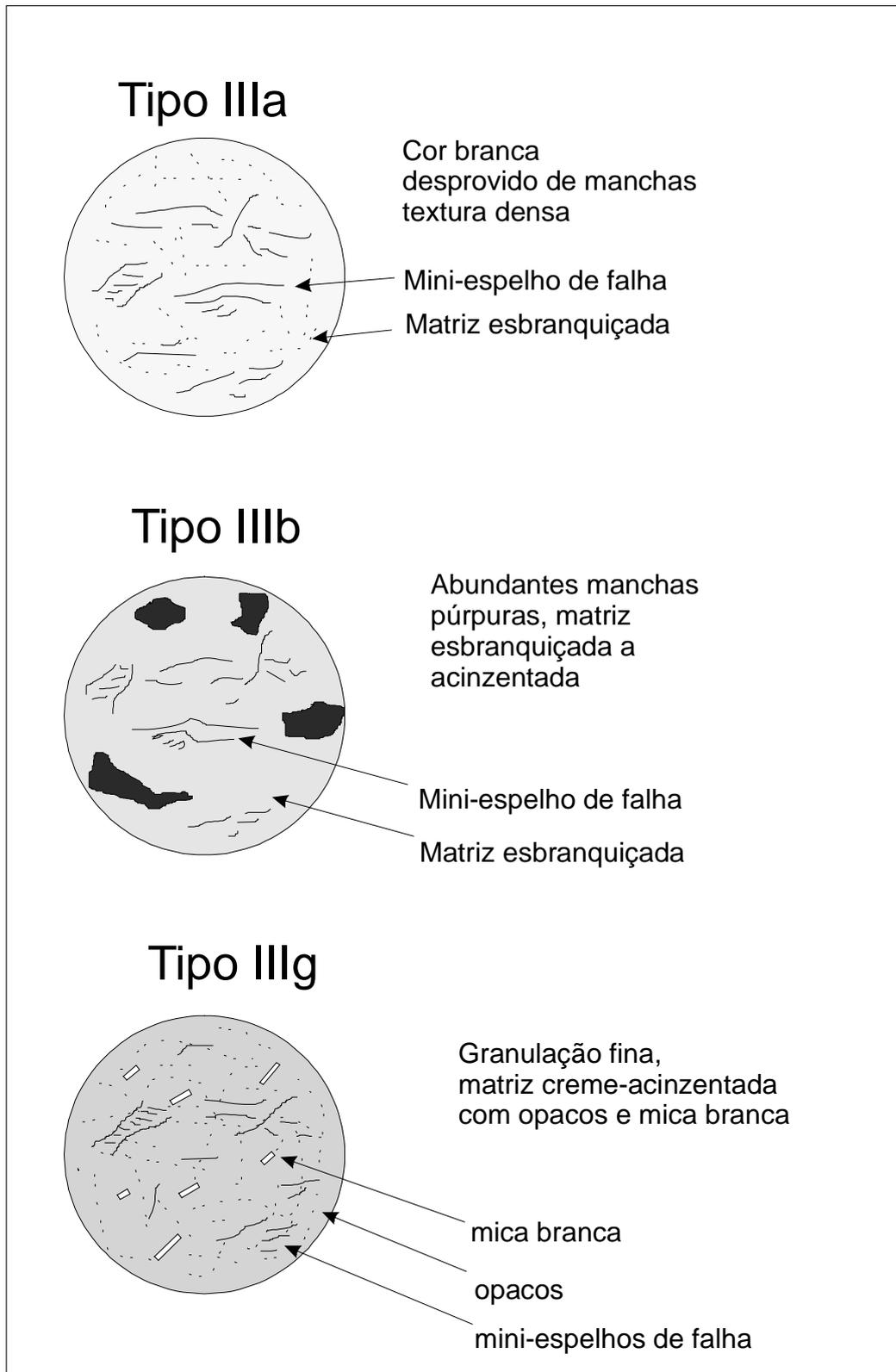


FIGURA 5: Caracterização textural dos caulins tipos IIIa, IIIb e IIIg da jazida Morro do Felipe (AP). Fonte: CADAM.

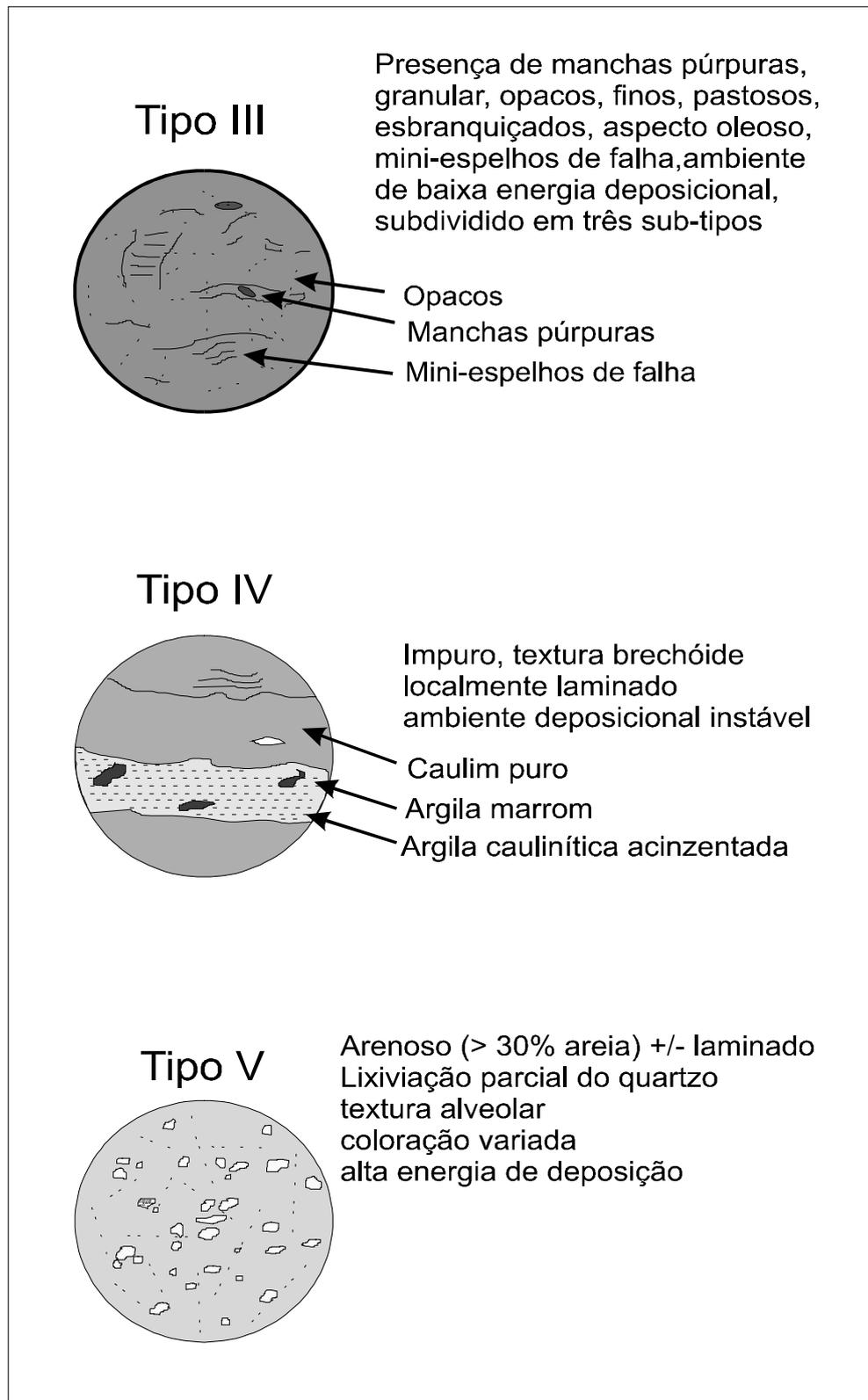


FIGURA 6: Caracterização textural dos caulins tipos III, IV e V da jazida Morro do Felipe (AP). Fonte: CADAM.

### 3.4 BENEFICIAMENTO

Os processos aplicados no tratamento do minério ROM são: dispersão, desareamento, centrifugação, separação magnética, branqueamento, floculação, filtragem, extrusão, secagem, estocagem e embarque do produto final (PEREIRA *et al.*, 1995; CRISCUOLO, 1996). A figura 7 mostra o fluxograma básico das operações, abaixo detalhadas.

#### 3.4.1 Dispersão

O objetivo da estação de mistura, ou de dispersão, é a desagregação/dispersão do minério bruto que está estocado em pilhas e é formado por caulinita e minerais contaminantes agregados entre si.

A dispersão ocorre por meio de ações mecânica e química, durante a mistura de minério ROM, água e agente dispersante.

O processo inicia com a alimentação do minério em duas moegas (linhas A e B), por meio de retroescavadeira ou pá-carregadeira. As moegas são descarregadas por um sistema de esteiras que conduz o minério aos tanques misturadores (*blungers*). As duas linhas trabalham em paralelo e cada uma possui dois tanques misturadores.

Em cada linha, a esteira alimenta o primeiro tanque misturador onde, sob intensa agitação por palhetas, são adicionados, simultaneamente com o minério, água e solução dispersante. Disperso, o caulim passa do primeiro ao segundo tanque por transbordamento. O material transbordado dos tanques secundários alimenta um quinto tanque misturador. O transborde do quinto tanque, constituindo a polpa do caulim já disperso, é bombeado para a estação de desareamento.

A dispersão libera a caulinita, o quartzo e os demais minerais contaminantes presentes na polpa. O controle é feito com medições do pH e da densidade da polpa, realizadas a intervalos de tempo constantes durante a operação.

#### 3.4.2 Desareamento

Como o próprio nome indica, o objetivo dessa estação é a remoção da areia da polpa bombeada na estação anterior, localizada a um quilômetro desta.

A remoção ocorre nos circuitos de hidrosseparadores, também denominados desareadores.

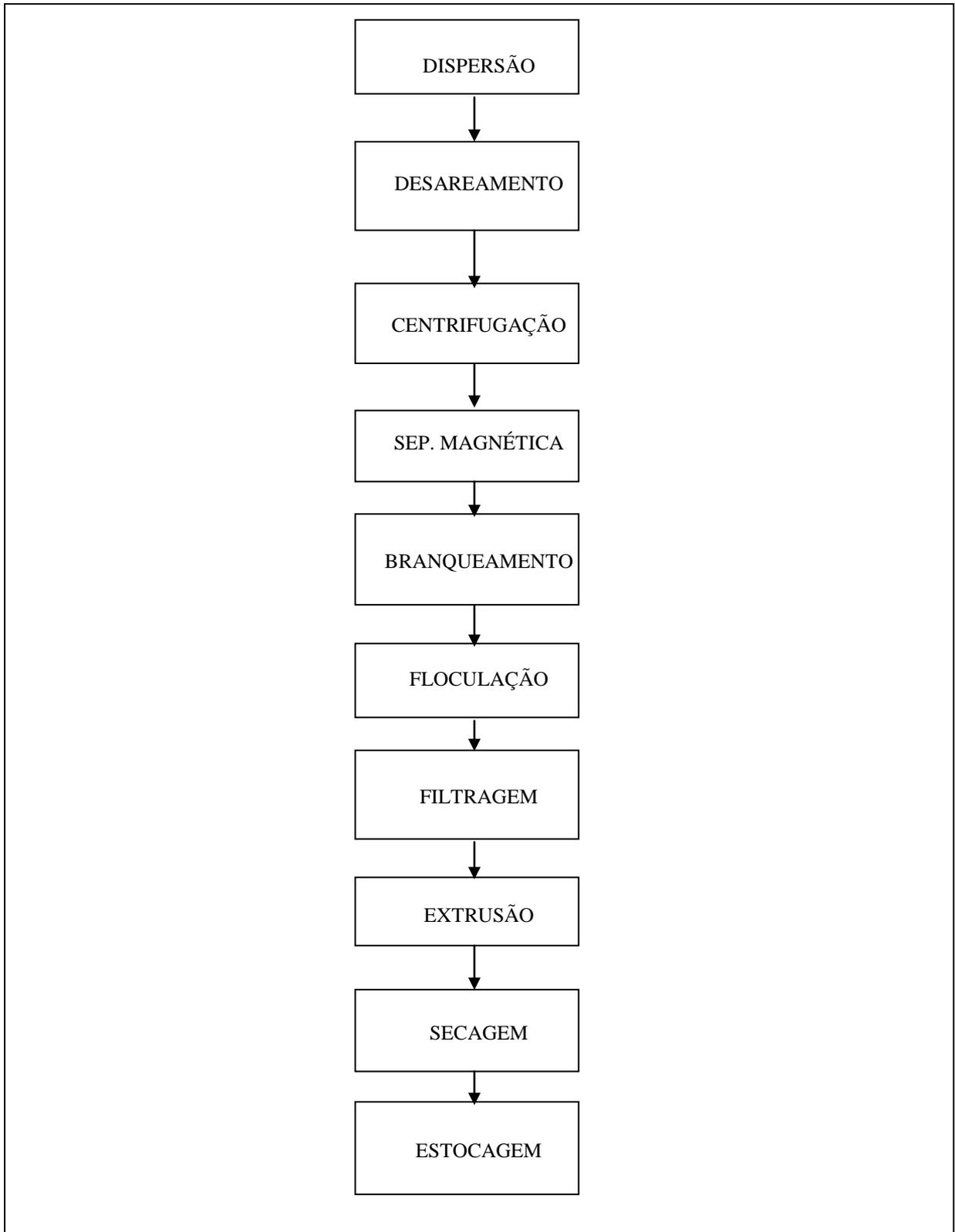


FIGURA 7: Fluxograma básico das operações de beneficiamento de caulim na CADAM.

A polpa conduzida no argiloduto é descarregada em um tanque distribuidor, localizado acima do circuito principal, formado por quatro hidrosseparadores. O *underflow* é o rejeito (areia + caulinita não dispersa + contaminantes grossos) e o *overflow* é o minério (caulinita dispersa + contaminantes finos).

O *underflow* dos hidrosseparadores primários é repolpado e descarregado em um misturador similar aos existentes na estação de mistura, denominado tanque de mistura do rejeito.

O transborde do tanque de mistura do rejeito alimenta o circuito de hidrosseparadores secundários para a recuperação da caulinita rejeitada no circuito principal.

O *underflow* dos hidrosseparadores secundários é bombeado para duas caixas de areia que funcionam como caixas de decantação. A areia e partículas grossas decantam para o fundo das caixas e a caulinita permanece em suspensão, retornando ao circuito por transborde da caixa de areia. A areia decantada é arrastada por um sistema de pás e posteriormente é bombeada para a lagoa de rejeitos da mina.

O *overflow* dos hidrosseparadores secundários é bombeado ao tanque pulmão M1. O *overflow* dos hidrosseparadores primários passa por um conjunto de peneiras vibratórias com malha de 74  $\mu\text{m}$ , para a retirada de detritos diversos incorporados durante o processo (fragmentos de madeira, folhas, insetos, etc.), sendo, posteriormente, conduzido por gravidade ao tanque pulmão M1.

A polpa do tanque pulmão M1 segue, por gravidade, por meio de um mineroduto de sete quilômetros que cruza o rio Jari e a deposita em dois tanques pulmão na fábrica (tanques T0 e T1), alimentadores das centrífugas.

As variáveis controladas nessa estação são o pH da polpa, a densidade de entrada (polpa misturada) e a densidade de saída (polpa desareada).

### **3.4.3 Centrifugação**

O objetivo da estação de centrifugação é a obtenção de um produto com distribuição granulométrica mais uniforme, de tal forma que no final da operação 97% das partículas tenham granulometria abaixo de 2  $\mu\text{m}$ .

A classificação é feita em onze centrífugas industriais onde, devido a ação da força centrífuga, ocorre a separação entre as partículas de maior tamanho (quartzo e demais contaminantes) e as partículas de menor tamanho (caulinita).

As variáveis controladas nessa estação são as densidades de entrada e de saída da polpa, a vazão das centrífugas, o pH da polpa e a alvura do caulim centrifugado.

#### **3.4.4 Separação magnética**

Nessa estação, o objetivo é a separação das partículas com ferro, presentes na polpa com a caulinita, pela aplicação de um intenso campo magnético (5 tesla).

O *canister* do *cryofilter* recebe a polpa proveniente dos tanques T2 e T3. Quando magnetizada, a matriz do *canister* retém os minerais com susceptibilidade magnética. Após o tempo de um minuto, a polpa é despejada no tanque A1. Posteriormente, a matriz é lavada com água limpa para a retirada dos minerais contaminantes. Essa água é conduzida à bacia de rejeitos.

Densidade e pH da polpa, alvura da alimentação e do produto e a vazão de operação são as variáveis controladas nessa estação.

#### **3.4.5 Branqueamento**

O objetivo na estação de branqueamento é a eliminação dos compostos de ferro não capturados na separação magnética, por meio de um processo químico.

A reação química para o branqueamento da polpa ocorre entre o agente branqueador (hidrossulfito de sódio) e o ferro dos minerais misturado com a caulinita. Sulfato de alumínio também é adicionado na polpa para baixar o pH e aumentar a eficiência da reação.

O hidrossulfito de sódio atua como redutor dos compostos oxidados de ferro, transformando  $\text{Fe}^{+3}$  em  $\text{Fe}^{+2}$ , solúvel em meio ácido e eliminado durante a etapa de filtragem.

A polpa e os reagentes químicos são alimentados simultaneamente em um tanque, por onde permanecem em repouso durante um tempo necessário para a reação total.

As variáveis controladas nessa estação são a densidade da polpa e as características óticas do produto branqueado (alvura, saturação e tonalidade).

#### **3.4.6 Flocculação**

A flocculação tem por objetivo facilitar a drenagem da água durante a etapa de filtragem do caulim.

Após o tempo de repouso, a polpa é bombeada para quatro tanques de floculação. Durante a transferência é adicionado mais sulfato de alumínio que atua como agente floculante do produto branqueado.

Dos quatro tanques de floculação, dois são denominados C1 e C2 e alimentam três linhas (A, B e C) que produzem caulim na forma *lump*. Os outros dois são denominados B7 e B8 e alimentam uma linha (D) que produz caulim na forma *spray dried*, ou SD.

Nas duas formas, quando um tanque está em consumo o outro está em abastecimento e permanece em repouso até ocorrer a floculação. Completado o tempo de repouso, a polpa é bombeada para as linhas de filtração.

### 3.4.7 Filtração

A filtração é a drenagem da maior parte da água da polpa. O dreno contém o material contaminante solubilizado.

É nessa etapa que o processo da CADAM se divide: parte da polpa floculada é bombeada para a linha *lump* e parte para a linha SD.

As tortas produzidas nas linhas SD são redispersas antes de serem bombeadas ao evaporador. A solução dispersante é composta por poliacrilato de sódio e soda barilha, que não se degenera com o calor e nem com o tempo, como ocorre com a solução de hexametáfosfato de sódio.

A drenagem da linha *lump* é enviada ao espessador para a recuperação da caulinita perdida na operação. O minério do espessador retorna ao branqueamento e o rejeito vai para a bacia de rejeitos. Na linha SD, os drenos dos filtros são bombeados diretamente para a bacia de rejeitos.

As variáveis de controle na filtração são:

- linha *lump*: teor de sólidos final da torta;
- linha SD: teor de sólidos final da torta, pH e viscosidade da polpa redispersa.

### 3.4.8 Extrusão

A extrusão é um processo aplicado nas tortas de caulim da linha *lump* para moldar o “macarrão” que segue à secagem.

As tortas originadas na filtragem *lump* são descarregadas em correias transportadoras onde, juntamente com o reciclo do caulim já seco, seguem para o amassador que prepara uma massa homogênea. O reciclo é importante para dar consistência à massa no extrusor, sem o qual não haveria formação do macarrão.

Extrudados, os macarrões caem em esteiras e adquirem o formato de pequenos nódulos cilíndricos.

### 3.4.9 Secagem

A secagem do caulim pode ocorrer sob duas formas diferentes, que geram dois produtos diferentes: caulim *lump* e caulim *spray dried*.

#### 3.4.9.1 Linha *lump*

O produto extrudado atravessa o secador, onde um sistema de ar quente forçado seca os nódulos de caulim. O produto seco é descarregado em outro sistema de correias transportadoras para a estocagem. Nesse ponto, parte do caulim seco retorna ao amassador, constituindo o reciclo que dá consistência à massa no extrusor.

A umidade do produto final é a única variável controlada nessa etapa.

#### 3.4.9.2 Linha *spray dried*

No sistema *spray dryer*, o caulim pré-disperso é pulverizado no interior de uma câmara de secagem. A polpa é nebulizada e seca com ar quente originando um *spray* (névoa) de gotas extremamente pequenas.

Antes de entrar no sistema, a polpa passa no evaporador que trabalha sob vácuo e em baixa temperatura e elimina parte da água.

O produto seco no *spray dryer* cai em uma esteira e é conduzido ao resfriador de leito fluidizado (*fluid bed*), onde ocorre o resfriamento do produto seco. Seco e resfriado, o produto é conduzido aos silos de estocagem.

As variáveis de controle nessa etapa são:

- evaporador: pH, densidade e viscosidade da polpa;
- *spray dryer*: umidade do produto final.

### 3.4.10 Estocagem e embarque

A estocagem dos dois produtos (*lump* e SD) ocorre separadamente. O embarque em navio é feito por pás carregadeiras que alimentam uma moega móvel e essa, por sua vez, alimenta uma correia transportadora que deposita o produto no porão do navio.

O caulim SD é estocado em silos de concreto armado. No embarque, o caulim é descarregado pelo fundo do silo, diretamente na moega móvel, seguindo, então, a mesma rota anteriormente citada.

Ambos produtos podem, ainda, ser armazenados em sacos de 1.000 kg, se houver interesse dos compradores.

As principais análises do produto, para ambas linhas, são:

- características óticas: alvura, saturação e tonalidade;
- características físicas: umidade, resíduos a 44 µm e viscosidade a 71% de sólidos (10, 100 e 1.100 rpm);
- característica química: pH a 20% de sólidos.

O cais do porto da CADAM está construído na margem direita do rio Jari e fica ao lado da fábrica, próximo à estocagem do produto final.

## 3.5 DESCRIÇÃO DOS PRODUTOS FINAIS DA CADAM

A empresa produz aproximadamente 700 mil t/ano de caulim beneficiado (DNPM, 1996).

O caulim *spray dried* é um produto pré-disperso, que se dispersa com facilidade na polpa preparada pela indústria do papel, para a produção de papéis e cartões revestidos. É a principal vantagem em relação ao caulim *lump*.

A CADAM denomina seus produtos finais de Amazon 88 e Amazon 90. Os números correspondem à alvura TAPPI e são marcas registradas da empresa.

Cerca de 85% dos produtos são vendidos no mercado externo e o restante no mercado interno (DNPM, 1996).

As propriedades dos caulins produzidos permitem aplicações mais nobres na indústria do papel, gerando produtos revestidos para obtenção de impressões de alta qualidade.

A excelente alvura e a ótima viscosidade do caulim da CADAM, propriedade exigida em razão da altíssima velocidade com que operam as máquinas de papel, conferem uma

qualidade excepcional que, talvez, o classifique como o de melhor viscosidade do mundo (MARQUES & RODRIGUES, 1994).

As principais especificações técnicas dos produtos finais são (PEREIRA *et al.*, 1995):

- alvura ISO: 86,5% e 88,5%;
- resíduos < 45  $\mu\text{m}$ : 0,03%;
- granulometria < 2  $\mu\text{m}$ : 96% a 99%;
- pH a 20% de sólidos: 4 a 5;
- umidade: 6%;
- viscosidade Brookfield (cp):
  - 10 rpm: 750;
  - 100 rpm: 220;
- viscosidade Hércules (dina):
  - 1.100 rpm: 3.

## **4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS RELEVANTES**

Os procedimentos experimentais nos laboratórios foram precedidos por uma amostragem na jazida, correspondendo a etapa inicial do estudo. Nessa etapa, foram coletadas amostras representativas da jazida, de minério econômico, ou não. A etapa seguinte foi realizada no LAPROM, onde adquiriu-se os conhecimentos sobre o minério e estabeleceu-se os critérios para a otimização dos processos laboratoriais. A etapa final dos experimentos foi realizada no laboratório da CADAM, onde se aplicou as sistemáticas praticadas pela empresa em 11 amostras coletadas na etapa inicial, simulando o beneficiamento industrial.

### **4.1 AMOSTRAGEM DA JAZIDA**

A amostragem da jazida foi executada pelo professor orientador, durante visita técnica à CADAM em abril/96. Foram coletadas 44 amostras de minério ROM na bancada B10, em lavra na época, constituindo uma malha de 10 linhas de amostragem com 4 a 5 amostras por linha. Abrangeu-se toda a extensão da bancada, numa área aproximada de 400 x 35 metros, resultando uma malha irregular de 40 x 7 metros.

A empresa classifica os tipos de caulim conforme suas cores, texturas e composições mineralógicas. As amostras coletadas representaram a maioria dos tipos litológicos expostos naquela bancada.

Cada amostra pesou cerca de 15 kg. Desagregadas e quarteadas no laboratório da CADAM, foram divididas em três alíquotas, uma delas remetida ao LAPROM, permanecendo as demais na empresa.

### **4.2 VALIDAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS**

No LAPROM, as amostras foram submetidas a alguns testes para a otimização das técnicas laboratoriais. Esses testes foram implementados porque a equipe desconhecia os procedimentos ideais para a preparação das amostras, para aplicação específica nesse estudo. A qualidade dos resultados dos equipamentos espectro-colorímetro e granulômetro à difração laser, recentes aquisições na época dos testes, dependiam da qualidade e da correta preparação das amostras.

Para o espectro-colorímetro, era importante que as amostras apresentassem partículas bem dispersas e pulverizadas. A base para a aplicação dos testes foi a norma TAPPI T 534,

que cita procedimentos básicos de preparação, mas não detalha as operações específicas do tratamento físico, como a dispersão da amostra e a confecção da pastilha. Paralelamente, a expectativa de se trabalhar com amostras ROM, contendo cerca de 8% de partículas grossas, causou preocupação quanto ao procedimento de pulverização.

Para o granulômetro à difração laser, além dos aspectos qualitativos, tinha importância os aspectos quantitativos dos resultados, porque se desejava avaliar a performance desse equipamento com os resultados gerados no granulômetro Sedigraph, padrão na indústria do caulim.

Na etapa de validação dos procedimentos experimentais, desenvolveu-se os seguintes testes:

- dispersão de caulim ROM;
- efeito do método de confecção de pastilha na medição da alvura;
- variação lateral da alvura na pastilha;
- avaliação granulométrica do material grosso do ROM;
- avaliação granulométrica do material fino do ROM;
- avaliação da performance operacional do granulômetro Cilas.

#### **4.2.1 Dispersão do caulim ROM**

O objetivo desse teste foi a dispersão total do caulim ROM na granulometria superior a 44  $\mu\text{m}$ . No início dos trabalhos com o caulim da CADAM, havia uma expectativa da equipe de que o quartzo grosso tivesse influência marcante no espectro de reflectância do caulim ROM. Essa idéia surgiu pelo fato de ser elevado (8% a 15%) o rejeito do processo de desareamento (PEREIRA *et al.*, 1995; CRISCUOLO, 1996). Pensava-se que esse material fosse essencialmente quartzoso. No entanto, antes da implementação da idéia, era importante a obtenção de quartzo livre e, paralelamente, a determinação da quantidade do mineral presente na fração grossa. Foram executados os métodos de dispersão mecânica e manual, ambos associados com avaliações granulométricas no granulômetro à difração laser.

##### **4.2.1.1 Procedimentos**

Os procedimentos foram realizados sob duas formas diferentes: dispersão mecânica e dispersão manual.

#### 4.2.1.1.1 Dispersão mecânica

Os testes com dispersão mecânica ocorreram em amostras com peso constante de 200 gramas, base seca, variando-se os seguintes parâmetros:

- tipo de amostra: *bulk* e LA-AM2;
- tipo de água: natural, destilada e deionizada;
- volume de água: basicamente 300 e 600 ml;
- volume de solução dispersante: variado. A solução dispersante utilizada foi uma mistura de hexametáfosfato de sódio (80%) com barilha (20%) em concentração 3,5% P/V, igual a utilizada no laboratório da CADAM;
- tempo de agitação: variado;
- tipo de equipamento: liquidificador comercial, processador de alimentos e agitador mecânico com hélice e com pá.

#### 4.2.1.1.2 Dispersão manual

Na dispersão manual, os testes foram aplicados nas 44 amostras coletadas na jazida. Adotou-se um procedimento padrão para todas as amostras, porque o objetivo foi a obtenção e a avaliação do material liberado nas frações +500  $\mu\text{m}$ , +149  $\mu\text{m}$  e +44  $\mu\text{m}$ . O procedimento aplicado foi:

- formação de polpa com 200 gramas de amostra, 300 ml de água natural e 32 ml de solução dispersante;
- aplicação de ultra-som a 40 kHz e tempo de 15 minutos para dispersão da polpa;
- sucessivas fricções manuais leves no material, em peneiras 500  $\mu\text{m}$ , 149  $\mu\text{m}$  e 44  $\mu\text{m}$  até a liberação total entre as partículas em cada peneira.

#### 4.2.1.2 Resultados

##### 4.2.1.2.1 Dispersão mecânica

Os resultados estão no quadro 5. O projeto experimental, mesmo sem a interação entre todos os parâmetros, levou à indicação das melhores alternativas para a dispersão mecânica ótima do caulim ROM.

QUADRO 5: Resultados dos testes de dispersão mecânica com múltiplas variações em amostras ROM.

ALTER-NATIVA	AMOSTRA	TIPO DE ÁGUA	VOLUME DE ÁGUA (ml)	VOL. DE SOLUÇÃO (ml)	TEMPO DE AGITAÇÃO (min)	EQUIPAMENTO	> 149 micra				< 149 > 44 micra			
							RET. TOTAL (%)	QUARTZO (%)	CAULIM (%)	OPACOS (%)	RET. TOTAL (%)	QUARTZO (%)	CAULIM (%)	OPACOS (%)
A	BULK	DEIONIZADA	300	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,35	100,0	-	<1	0,31	99,0	-	1
B	BULK	NATURAL	300	64	10	LIQUIDIFICADOR	0,40	99,0	-	1	0,30	99,0	<1	1
C	BULK	DESTILADA	300	16	5	PROC. DE ALIMENTOS	0,27	96,0	3,0	1	0,43	99,0	<1	<1
D	BULK	DESTILADA	600	64	10	LIQUIDIFICADOR	0,43	100,0	-	<1	0,30	98,0	-	2
E	BULK	DESTILADA	300	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,41	95,0	5,0	<1	0,32	95,0	3	2
F	BULK	DESTILADA	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,37	95,0	5,0	<1	0,44	95,0	5	<1
G	BULK	DESTILADA	245	13	10	LIQUIDIFICADOR	0,40	85,0	15,0	RAROS	0,40	95,0	5	<1
H	BULK	NATURAL	300	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,87	70,0	30,0	<1	0,07	92,0	5	3
I	BULK	DESTILADA	600	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,42	99,0	1,0	<1	0,36	90,0	9	1
J	BULK	DESTILADA	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,39	97,0	3,0	RAROS	0,41	57,0	40	3
K	BULK	NATURAL	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,39	99,0	0,5	<1	0,44	49,0	49	2
L	LA-AM2	DESTILADA	300	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,07	96,0	2,0	1	0,18	40,0	30	5
M	BULK	DEIONIZADA	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,50	95,0	5,0	<1	0,82	30,0	69	1
N	BULK	DESTILADA	300	16	5	LIQUIDIFICADOR	0,49	90,0	10,0	RAROS	1,76	20,0	80	<1
O	LA-AM2	DESTILADA	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,13	60,0	40,0	<1	0,61	10,0	89	1
P	BULK	DESTILADA	525	5,2	10	LIQUIDIFICADOR	0,44	95,0	5,0	<1	1,84	5,0	95	<1
Q	LA-AM2	DEIONIZADA	300	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,09	74,0	25,0	1	0,63	5,0	94	1
R	LA-AM2	NATURAL	300	16	10	LIQUIDIFICADOR	0,17	30,0	70,0	<1	0,86	5,0	94	1
S	LA-AM2	DESTILADA	300	16	5	LIQUIDIFICADOR	0,34	30,0	70,0	<1	4,06	5,0	95	<1
T	LA-AM2	DESTILADA	600	32	10	LIQUIDIFICADOR	0,09	70,0	20,0	1	0,72	4,0	94	1
U	BULK	DESTILADA	1715	0,6	10	LIQUIDIFICADOR	0,41	90,0	10,0	RAROS	3,54	2,0	98	<1
V	LA-AM2	DESTILADA	300	32	5	LIQUIDIFICADOR	0,76	20,0	80,0	<1	1,91	1,0	99	<1
W	BULK	DESTILADA	300	16	30	AGITADOR-PÁ	30,79	-	100,0	0	7,58	0,5	99	<1
X	BULK	DESTILADA	300	16	30	AGITADOR-HÉLICE	30,69	-	100,0	0	7,57	0,5	99	<1
Y	BULK	DESTILADA	300	16	30	AGITADOR-HÉLICE	22,97	-	100,0	0	5,75	0,5	99	<1
Z	BULK	DESTILADA	300	16	30	AGITADOR-PÁ	-	-	-	0	-	-	-	0

Avaliou-se o material retido nas frações +149  $\mu\text{m}$  e +44  $\mu\text{m}$ , constituído por quartzo, caulim não disperso e minerais opacos, identificados em lupa binocular. O quadro 5 mostra que as alternativas de **A** a **I** apresentaram menor percentagem de caulim não disperso na peneira +44  $\mu\text{m}$  e, por isso, qualquer uma delas poderia ser adotada como padrão para os procedimentos e estudos subseqüentes no LAPROM. Devido à facilidade na obtenção da água natural e pelo menor volume de solução dispersante, adotou-se a alternativa **H** como padrão.

#### 4.2.1.2.2 Dispersão manual

Os resultados estão no quadro 6. Verifica-se que é pouca a quantidade de material retido total. Na maioria das amostras, o material retido ficou abaixo de 1% em relação ao alimentado. Algumas amostras, como as da Linha E (LE), apresentaram mais massa retida, constituída basicamente por quartzo. Os valores desse quadro estão bem abaixo dos citados nos relatórios da empresa (PEREIRA *et al.*, 1995; CRISCUOLO, 1996), que não atinge a dispersão ótima nos procedimentos industriais, devido à irregularidade no tempo de permanência do material alimentado nos tanques misturadores.

A fim de se comprovar a eficácia da dispersão mecânica em relação à manual, aplicaram-se os dois métodos em amostras ROM do mesmo tipo litológico (denominadas *bulk*) e compararam-se as massas retidas nas peneiras 149  $\mu\text{m}$  e 44  $\mu\text{m}$ . Os resultados encontram-se no quadro 7.

A amostra *bulk* é a do tipo III, remetida pela CADAM para testes diversos no LAPROM. Corresponde a um tipo litológico considerado econômico. Observa-se que a massa retida nos dois métodos não é significativa e os valores, nos dois métodos, ficaram muito próximos, atestando a eficácia do método de dispersão mecânica adotado para esse estudo.

Verificado que a quantidade de quartzo grosso é pouco significativa no minério ROM, a idéia inicial sobre uma possível grande influência desse mineral no espectro de reflectância não foi mais considerada. Na prática, constatou-se que o rejeito do desareado é, basicamente, caulinita não dispersa.

QUADRO 6: Massa retida em peneiras após dispersão manual em 200 g de minério ROM.

AMOSTRA	RETIDO (%)			
	+500 $\mu\text{m}$	-500 +149 $\mu\text{m}$	-149 +44 $\mu\text{m}$	+44 $\mu\text{m}$
LA-AM1	0,03	0,04	0,03	0,10
LA-AM2	0,03	0,04	0,06	0,12
LA-AM3	1,29	0,76	0,26	2,30
LA-AM4	0,16	0,36	0,16	0,67
LB-AM1	0,03	0,07	0,12	0,22
LB-AM2	0,16	0,12	0,09	0,36
LB-AM3	0,36	0,24	0,13	0,72
LB-AM4	0,90	0,53	0,20	1,63
LC-AM1	5,58	1,43	0,46	7,46
LC-AM2	0,73	0,65	0,19	1,57
LC-AM3	0,32	0,40	0,20	0,91
LC-AM4	0,39	0,33	0,07	0,79
LD-AM1	0,79	0,74	0,21	1,73
LD-AM2	0,04	0,05	0,04	0,12
LD-AM3	0,04	0,07	0,11	0,21
LD-AM4	2,67	2,66	0,86	6,19
LE-AM1	0,08	0,08	0,03	0,19
LE-AM2	2,68	7,64	3,41	13,72
LE-AM3	9,81	12,57	3,88	26,25
LE-AM4	4,26	9,46	2,42	16,14
LF-AM1	0,05	0,09	0,03	0,16
LF-AM2	0,45	0,13	0,05	0,63
LF-AM3	0,02	0,03	0,01	0,06
LF-AM4	0,65	1,01	0,47	2,12
LF-AM5	0,10	0,14	0,07	0,30
LG-AM1	0,92	0,65	0,18	1,74
LG-AM2	0,07	0,07	0,03	0,17
LG-AM3	0,08	0,09	0,03	0,19
LG-AM4	0,03	0,03	0,01	0,07
LG-AM5	0,02	0,02	0,01	0,05
LH-AM1	0,73	0,49	0,16	1,37
LH-AM2	0,19	0,13	0,04	0,36
LH-AM3	0,02	0,04	0,01	0,07
LH-AM4	0,02	0,08	0,18	0,28
LH-AM5	0,02	0,25	0,73	1,00
LI-AM1	1,42	0,63	0,17	2,22
LI-AM2	0,13	0,13	0,08	0,33
LI-AM3	0,10	0,14	0,04	0,27
LI-AM4	0,17	0,24	0,17	0,57
LJ-AM1	0,65	0,48	0,11	1,24
LJ-AM2	0,39	0,31	0,08	0,77
LJ-AM3	1,80	0,89	0,22	2,91
LJ-AM4	0,35	0,27	0,07	0,69
LJ-AM5	0,23	0,33	0,14	0,69

QUADRO 7: Massa retida (%) em peneiras granulométricas, após dispersões mecânica e manual em amostras ROM do mesmo tipo litológico.

Dispersão Mecânica			Dispersão Manual		
+149 $\mu\text{m}$	-149 +44 $\mu\text{m}$	+44 $\mu\text{m}$	+149 $\mu\text{m}$	-149 +44 $\mu\text{m}$	+44 $\mu\text{m}$
0,35	0,31	0,66	0,49	0,21	0,70
0,41	0,28	0,68	0,47	0,24	0,71
0,40	0,30	0,70	0,52	0,23	0,74
0,43	0,30	0,73	0,53	0,25	0,78
0,42	0,33	0,75	0,59	0,26	0,85
0,40	0,30	0,70	0,52	0,24	0,76

OBS.: última linha = média das linhas anteriores.

#### 4.2.2 Efeito do método de confecção de pastilha na medição da alvura

A avaliação da alvura pode ser feita no equipamento espectro-colorímetro. O equipamento da marca HunterLab, utilizado nesse trabalho, calcula a alvura (457 nm *Brightness*) com base na tabela 2 da norma TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) T 452 om-87, utilizando, também, os métodos apresentados na norma TAPPI T 525 om-86. Na implementação de seu *software*, a alvura 457 é uma média ponderada da refletância entre os comprimentos de onda 400 a 510 nm, e os cálculos seguem os critérios estabelecidos nas normas citadas (HUNTERLAB, 1995).

Industrialmente, dois tipos de geometria são aceitas: 45/0 e D/0. A normatização internacional preconiza a segunda opção com tolerância máxima (D/10). O primeiro número corresponde ao ângulo de incidência da luz sobre a amostra e o segundo ao ângulo de medição.

##### 4.2.2.1 Procedimentos

A avaliação colorimétrica de um material pulverizado depende da confecção de pastilhas prensadas que são levadas ao espectro-colorímetro para a determinação dos parâmetros de colorimetria desse material. As principais etapas para a confecção das pastilhas são: pulverização da amostra e prensagem do pó em anéis de aço inoxidável.

Na pulverização, seguiu-se a norma TAPPI T 534 pm-92: “Alvura de Argilas e Outros Pigmentos Minerais”; implementou-se o método de pulverização junke & kunkel, citado na

norma, acrescentando-se os métodos com pistilo/almofariz e *mixer mill*. Além disso, avaliou-se amostras não pulverizadas e comparou-se os resultados com os dos demais métodos.

Na prensagem, absorveu-se a técnica e o equipamento utilizados na empresa English China Clay (ECC), diferentes dos utilizados na CADAM, que desenvolveu procedimentos próprios.

Os testes foram realizados em quatro tipos de minério ROM (I, II, III e IV), confeccionando-se três pastilhas para cada um dos procedimentos de pulverização (desagregado, pistilo/almofariz, *mixer mill* e junke & kunkel (JK)), totalizando 48 pastilhas, 12 por procedimento.

#### 4.2.2.2 Resultados

Os valores médios das alvuras estão no quadro 8. Os valores indicam que não há uma tendência clara de melhor alvura com a aplicação dos procedimentos pistilo/almofariz, *mixer mill* e JK. Entretanto, indicam que o procedimento com o material desagregado não é a melhor opção, porque, nos quatro tipos de minério, foi o que apresentou menor qualidade na superfície da pastilha, gerando menores valores de alvura. Nesse procedimento, a pastilha foi confeccionada com material disperso, desagregado manualmente, ou com suaves golpes de martelo de borracha para quebrar os agregados mais resistentes. Não houve pulverização.

QUADRO 8: Alvura média do minério ROM com variação de procedimentos de pulverização.

PROCEDIMENTO	ALVURA MÉDIA (%)			
	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV
DESAGREGADO (*)	67,74	68,56	67,91	62,60
PISTILO/ALMOFARIZ	72,89	74,43	76,11	68,64
<i>MIXER MILL</i>	71,12	72,26	71,78	67,36
JUNKE & JUNKEL (JK)	75,17	76,94	70,87	68,43

(\*): Amostras não pulverizadas.

Quanto à utilização do pistilo/almofariz, havia esforço humano e o grau de pulverização poderia ser diferente para diferentes pessoas que executassem a operação. O tempo gasto também era demasiado para a alta demanda de amostras.

No método Junke & Kunkel, observou-se que a pulverização é intensa, mas um tanto irregular, devido ao espaço entre a hélice e o fundo da câmara de pulverização. Devido à alta rotação (20.000 rpm), as partículas são jogadas nas paredes da câmara e ali permanecem aderidas, necessitando-se de paradas constantes, operação manual e perdas de tempo.

Entre os três procedimentos, o *mixer mill* foi o equipamento que menos alterou a granulometria da fração grossa. Desejava-se preservar o quartzo, o máximo possível nessa fração, porque o mineral seria avaliado e utilizado em outros procedimentos laboratoriais para os estudos posteriores.

As razões acima colocadas foram decisivas para a escolha do equipamento *mixer mill* para o procedimento padrão na pulverização.

### 4.2.3 Variação lateral da alvura na pastilha

#### 4.2.3.1 Verificação do erro médio das leituras

Antes de iniciar o trabalho definitivo com as medições espectro-colorimétricas, era necessário estabelecer o número ideal de leituras para cada amostra e estabelecer o erro médio das leituras. Fez-se um estudo estatístico para um erro relativo admissível de 0,2% no intervalo de confiança de 95%. Variou-se os tipos de amostras e os operadores durante a confecção das pastilhas. A quantidade de pastilhas confeccionadas para cada teste variou de 30 a 35 unidades.

Os resultados foram muito variados para se definir o número ideal de pastilhas e obter o erro relativo de 0,2%. Chegou-se a valores de 2 a 16 pastilhas, dependendo do tipo de amostra e do operador.

Diante das variações de resultados, decidiu-se aumentar a tolerância do erro relativo e estabelecer a quantidade de 4 pastilhas para cada amostra, aplicando o valor médio dos resultados. Exemplificando, em um dos testes realizados (amostra LB-AM3-PC) obteve-se os seguintes valores estatísticos em 30 leituras:

$$\text{Alvura Média (X)} = 77,50\%$$

$$\text{Desvio-padrão } (\sigma) = 0,27$$

$$\text{Coeficiente de variação (V)} = 0,356 \quad (V = \sigma/X)$$

$$\text{Intervalo de confiança} = 95\%$$

$$\text{Quantidade de pastilhas (n)} = 4$$

$$\text{Erro relativo admissível (d}_r\text{)} = ? \rightarrow = 0,36 \quad (n = 4V^2/d_r^2)$$

Com os valores acima, obteve-se um erro relativo admissível de 0,36% e o resultado indicado para a alvura do exemplo fica:  $77,5 \pm 0,28$ . Os valores de alvura expressos nesse estudo relacionam-se à alvura ISO. Alvura TAPPI  $\cong$  alvura ISO + 1,5.

#### 4.2.3.2 Procedimentos

A pastilha é colocada na porta de reflectância do equipamento e somente sua parte central recebe a incidência da emissão luminosa da lâmpada de xenônio. O diâmetro da pastilha é de 4,5 centímetros, enquanto que o da porta é de 2,6 centímetros.

A fim de se detectar variações texturais nas superfícies das pastilhas, que pudessem ter causas na confecção das mesmas, procedeu-se a um teste de verificação em 21 pastilhas de diferentes tipos de caulim. Variou-se a pastilha entre 6 a 8 posições diferentes de sua superfície, de modo que as leituras abrangessem a maior área possível da mesma. Posteriormente, comparou-se a média dessas leituras com uma única leitura realizada no centro da pastilha.

#### 4.2.3.3 Resultados

O quadro 9 mostra os resultados obtidos. Os resultados da penúltima coluna correspondem a uma única leitura no centro da pastilha. Os da terceira coluna, a média das 6 ou 8 leituras na mesma pastilha. Na última coluna, estão as diferenças entre os valores das duas colunas anteriores. Considerou-se os resultados dentro do esperado, porque as amostras ROM analisadas contêm partículas grossas disseminadas, ainda que em pequena quantidade. Os resultados foram considerados satisfatórios e o procedimento de prensagem foi adotado como padrão nesse estudo.

### **4.2.4 Avaliação granulométrica do material grosso (> 44 $\mu$ m) do ROM**

#### 4.2.4.1 Procedimentos

A fração grossa originada nas dispersões mecânica e manual proporcionou um estudo granulométrico paralelo, realizado no granulômetro à difração laser. O material desta fração é essencialmente quartzo liberado, com cerca de 1% a 5% de minerais opacos. Nesse teste, pôde-se verificar a influência da ação mecânica da dispersão nas partículas do ROM. Devido ao limite operacional do equipamento, inicialmente fez-se um corte a 500  $\mu$ m.

Posteriormente, um novo corte foi feito a 44  $\mu\text{m}$  e a fração -500  $\mu\text{m}$  +44  $\mu\text{m}$  foi analisada no granulômetro.

QUADRO 9: Resultados de medições de alvuras em variadas posições e no centro das pastilhas.

PASTILHA	N° DE LEITURAS	ALVURA MÉDIA	ALVURA NO CENTRO	(AM - AC)
Tipo I AM1	8	71,06	70,72	0,34
Tipo I AM2	8	71,21	70,94	0,27
Tipo I AM3	8	71,97	71,70	0,27
Tipo I AM4	8	74,70	74,96	-0,26
Tipo I AM5	8	75,75	75,81	-0,06
Tipo I AM6	8	74,96	74,74	0,22
Tipo II AM1	6	73,43	73,37	0,06
Tipo II AM2	6	71,35	71,32	0,03
Tipo II AM3	6	72,22	72,09	0,13
Tipo III AM1	6	71,33	71,41	-0,08
Tipo III AM2	6	71,44	72,13	-0,69
Tipo III AM3	6	71,80	71,79	0,01
Tipo III AM4	8	71,13	70,83	0,30
Tipo III AM5	8	70,75	70,30	0,45
Tipo III AM6	8	71,79	71,48	0,31
Tipo IV AM1	6	67,27	67,55	-0,28
Tipo IV AM2	6	67,71	67,24	0,47
Tipo IV AM3	6	67,55	67,30	0,25
Tipo IV AM4	8	70,38	70,27	0,11
Tipo IV AM5	8	68,07	67,82	0,25
Tipo IV AM6	8	68,40	68,21	0,19

#### 4.2.4.2 Resultados

Os resultados encontram-se no quadro 10 e indicaram que a dispersão mecânica provocou uma diminuição em cerca de 30% no tamanho médio ( $D_{50}$ ) das partículas mais grossas, onde há predominância acentuada do quartzo. O resultado não foi surpreendente e, de certa forma, era esperado, porque o mineral apresenta-se intensamente fraturado no minério ROM, visível em lupa binocular. A figura 8 mostra as curvas granulométricas da fração  $-500 \mu\text{m} +44 \mu\text{m}$ .

QUADRO 10: Comparação entre as granulometrias de amostras *bulk* na fração  $-500 \mu\text{m} +44 \mu\text{m}$  após dispersões mecânica e manual.

MATERIAL PASSANTE	GRANULOMETRIA ( $\mu\text{m}$ )		
	DISP. MANUAL	DISP. MECÂNICA	VARIAÇÃO (%)
$D_{10}$	91	76	-16,5
$D_{50}$	224	158	-29,5
$D_{90}$	400	276	-31,0

#### 4.2.5 Avaliação granulométrica do material fino ( $< 44 \mu\text{m}$ ) do ROM

Aplicando-se o mesmo procedimento nas partículas mais finas, observou-se que a variação foi pouco significativa. A figura 9 mostra que na fração mais fina ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ), granulometria predominante da caulinita, praticamente não houve alteração. Entretanto, na fração mais grossa ( $> 0,5 \mu\text{m}$ ), onde o quartzo ocorre com maior frequência, a variação foi significativa, principalmente na fração acima de  $1 \mu\text{m}$ , onde o quartzo é o mineral predominante. Esse fato indica que a ação mecânica da hélice do liquidificador alterou bastante o tamanho original dos grãos. O quadro 11 mostra os diâmetros obtidos nas duas formas de dispersão.

QUADRO 11: Comparação entre as granulometrias de amostras *bulk* na fração  $-44 \mu\text{m}$ , após dispersões mecânica e manual.

MATERIAL PASSANTE	GRANULOMETRIA ( $\mu\text{m}$ )		
	DISP. MANUAL	DISP. MECÂNICA	VARIAÇÃO (%)
$D_{10}$	0,09	0,09	0
$D_{50}$	0,45	0,42	-6,7
$D_{90}$	9,83	3,78	-61,5

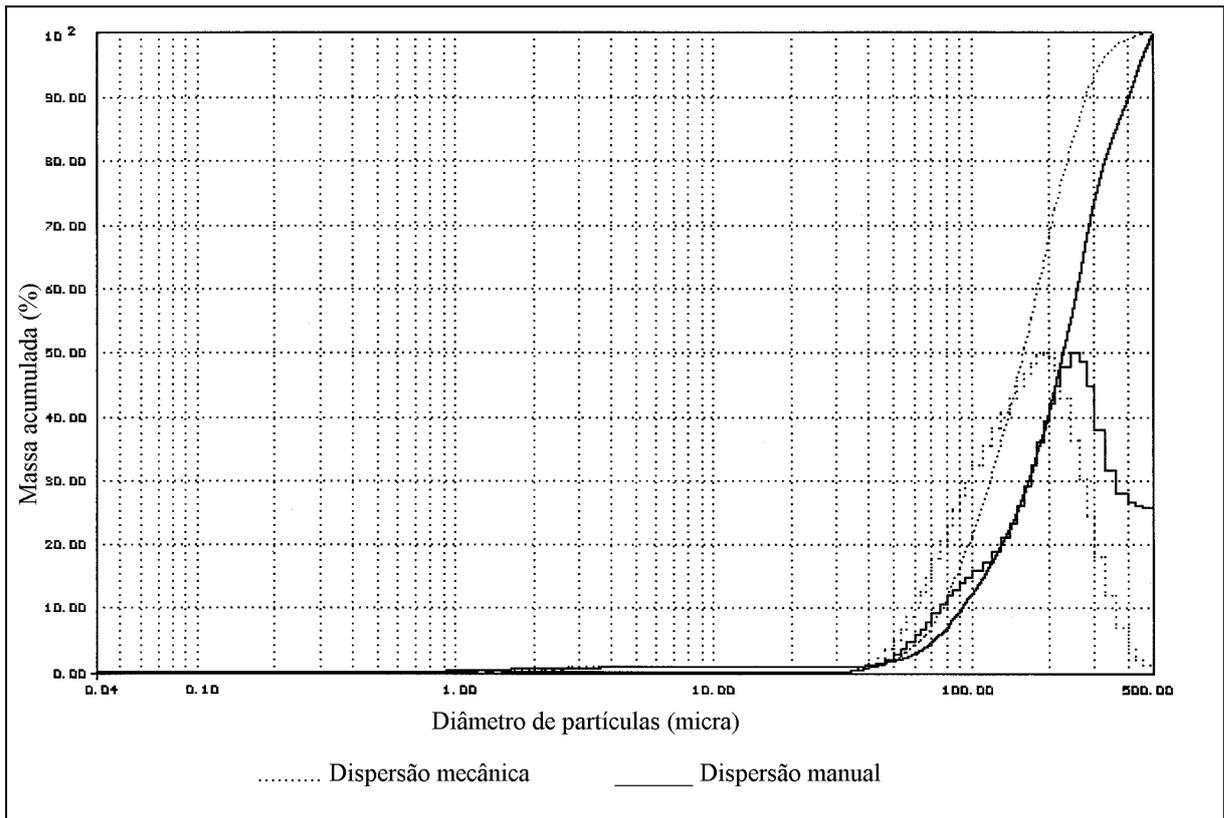


FIGURA 8: Distribuições granulométricas de minerais de quartzo, originados por dispersões mecânica e manual de caulim ROM da CADAM, na faixa  $-500 \mu\text{m} + 44 \mu\text{m}$ .

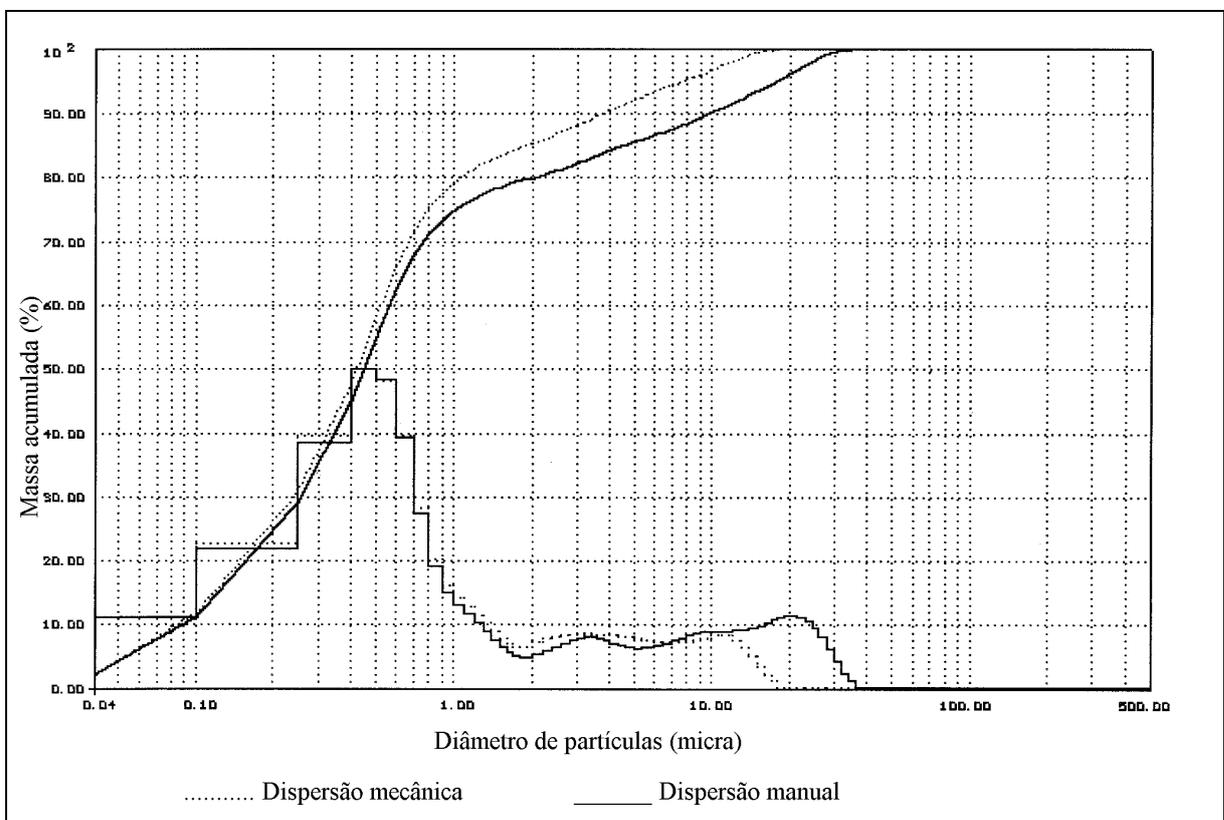


FIGURA 9: Distribuições granulométricas de minério de caulim ROM, passante em malha  $44 \mu\text{m}$ , após dispersões mecânica e manual.

#### 4.2.6 Avaliação da performance do granulômetro Cilas

A avaliação granulométrica de caulins é normalmente feita em granulômetros da marca Sedigraph. Sua operação tem base nos métodos de sedimentação em meio aquoso, obedecendo a lei de Stokes. Por meio desse modelo, os tamanhos são expressos em termos de diâmetro esférico equivalente, embora, nos caulins, as partículas não sejam esféricas. Isso significa que uma partícula de caulinita com 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro esférico equivalente poderia sedimentar, através da água, na mesma velocidade de uma verdadeira partícula esférica de 1  $\mu\text{m}$  de diâmetro (MURRAY).

O objetivo desse teste foi a comparação entre os resultados obtidos no equipamento granulômetro à difração laser, marca Cilas, modelo 1064, recente aquisição do LAPROM na época do estudo, e os resultados em um equipamento similar, marca Sedigraph, padrão na indústria do caulim. O primeiro opera fundamentado na formação de figuras de difração e o segundo na velocidade de sedimentação das partículas, obedecendo a Lei de Stokes.

A escolha pela aquisição do equipamento Cilas foi técnica. As análises com espectrocolorímetro resultam valores que são a resposta da interação dos fenômenos da luz com a matéria, nos quais a difração é um dos componentes influentes. Assim, avaliou-se que poderia ser tecnicamente mais coerente para o conjunto de trabalhos atuais e futuros com o caulim, um equipamento cujos resultados também tivessem relação com o mesmo fenômeno físico.

O princípio operacional do granulômetro à difração laser consiste da emissão laser de baixa intensidade que cruza uma célula de quartzo por onde circula o líquido contendo as partículas em suspensão. Como resultado, a luz é difratada, formando figuras de difração em um detetor fotodiodo de silício com 42 células de medições. Essas células analisam as figuras de difração e um dispositivo eletrônico de processamento de sinais, acoplado a um microcomputador, indica os resultados no vídeo, em 100 faixas granulométricas pré-ajustadas pelo operador (COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS, 1992).

##### 4.2.6.1 Procedimentos

Desenvolveu-se uma técnica para otimizar a dispersão das amostras, variando-se massa de amostra, volume de solução dispersante e tempo de ultra-som. Posteriormente, aplicou-se estatística com tabelas ANOVA (*analysis of variance*). A dispersão é fator importante na análise granulométrica.

Os materiais analisados tiveram procedências diversas: produtos do tratamento de caulim ROM da CADAM, padrões de quartzo fornecidos pelo fabricante Cilas e um padrão de granada pulverizada para aferição do granulômetro Sedigraph.

A seguir, apresenta-se um resumo dos principais resultados obtidos com esse teste. Dados mais detalhados estão em um relatório interno do LAPROM, relativo aos estudos realizados por SABEDOT & PETTER (1997) sobre o tema.

#### 4.2.6.1.1 Massa de amostra

A determinação da massa de amostra alimentada no equipamento é importante para evitar a alta concentração de sólidos na polpa. Se isso acontecer, a análise será interrompida no início da emissão laser e a polpa deverá ser parcial ou totalmente descartada, descaracterizando ou inutilizando a amostra.

A concentração de sólidos na polpa indica a concentração ótica operacional, que depende da transmitância (COMPAGNIE INDUSTRIALLE DES LASERS, 1992). Segundo o fabricante, o polpa deverá ter concentração ótica entre 10 e 300. Se estiver acima de 300 é acionado um dispositivo de autodiluição. Se estiver abaixo de 10 a análise é interrompida.

#### 4.2.6.1.2 Volume de solução dispersante e tempo de ultra-som

A solução dispersante foi a mesma utilizada para os demais testes de dispersão, isto é, hexametáfosfato de sódio mais barilha, na concentração 3,5% P/V.

Realizou-se testes sem adição de solução dispersante na polpa e com adição de volumes variados da solução, em amostras do produto das centrífugas geradas no beneficiamento do caulim ROM.

O uso de ultra-som é importante e as amostras foram submetidas a intervalos de tempos diferentes de ultra-som.

#### 4.2.6.2 Resultados

O peso ideal estabelecido para os materiais analisados variou entre 0,3 e 0,5 grama. Isso representa uma concentração mássica de 0,06% a 0,1% de sólidos em suspensão na polpa, considerando a capacidade volumétrica de 500 ml da cuba do equipamento.

Os resultados dos testes com a solução dispersante indicaram a importância do uso de 5 ml de solução para a eficiência na dispersão. A adição de volumes maiores não melhorou o processo. O quadro 12 mostra a ANOVA correspondente aos testes de granulometria ( $D_{50}$ ) sem e com solução dispersante e variação de tempo de ultra-som. A figura 10 (amostra 1) mostra o gráfico dos resultados.

O tempo de 10 minutos de ultra-som é fundamental para a eficácia do processo de dispersão. O quadro 13 mostra a ANOVA dos testes de granulometria ( $D_{50}$ ) com outra amostra de produto das centrífugas, com variados volumes de solução dispersante e tempos de ultra-som. A figura 10 (amostra 2) mostra o gráfico correspondente aos resultados.

#### 4.2.6.3 Comparações de resultados entre granulômetros

Análises de produtos do beneficiamento do caulim ROM - alimentação, produto e rejeito das centrífugas - demonstraram que há semelhanças entre os formatos das curvas Sedigraph e Cilas. Na fração correspondente a 50% da massa mais fina, os valores obtidos estão próximos nos dois equipamentos. Há diferenças nos diâmetros correspondentes a 50% da massa mais grossa, onde o Cilas gera valores percentuais menores de partículas mais grossas. A figura 11 mostra as curvas granulométricas dos materiais analisados nos dois equipamentos.

Resultados semelhantes foram obtidos com o padrão granada pulverizada, mantendo-se a tendência do granulômetro Cilas a apresentar maior massa percentual na fração mais fina e menor massa percentual na fração mais grossa, comparado com os resultados do Sedigraph.

Três *kits* contendo quartzo para aferição do granulômetro Cilas, fornecidos com o equipamento, foram analisados no LAPROM e os resultados foram muito semelhantes. O quadro 14 mostra o resumo dos resultados para os principais diâmetros.

Amostras de caulim Amazon 90 e de caulim da alimentação das centrífugas foram analisadas no LAPROM e no fabricante do granulômetro Cilas, na França. O quadro 15 mostra os resultados dos dois laboratórios. Os números são muito próximos.

O fato dos equipamentos operarem sob diferentes princípios físicos pode ser uma indicação para as diferenças encontradas nos resultados. Uma análise mais detalhada deste assunto está além do escopo desse estudo.

QUADRO 12: ANOVA para os testes de granulometria ( $D_{50}$ ) com e sem volume de solução dispersante e variados tempos de ultra-som em amostras do produto das centrífugas.

VARIÁVEIS		B1 0 ml	B2 5 ml	B3 10 ml																																					
A1	1 minuto	0,59	0,38	0,38																																					
		0,57	0,37	0,34																																					
		1,16	0,75	0,72	2,63																																				
A2	5 minutos	0,57	0,37	0,37																																					
		0,57	0,31	0,34																																					
		1,14	0,68	0,71	2,53																																				
A3	10 minutos	0,59	0,33	0,33																																					
		0,59	0,30	0,31																																					
		1,18	0,63	0,64	2,45																																				
		3,48	2,06	2,07	7,61																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SQ</th> <th>GDL</th> <th>MQ</th> <th>TESTE F</th> <th>F TAB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>0,00271</td> <td>2</td> <td>0,001355</td> <td>3,09</td> <td>4,26</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0,22248</td> <td>2</td> <td>0,11124</td> <td>253,51</td> <td>4,26 (*)</td> </tr> <tr> <td>AB</td> <td>0,00322</td> <td>4</td> <td>0,000805</td> <td>1,83</td> <td>3,63</td> </tr> <tr> <td>ERRO</td> <td>0,00395</td> <td>9</td> <td>0,0004388</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>0,23236</td> <td>17</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB	A	0,00271	2	0,001355	3,09	4,26	B	0,22248	2	0,11124	253,51	4,26 (*)	AB	0,00322	4	0,000805	1,83	3,63	ERRO	0,00395	9	0,0004388			TOTAL	0,23236	17			
	SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB																																				
A	0,00271	2	0,001355	3,09	4,26																																				
B	0,22248	2	0,11124	253,51	4,26 (*)																																				
AB	0,00322	4	0,000805	1,83	3,63																																				
ERRO	0,00395	9	0,0004388																																						
TOTAL	0,23236	17																																							
Variável A = tempo de ultra-som Variável B = volume de solução dispersante TC = 3,21734 a = 3; b = 3; n = 2 (*) fator significativo																																									

QUADRO 13: ANOVA para os testes de granulometria ( $D_{50}$ ) com variados volumes de solução dispersante e tempos de ultra-som em amostras do produto das centrífugas.

VARIÁVEIS		B1 5 ml	B2 10 ml	B3 15 ml																																					
A1	5 minutos	0,5	0,49	0,47																																					
		0,49	0,5	0,47																																					
		0,99	0,99	0,94	2,92																																				
A2	10 minutos	0,46	0,36	0,44																																					
		0,36	0,36	0,36																																					
		0,82	0,72	0,8	2,34																																				
A3	15 minutos	0,35	0,33	0,36																																					
		0,44	0,36	0,36																																					
		0,79	0,69	0,72	2,2																																				
		2,6	2,4	2,46	7,46																																				
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>SQ</th> <th>GDL</th> <th>MQ</th> <th>TESTE F</th> <th>F TAB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>0,04857</td> <td>2</td> <td>0,024285</td> <td>17,08</td> <td>4,26 (*)</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>0,00351</td> <td>2</td> <td>0,001755</td> <td>1,23</td> <td>4,26</td> </tr> <tr> <td>AB</td> <td>0,00276</td> <td>4</td> <td>0,00069</td> <td>0,48</td> <td>3,63</td> </tr> <tr> <td>ERRO</td> <td>0,0128</td> <td>9</td> <td>0,001422</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>0,06764</td> <td>17</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB	A	0,04857	2	0,024285	17,08	4,26 (*)	B	0,00351	2	0,001755	1,23	4,26	AB	0,00276	4	0,00069	0,48	3,63	ERRO	0,0128	9	0,001422			TOTAL	0,06764	17			
	SQ	GDL	MQ	TESTE F	F TAB																																				
A	0,04857	2	0,024285	17,08	4,26 (*)																																				
B	0,00351	2	0,001755	1,23	4,26																																				
AB	0,00276	4	0,00069	0,48	3,63																																				
ERRO	0,0128	9	0,001422																																						
TOTAL	0,06764	17																																							
Variável A = tempo de ultra-som Variável B = volume de solução dispersante TC = 3,09176 a = 3; b = 3; n = 2 (*) fator significativo																																									

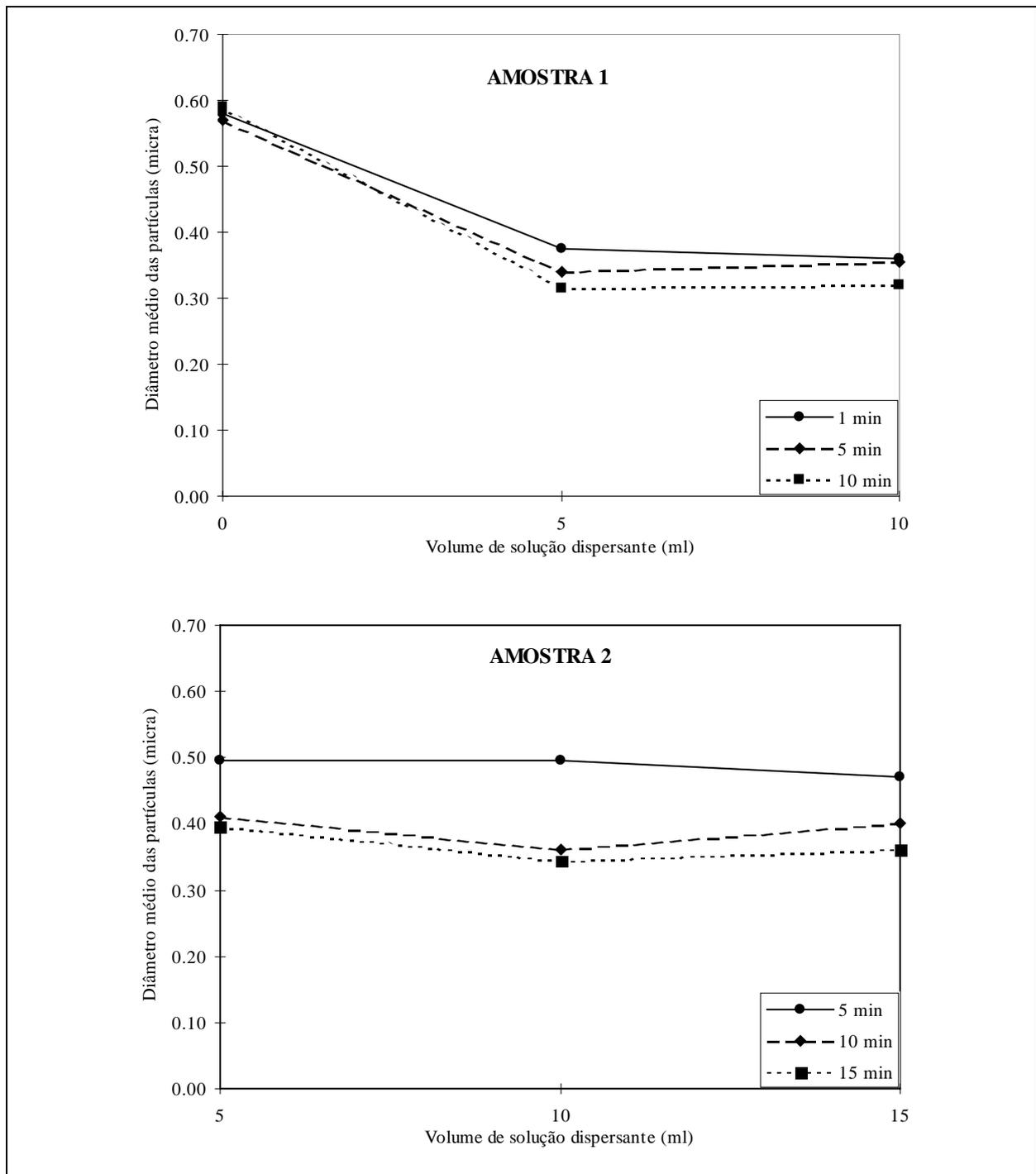


FIGURA 10: Gráficos dos testes de granulometria ( $D_{50}$ ) com amostras de produtos das centrífugas, relativos aos quadros 12 (amostra 1) e 13 (amostra 2).

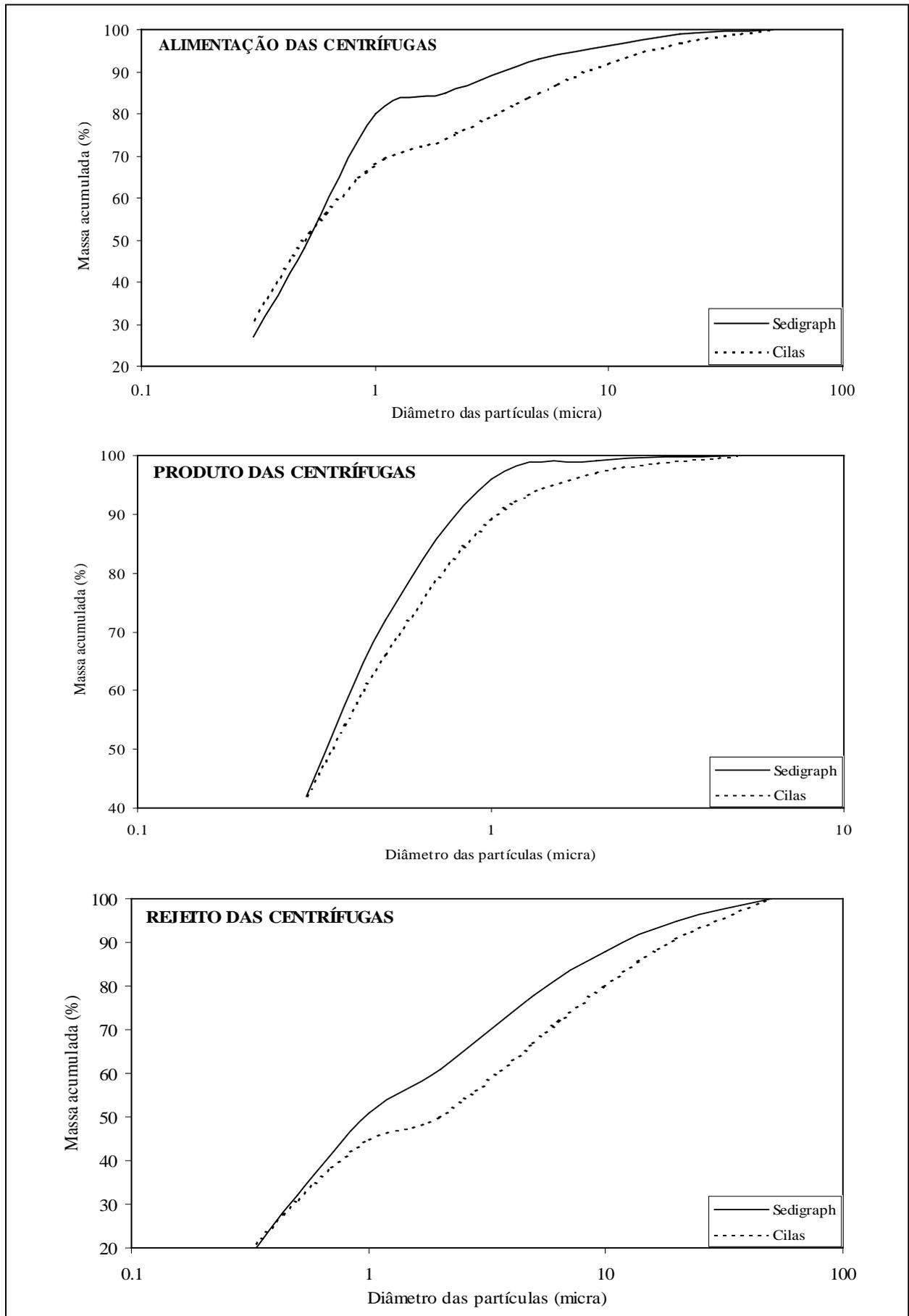


FIGURA 11: Distribuições granulométricas de materiais diferentes analisados em granulômetros Sedigraph e Cilas.

QUADRO 14: Comparação entre os valores médios de granulometria de três *kits* de quartzo analisados nos laboratórios Cilas e LAPROM, no mesmo modelo de granulômetro.

DIÂMETRO ESFÉRICO EQUIVALENTE ( $\mu\text{m}$ )						
$\emptyset$	KIT P1		KIT P2		KIT P3	
	CILAS	LAPROM	CILAS	LAPROM	CILAS	LAPROM
D <sub>10</sub>	1,85	1,64	0,58	0,75	4,17	4,10
D <sub>50</sub>	10,02	10,00	1,32	1,43	35,40	34,23
D <sub>90</sub>	18,05	17,75	2,43	2,83	91,43	91,68

QUADRO 15: Análises granulométricas em caulins da CADAM, nos laboratórios CILAS e LAPROM.

PRODUTO	LABORATÓRIO	DIÂM. ESF. EQUIVALENTE ( $\mu\text{m}$ )		
		D <sub>10</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>
Amazon 90	CILAS	0,07	0,31	0,76
	LAPROM	0,08	0,32	0,81
Alimentação das centrífugas	CILAS	0,09	0,46	7,47
	LAPROM	0,09	0,48	8,38

Há algumas vantagens com o uso do Cilas, principalmente na parte operacional e em relação aos recursos oferecidos pelo *software* que acompanha o equipamento. Entretanto, a maior vantagem relaciona-se com a rapidez da análise e a obtenção dos resultados. O ciclo operacional do Cilas - do *background* do líquido ao dispositivo de autolimpeza - dura cerca de 5 minutos. No Sedigraph, só a análise pode durar cerca de 30 minutos em materiais grossos e mais de 60 minutos em materiais finos, como o caulim beneficiado. Isso significa um ganho de tempo que pode chegar a 1/12 a favor do Cilas. Esse fator é importante numa mina quando se pretende agilizar alterações operacionais devido a variações texturais do minério.

#### 4.3 BENEFICIAMENTO DAS AMOSTRAS ROM

No período de 15/01 a 15/02/97, realizou-se um estágio no laboratório da CADAM, para o beneficiamento das 44 amostras ROM, análogo ao processo industrial. Os

equipamentos desse laboratório permitem uma simulação aproximada da rota industrial, proporcionando resultados compatíveis com os obtidos na planta.

Devido a problemas operacionais no laboratório, só foi possível o beneficiamento completo de apenas 11 amostras durante o tempo disponível, representando 25% do material coletado. A escolha abrangeu uma distribuição relativamente uniforme dos principais tipos litológicos amostrados.

As 11 amostras foram submetidas aos processos de dispersão, desareamento, centrifugação, separação magnética, branqueamento, floculação, filtragem e secagem. Como na planta, esses processos purificaram o caulim de suas impurezas (minerais contaminantes), aumentando a alvura do produto em cada fase do processo laboratorial. O quadro 16 indica as amostras tratadas no laboratório da CADAM.

QUADRO 16: Amostras beneficiadas e as respectivas denominações litológicas usadas na CADAM.

AMOSTRA	TIPO LITOLÓGICO	AMOSTRA	TIPO LITOLÓGICO
LA-AM2	0	LE-AM3	V
LB-AM3	III	LF-AM4	IV
LC-AM1	II	LG-AM3	III
LC-AM3	IIIb	LI-AM1	III
LD-AM1	II / III	LJ-AM3	IIIb
LD-AM4	IIIb / V		

Todas as alíquotas geradas no tratamento, minérios e rejeitos, foram divididas em duas subalíquotas: uma ficou no laboratório da CADAM e a outra seguiu para o LAPROM. Na CADAM, as pastilhas foram preparadas e avaliadas em um espectro-colorímetro da marca Elrepho. No LAPROM, as pastilhas foram preparadas de acordo com os procedimentos citados no item 4.2.2.1 e avaliadas em um espectro-colorímetro da marca HunterLab.

Na lavra, os técnicos informaram que os tipos litológicos I e II geram produtos finais de elevadas alvuras; os tipos III, IIIa, IIIb, e IIIg geram produtos de média alvura; os tipos 0, IV e V não são beneficiados.

### 4.3.1 Dispersão

Esse processo permitiu a liberação das partículas de caulinita e dos minerais contaminantes. Foi executado em um balde denominado Cayuga, a 3.800 rpm e tempo de operação de 30 minutos.

A polpa foi concentrada com 40% de sólidos, contendo água mais solução de hexametáfosfato de sódio (80%) com barilha (20%), a uma concentração de 3,5% P/V, correspondente a aplicação industrial de 2,8 kg da mistura por tonelada de minério ROM.

### 4.3.2 Desareamento

Consistiu na separação granulométrica da polpa dispersa, na peneira 44  $\mu\text{m}$ . O *overflow* foi rejeito final e era basicamente formado por caulinita não dispersa e quartzo grosso. O *underflow* seguiu para a centrifugação.

### 4.3.3 Centrifugação

Por ação da força centrífuga, o processo permitiu a separação do quartzo fino, caulinita não dispersa e demais minerais contaminantes do *underflow* do processo anterior. A operação foi realizada em uma centrífuga da marca Fanem, modelo GF-8, previamente ajustada para simular as centrífugas industriais. O tempo operacional com motor acionado foi de 45 segundos.

A polpa (minério) com os sólidos em suspensão foi conduzida ao separador magnético. O material centrifugado foi rejeito final.

### 4.3.4 Separação magnética

Esse processo permitiu a separação dos minerais ferrosos presentes na polpa do processo anterior. Foi realizado no separador magnético *cryofilter* HGMS, da marca Carpc, de alta intensidade de campo (5 tesla).

Parte da polpa centrifugada foi alimentada a uma taxa de 32 t/h (base seca). Ao passar no campo magnético os minerais com susceptibilidade magnética são capturados pela matriz que permite o escoamento da polpa. Posteriormente, sem a ação do campo magnético, a matriz foi lavada, liberando os minerais ferrosos que constituíram o rejeito final.

#### 4.3.5 Branqueamento

Esse processo atua na redução dos compostos de ferro presentes na polpa, não eliminados no separador magnético. Adicionou-se uma solução com hidrossulfito de sódio e sulfato de alumínio. O primeiro correspondeu a uma aplicação industrial de 2 kg por tonelada de minério, isto é, na base de 0,2% dos sólidos na polpa. Após a adição, a polpa permaneceu em repouso por um tempo mínimo de duas horas.

#### 4.3.6 Floculação, filtração e secagem

Passado o tempo mínimo de duas horas para a reação de redução, adicionou-se uma solução com sulfato de alumínio para baixar o pH na faixa de 4,5 a 5 e flocular a caulinita. A floculação permitiu a filtração da polpa, executada em kitassato de porcelana e papel filtro com porosidade de 3  $\mu\text{m}$ , acoplado em um funil de büchner e esse a uma bomba hidráulica. O tempo de filtração durou cerca de 30 minutos. Na filtração, a massa caulínica ficou retida no filtro e a água drenada com o ferro solubilizado foi rejeito final.

Após a filtração, as tortas de caulim foram colocadas em estufa com temperatura de 100° C, permanecendo por um tempo aproximado de duas horas. A temperatura e o tempo de secagem são importantes para se obter o valor correto da alvura. Se houver umidade, os valores de alvura serão menores. Por outro lado, temperatura e tempo excessivos podem alterar a alvura do material. A secagem foi o processo final.

As amostras processadas geraram produtos e rejeitos conforme mostra o fluxograma da figura 12. Tiveram a seguinte identificação:

- +44 micra: rejeito do desareamento;
- DESAR: produto do desareamento;
- RC: rejeito da centrífuga;
- PC-UNB: produto da centrífuga não branqueado;
- PC-BRANQ: produto da centrífuga branqueado;
- RSM: rejeito do separador magnético;
- PSM-UNB: produto do separador magnético não branqueado;
- PSM-BRANQ: produto do separador magnético branqueado.

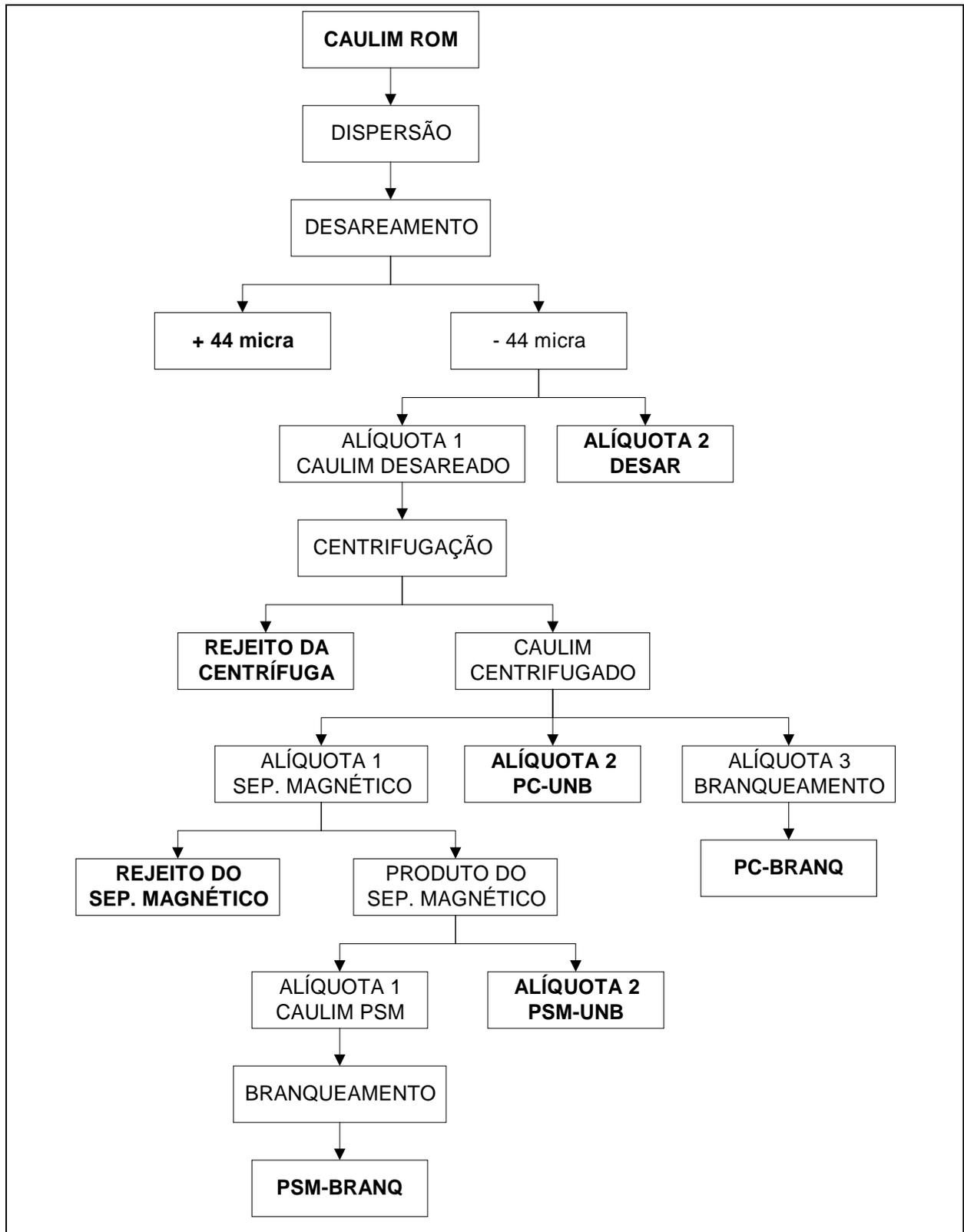


FIGURA 12: Fluxograma da geração das amostras a partir do caulim ROM.

## **5 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROM E DOS PRODUTOS DO BENEFICIAMENTO**

As amostras ROM e as alíquotas geradas no tratamento de algumas dessas amostras foram submetidas a análises químicas, mineralógicas, granulométricas e colorimétricas. O quadro 16 indica quais foram as amostras tratadas.

A identificação dos tipos litológicos na CADAM é visual e baseada nas características da textura, da cor e da mineralogia do minério. Os técnicos que acompanharam a coleta das 44 amostras ROM identificaram-nas por meio desse processo. Essas características são bem evidentes para o pessoal envolvido com a jazida, que as avaliam e decidem pelo descarte, ou pelo aproveitamento dos blocos de minério assim identificados. Entretanto, verificou-se que essas características nem sempre são evidentes. Exemplo disso são as amostras LD-AM1 e LD-AM4 do quadro 16, identificadas como tipos intermediários. Esses tipos existem e devem causar problemas para os técnicos em determinadas ocasiões.

A jazida é definida como um corpo mineral homogêneo, mas existem variações mineralógicas e texturais significativas numa bancada. A área amostrada, de aproximadamente 400 m<sup>2</sup>, comprovou essa variação. Como a cor é um dos critérios decisivos durante a lavra, investiu-se no desenvolvimento de um estudo baseado em colorimetria, no qual as amostras ROM e as alíquotas do beneficiamento, foram analisadas sob parâmetros físicos e matematicamente quantificáveis.

Nesse estudo, a classificação litológica da CADAM serviu como referência aos trabalhos desenvolvidos nas amostras, mas não foi considerada sob aquela denominação.

### **5.1 RECUPERAÇÃO MÁSSICA DAS AMOSTRAS BENEFICIADAS**

Os dados com a recuperação mássica das 11 amostras ROM beneficiadas no laboratório da CADAM encontram-se no quadro 17. Os valores mostrados em cada processo indicam a recuperação relativa à massa total alimentada no respectivo processo.

Os valores do quadro 17 são semelhantes aos das perdas nos processos da planta industrial. Ressalta-se que as amostras do quadro 17 são variadas e algumas delas não representam o minério econômico, como as amostras LF-AM4 e LE-AM3. Essa última, por exemplo, é um tipo textural e mineralógico diferente das demais, por apresentar uma

quantidade de quartzo maior que a dos demais tipos, razão pela qual mostrou maior perda no desareamento.

QUADRO 17: Recuperação mássica das amostras beneficiadas no laboratório da CADAM.

AMOSTRA	PROCESSO			PRODUTOS (%)		
	DESAR	CENTRIF	SEP MAG	ROM	REJEITOS	PROD. FINAL
LA-AM2	94,12	86,67	93,28	100	23,91	76,09
LB-AM3	94,38	84,30	88,74	100	29,40	70,60
LC-AM1	91,98	77,79	94,99	100	32,03	67,97
LC-AM3	93,97	85,82	93,79	100	24,36	75,64
LD-AM1	91,78	80,64	99,03	100	26,71	73,29
LD-AM4	90,34	85,37	92,69	100	28,51	71,49
LE-AM3	77,72	81,81	93,48	100	40,56	59,44
LF-AM4	93,01	79,73	93,17	100	30,91	69,09
LG-AM3	95,36	85,30	93,96	100	23,57	76,43
LI-AM1	92,85	82,62	96,67	100	25,84	74,16
LJ-AM3	93,51	85,69	93,70	100	24,92	75,08

Tendo como base as análises químicas das alíquotas do beneficiamento das 11 amostras, realizou-se um balanço de massas para o ferro e o titânio em todas as amostras. Os resultados encontram-se no anexo 2. Por meio desses resultados, observa-se que não há o fechamento do balanço para a maioria das amostras, havendo, inclusive, diferenças bem significativas e indicando problemas analíticos.

## 5.2 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório Geolab, da empresa Geosol em Belo Horizonte (MG). O método de análise foi a fluorescência de raios-x, aplicado nas amostras ROM e nas alíquotas do beneficiamento. Os resultados das 44 amostras ROM encontram-se no quadro 18. Amostras que apresentam teor de  $\text{SiO}_2$  acima de 48% indicam quantidades de quartzo acima do normal para o caulim. Essas amostras geralmente correspondem ao minério do tipo V, de alta concentração de quartzo. O teor de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , conseqüentemente, diminui e indica menor quantidade de caulinita e minério não econômico.

Teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  acima de 2,5% são indesejáveis no minério, que apresenta cor avermelhada e é rejeitado durante a lavra. Todas as amostras com teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  acima dessa concentração correspondem ao minério do tipo IV, não econômico. Os demais óxidos ocorrem com teores relativamente homogêneos. O contaminante  $\text{TiO}_2$ , também indesejável no minério, varia entre 1,1% e 2,2% e parece não ter relação com o aumento do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas amostras.

Os resultados do quadro 18 são semelhantes aos obtidos pelas empresas CADAM (PEREIRA *et al.*, 1995) e PAULO ABIB ENGENHARIA (1994), em minério com características semelhantes aos amostrados para esse trabalho.

O quadro 19 contém os resultados das análises químicas nas alíquotas das 11 amostras beneficiadas. Não foram incluídos os valores dos óxidos de cálcio, magnésio e fósforo, porque os números são muito semelhantes aos do minério ROM e não mostram variações significativas com os processos.

As alíquotas DESAR (desareado) tendem a apresentar concentrações maiores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  que as demais. Isso é decorrente do processo de dispersão, no qual a ação mecânica desagrega os minerais oxidados. Esses minerais formam agregados e foram identificados em lupa binocular durante os testes de dispersão manual.

Nas alíquotas PC (produto das centrífugas), a ação da força centrífuga eliminou parte dos óxidos de ferro e de titânio e foi mais eficaz na eliminação dos óxidos de titânio; isto é, a concentração de  $\text{TiO}_2$  na alíquota PC diminuiu muito em relação à alíquota DESAR.

Nas alíquotas PSM-UNB (produto da separação magnética não branqueado) e PSM-BRANQ (produto da separação magnética branqueado), as concentrações dos óxidos de ferro e de titânio mantiveram-se constantes. Entretanto, cabe ressaltar que foi perceptível, visualmente, a diminuição da intensidade da coloração vermelha entre as alíquotas PC, PSM-UNB e PSM-BRANQ após os respectivos e sucessivos processos que as originaram.

Sob consulta, um químico do Laboratório Geolab informou que o método analítico aplicado nas amostras pode gerar um erro relativo em torno de 5% nos resultados. Para o nível de concentração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nas amostras - em torno de 2% - esse erro representa 0,1% de teor absoluto nos resultados.

Os rejeitos dos processos contêm quantidades significativas de caulinita. O rejeito do desareamento contém quartzo e muita caulinita agregada. O processo mecânico de dispersão das amostras na CADAM não foi eficiente na dispersão dos minerais. O quadro 20 mostra os resultados das análises químicas dos rejeitos das amostras beneficiadas.

Os rejeitos da centrifugação e da separação magnética contêm caulinita não dispersa, quartzo fino e minerais de ferro e de titânio. Esses últimos minerais estão mais concentrados nesses rejeitos.

QUADRO 18: Análises químicas por fluorescência de raios-x nas 44 amostras do minério ROM.

ROM	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
LA-AM1	37,5	45,1	1,8	1,1	0,05	0,10	0,051
LA-AM2	37,3	44,9	2,0	1,3	0,05	0,10	0,068
LA-AM3	36,6	46,1	1,8	1,3	0,05	0,10	0,075
LA-AM4	37,1	45,4	2,1	1,1	0,05	0,10	0,080
LB-AM1	37,0	44,5	2,3	2,0	0,05	0,10	0,090
LB-AM2	36,7	45,3	2,2	1,5	0,05	0,10	0,071
LB-AM3	36,1	45,5	2,4	1,7	0,05	0,10	0,081
LB-AM4	36,2	45,7	2,2	1,7	0,05	0,10	0,075
LC-AM1	34,2	48,6	1,9	1,8	0,05	0,10	0,068
LC-AM2	36,8	46,0	1,8	1,2	0,05	0,10	0,068
LC-AM3	37,0	45,5	2,0	1,2	0,05	0,10	0,075
LC-AM4	37,7	44,9	2,1	1,2	0,05	0,10	0,071
LD-AM1	37,1	46,0	1,8	1,1	0,05	0,10	0,062
LD-AM2	37,3	44,8	2,1	1,3	0,05	0,10	0,062
LD-AM3	37,4	44,8	2,1	1,4	0,05	0,10	0,073
LD-AM4	34,9	48,5	2,0	1,5	0,05	0,10	0,077
LE-AM1	37,1	45,0	2,1	1,5	0,05	0,10	0,066
LE-AM2	30,6	51,5	2,1	2,2	0,05	0,10	0,061
LE-AM3	26,3	59,5	2,0	1,9	0,08	0,10	0,053
LE-AM4	31,0	53,7	1,8	1,4	0,05	0,10	0,070
LF-AM1	36,3	42,9	5,4	1,3	0,05	0,10	0,053
LF-AM2	35,4	42,2	7,1	1,5	0,05	0,10	0,062
LF-AM3	37,4	44,3	2,4	1,7	0,05	0,10	0,066
LF-AM4	35,2	45,2	4,0	1,6	0,05	0,10	0,067
LF-AM5	34,9	43,8	5,6	1,5	0,05	0,10	0,059
LG-AM1	37,1	46,0	1,8	1,1	0,05	0,10	0,050
LG-AM2	37,2	45,0	2,2	1,3	0,05	0,12	0,050
LG-AM3	37,4	45,3	1,9	1,2	0,05	0,10	0,050
LG-AM4	37,3	45,2	2,0	1,2	0,05	0,10	0,055
LG-AM5	37,2	44,8	2,2	1,3	0,05	0,12	0,050
LH-AM1	37,4	45,6	1,8	1,2	0,05	0,10	0,050
LH-AM2	35,9	44,2	4,8	1,3	0,05	0,10	0,051
LH-AM3	37,1	44,5	3,2	1,0	0,05	0,10	0,050
LH-AM4	36,9	45,2	2,3	1,4	0,05	0,10	0,050
LH-AM5	36,6	45,8	2,2	1,4	0,05	0,10	0,050
LI-AM1	36,9	46,4	1,7	1,0	0,05	0,10	0,050
LI-AM2	36,7	44,0	4,0	1,2	0,05	0,10	0,050
LI-AM3	37,3	44,5	2,9	1,2	0,05	0,10	0,050
LI-AM4	36,1	44,4	4,2	1,5	0,05	0,10	0,050
LJ-AM1	37,0	45,6	2,2	1,2	0,05	0,10	0,068
LJ-AM2	37,1	45,6	2,0	1,2	0,05	0,10	0,050
LJ-AM3	36,1	46,4	2,0	1,2	0,05	0,14	0,050
LJ-AM4	36,7	45,6	2,2	1,4	0,05	0,10	0,054
LJ-AM5	36,3	45,6	2,3	1,6	0,05	0,10	0,053

QUADRO 19: Análises químicas por fluorescência de raios-x nas alíquotas das 11 amostras beneficiadas.

AMOSTRA LA-AM2					AMOSTRA LE-AM3			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
ROM	37,3	44,9	2,0	1,3	26,3	59,5	2,0	1,9
DESAR	37,3	44,9	2,0	1,4	35,9	45,8	2,4	2,1
PC	37,6	45,1	1,8	1,1	37,6	44,9	2,0	1,2
PSM-UNB	37,9	44,7	1,9	1,1	37,3	45,2	1,9	1,0
PSM-BRANQ	38,4	44,3	1,8	1,1	38,4	44,3	1,9	0,9
AMOSTRA LB-AM3					AMOSTRA LF-AM4			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
ROM	36,1	45,5	2,4	1,7	35,2	45,2	4,0	1,6
DESAR	37,3	43,9	2,5	2,1	36,6	43,9	3,5	1,7
PC	37,8	44,4	2,1	1,3	37,0	44,6	2,9	1,2
PSM-UNB	37,6	44,6	2,0	1,3	37,0	45,1	2,4	1,2
PSM-BRANQ	37,7	44,9	2,0	1,3	37,5	44,7	2,4	1,1
AMOSTRA LC-AM1					AMOSTRA LG-AM3			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
ROM	34,2	48,6	1,9	1,8	37,4	45,3	1,9	1,2
DESAR	37,2	44,5	2,2	2,1	37,2	45,1	2,0	1,4
PC	38,2	44,1	2,0	1,4	37,9	45,1	1,8	1,0
PSM-UNB	38,2	44,2	1,9	1,4	37,7	45,2	1,8	1,0
PSM-BRANQ	38,4	43,6	2,1	1,3	38,2	44,8	1,8	1,0
AMOSTRA LC-AM3					AMOSTRA LI-AM1			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
ROM	37,0	45,5	2,0	1,2	36,9	46,4	1,7	1,0
DESAR	38,7	43,7	2,0	1,2	38,6	44,3	1,8	1,2
PC	38,3	44,4	2,0	1,0	38,4	44,5	1,6	0,9
PSM-UNB	38,8	44,0	1,9	1,0	38,6	44,4	1,7	0,9
PSM-BRANQ	38,8	44,0	2,0	1,0	38,8	44,1	1,7	0,9
AMOSTRA LD-AM1					AMOSTRA LJ-AM3			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
ROM	37,1	46,0	1,8	1,1	36,1	46,4	2,0	1,2
DESAR	38,5	44,3	1,8	1,3	38,0	44,3	2,2	1,4
PC	39,3	44,0	1,7	1,0	38,1	44,2	2,1	1,1
PSM-UNB	38,3	44,5	1,7	0,9	38,5	44,1	2,0	1,0
PSM-BRANQ	38,9	44,1	1,7	0,9	38,8	43,8	2,0	1,0
AMOSTRA LD-AM4								
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>				
ROM	34,9	48,5	2,0	1,5				
DESAR	36,9	44,9	2,1	1,6				
PC	38,0	44,6	1,9	1,1				
PSM-UNB	38,4	44,2	1,9	1,1				
PSM-BRANQ	38,3	44,3	1,9	1,1				

Não foi possível quantificar o rejeito do branqueamento químico. O processo de filtragem gerou uma quantidade muito pequena de sólidos em suspensão (caulinita extremamente fina) na água drenada.

QUADRO 20: Análises químicas por fluorescência de raios-x nos rejeitos das 11 amostras beneficiadas.

AMOSTRA	REJEITO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
LA-AM2	Desareado	37,1	45,3	2,1	1,5
	Centrifugado	36,9	43,7	2,5	2,7
	Sep. Magnét.	37,3	43,4	3,0	2,0
LB-AM3	D	32,9	50,0	2,8	2,3
	C	35,7	43,4	3,4	3,9
	SM	36,7	44,6	3,1	1,8
LC-AM1	D	12,5	78,8	1,6	2,2
	C	35,6	45,2	2,3	3,6
	SM	36,9	43,9	2,4	2,6
LC-AM3	D	32,9	49,4	2,8	2,7
	C	37,4	43,7	2,7	2,1
	SM	38,0	42,9	3,2	1,7
LD-AM1	D	30,5	56,1	1,5	1,0
	C	38,1	43,8	2,0	2,0
	SM	36,0	42,0	3,2	4,5
LD-AM4	D	11,5	80,3	1,8	1,7
	C	34,3	45,3	2,9	3,8
	SM	37,3	43,2	3,3	1,8
LE-AM3	D	0,98	92,6	2,3	3,5
	C	33,5	46,6	3,2	4,0
	SM	37,3	43,2	3,3	2,1
LF-AM4	D	25,2	56,6	6,7	1,6
	C	34,0	42,5	5,9	4,1
	SM	31,9	38,4	12,7	2,7
LG-AM3	D	36,0	47,2	1,9	1,3
	C	36,7	44,9	2,1	2,6
	SM	37,5	44,9	2,1	1,5
LI-AM1	D	26,2	61,8	1,3	0,79
	C	38,5	44,0	1,9	1,8
	SM	37,2	44,9	1,9	1,6
LJ-AM3	D	24,9	63,5	2,0	1,4
	C	37,1	44,3	2,5	2,5
	SM	36,6	44,2	2,9	1,9

### 5.3 ANÁLISES MINERALÓGICAS

As análises mineralógicas foram realizadas no Instituto de Geociências (IG) da UFRGS, em um difratômetro de raios-x com amostras em pó total e não orientada. Foram escolhidas 11 amostras ROM e 3 seqüências de alíquotas originadas no beneficiamento de 3 amostras.

Os difratogramas apresentaram resultados semelhantes e os principais minerais identificados foram: caulinita, quartzo, hematita, ghoetita e anatásio. Também identificaram, na maioria das amostras, que a caulinita ocorre nas formas bem ordenada e desordenada.

Estudos mais detalhados, realizados no CETEM/RJ (LUZ, 199\_), considerando o minério ROM da mesma jazida e as frações +20  $\mu\text{m}$ , -20  $\mu\text{m}$  e -2  $\mu\text{m}$ , e análises por difração de raios-x, também identificaram os mesmos minerais (exceto ghoetita), bem como limonita, turmalina, rutilo, zircão, biotita, monazita e anfibólio. Esses últimos minerais, segundo o IG, só poderiam ser identificados no seu equipamento se as concentrações estivessem próximas a 5% na amostra, no mínimo.

### 5.4 ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

As análises granulométricas foram realizadas no equipamento granulômetro à difração laser, marca Cilas, no LAPROM.

A granulometria do minério ROM foi avaliada sob duas condições. Na primeira, determinou-se os percentuais de massas retidas nas malhas +500  $\mu\text{m}$ , +149  $\mu\text{m}$  e +44  $\mu\text{m}$ , após sucessivas dispersões manuais. Os comentários encontram-se no item 4.2.1.1.2 e os resultados no quadro 6.

A segunda avaliação ocorreu no material desagregado/disperso mecanicamente. Os respectivos diâmetros  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  encontram-se no quadro 21. Nessa avaliação, fica caracterizado a fina granulometria do minério bruto, onde as variações para  $D_{50}$  foram de 0,32 a 0,61  $\mu\text{m}$ .

A figura 13 mostra a distribuição granulométrica da amostra LA-AM1, de menor granulometria média entre as amostras analisadas, e a distribuição da amostra LI-AM2, que apresentou o  $D_{90}$  mais alto do universo de amostras coletadas. A primeira amostra caracteriza um minério de excelente qualidade. A segunda, não é minério econômico.

QUADRO 21: Principais granulometrias de amostras ROM obtidas em granulômetro à difração laser.

AMOSTRA	D <sub>10</sub> (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	D <sub>90</sub> (µm)
LA-AM1	0,07	0,32	0,78
LA-AM2	0,08	0,35	1,12
LA-AM3	0,09	0,43	4,29
LA-AM4	0,08	0,40	1,45
LB-AM1	0,09	0,44	4,90
LB-AM2	0,07	0,32	0,78
LB-AM3	0,08	0,39	2,88
LB-AM4	0,09	0,42	3,76
LC-AM1	0,09	0,44	4,53
LC-AM2	0,09	0,44	4,88
LC-AM3	0,08	0,42	4,27
LC-AM4	0,08	0,36	1,19
LD-AM1	0,10	0,49	6,73
LD-AM2	0,09	0,44	4,40
LD-AM3	0,09	0,45	5,03
LD-AM4	0,08	0,37	1,26
LE-AM1	0,09	0,47	4,92
LE-AM2	0,10	0,56	8,68
LE-AM3	0,09	0,48	7,60
LE-AM4	0,08	0,39	2,71
LF-AM1	0,09	0,44	4,34
LF-AM3	0,11	0,61	10,48
LF-AM4	0,08	0,36	1,18
LG-AM2	0,08	0,41	5,60
LG-AM3	0,09	0,41	2,26
LG-AM4	0,09	0,42	4,32
LH-AM1	0,08	0,40	2,35
LH-AM2	0,08	0,41	3,78
LH-AM4	0,08	0,41	3,36
LH-AM5	0,09	0,46	6,19
LI-AM1	0,08	0,41	3,84
LI-AM2	0,10	0,49	18,18
LI-AM3	0,07	0,32	0,78
LI-AM4	0,08	0,37	1,24
LJ-AM1	0,08	0,37	1,94
LJ-AM2	0,08	0,38	3,01
LJ-AM3	0,09	0,42	3,69
LJ-AM4	0,08	0,35	1,09
LJ-AM5	0,08	0,35	1,04

Os diâmetros D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> e D<sub>90</sub> das principais alíquotas do beneficiamento de algumas amostras ROM, encontram-se no quadro 22. Nesse quadro, adicionou-se os diâmetros do ROM para referenciá-los aos demais.

Os dados do quadro 22 mostram a qualidade do produto beneficiado. A maioria das amostras apresentou um produto da centrífuga com valor 0,31 µm para o diâmetro D<sub>50</sub>. Na

verdade, esse produto ainda passa na separação magnética e no branqueamento químico, mas esses processos não alteram a granulometria do produto final.

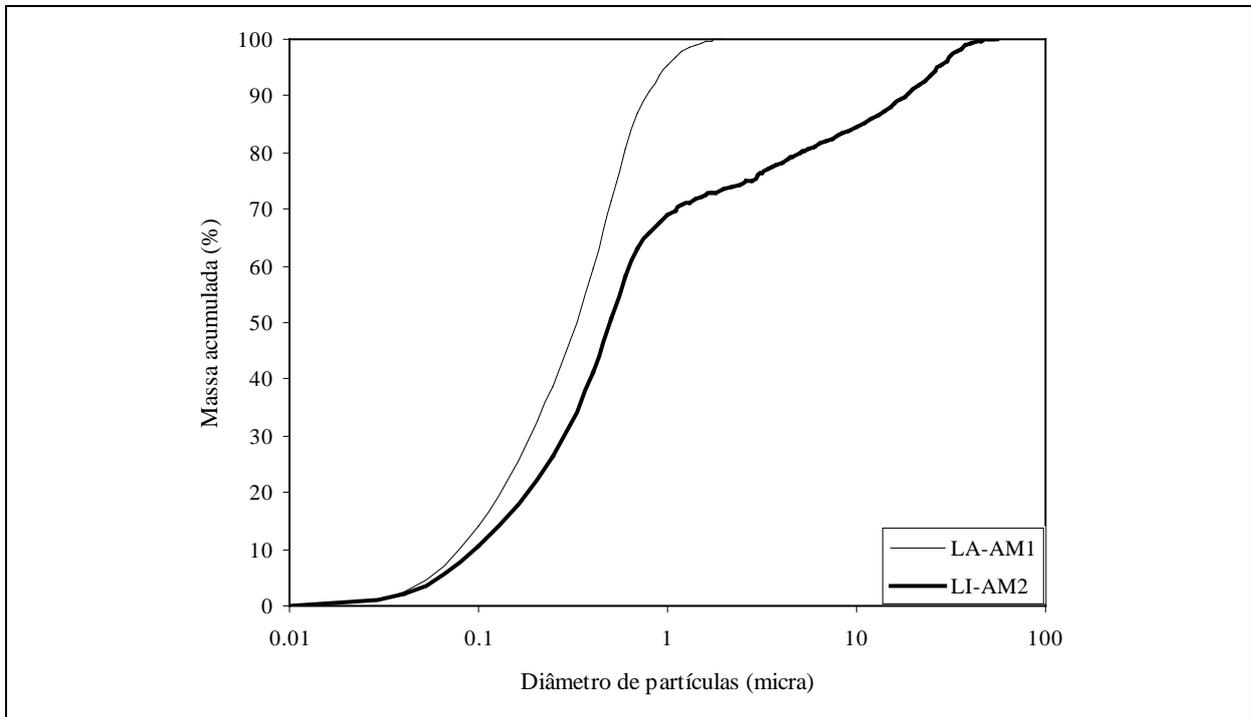


FIGURA 13: Distribuições granulométricas das amostras LA-AM1 e LI-AM2, apresentaram, respectivamente, o  $D_{50}$  de valor mais baixo e o  $D_{90}$  de valor mais elevado entre as amostras ROM coletadas na jazida.

Um dos produtos rejeitados, a fração  $> 44 \mu\text{m}$  (rejeito do desareado), não foi avaliado no granulômetro devido ao limite operacional do equipamento, que é de  $500 \mu\text{m}$  para o máximo diâmetro. Entretanto, uma das amostras foi analisada (LI-AM1) e os valores para o rejeito do desareado podem ser observados no quadro 22. A figura 14 mostra as curvas granulométricas de uma amostra ROM (LI-AM1) e de suas alíquotas beneficiadas. A figura 15 mostra os rejeitos gerados nos processos de desareamento, centrifugação e branqueamento químico, da mesma amostra.

## 5.5 AVALIAÇÃO COLORIMÉTRICA

As análises foram realizadas no LAPROM, em um espectro-colorímetro da marca HunterLab, modelo Ultra Scan XE, com o auxílio do *software* Universal, distribuído pelo fabricante do equipamento. A standardização para as leituras das amostras ocorreu no modo especular excluída e sem filtro ultravioleta. A energia luminosa incidente é gerada por uma lâmpada de xenônio (iluminante tipo  $D_{65}$ ). O quadro 23 mostra os principais parâmetros

colorimétricos das 44 amostras ROM, avaliados no LAPROM e na CADAM. Alguns fundamentos da colorimetria são revisados no anexo 1.

QUADRO 22: Granulometrias dos principais produtos do beneficiamento do caulim ROM.

AMOSTRA	PRODUTO	D <sub>10</sub> (µm)	D <sub>50</sub> (µm)	D <sub>90</sub> (µm)
LA-AM2	<i>Run-of-mine</i>	0,08	0,35	1,12
	Desareado	0,08	0,35	1,04
	Produto da Centrífuga	0,07	0,31	0,77
	Rejeito da Centrífuga	0,19	3,08	21,25
LC-AM1	ROM	0,09	0,44	4,53
	D	0,10	0,50	7,33
	PC	0,08	0,40	1,48
	RC	0,15	0,97	13,64
LD-AM1	ROM	0,10	0,49	6,73
	D	0,09	0,46	7,14
	PC	0,07	0,31	0,77
	RC	0,18	2,51	14,93
LD-AM4	ROM	0,08	0,37	1,26
	D	0,09	0,45	6,47
	PC	0,08	0,31	0,78
	RC	0,14	0,75	13,39
LE-AM3	ROM	0,09	0,48	7,60
	D	0,09	0,48	7,57
	PC	0,07	0,31	0,77
	RC	0,18	2,75	17,80
LF-AM4	ROM	0,08	0,36	1,18
	D	0,07	0,32	0,77
	PC	0,08	0,32	0,82
	RC	0,14	0,72	15,65
LG-AM3	ROM	0,09	0,41	2,26
	D	0,08	0,41	5,19
	PC	0,07	0,31	0,77
	RC	0,16	1,61	14,11
LI-AM1	ROM	0,08	0,41	3,84
	D	0,08	0,41	5,11
	PC	0,07	0,31	0,77
	RC	0,17	2,13	15,80
	Rejeito do Desareado	51,78	179,32	326,48
LJ-AM3	ROM	0,09	0,42	3,69
	D	0,08	0,41	4,98
	PC	0,08	0,35	0,90
	RC	0,18	2,41	16,64

O *software* do equipamento HunterLab permite o acesso a tabelas e gráficos que mostram os parâmetros de colorimetria das amostras avaliadas, em toda a faixa de

comprimentos de onda do visível, em intervalos de 10 nm. Esses recursos foram fundamentais para o desenvolvimento desse estudo.

Os valores de alvura obtidos no LAPROM são invariavelmente inferiores aos da CADAM. Atribui-se esse fato às diferenças nos processos de preparação das pastilhas. No LAPROM, seguiu-se os procedimentos da norma TAPPI T 534 pm-92, substituindo o pulverizador *Junke & Kunkel*, citado na norma, pelo pulverizador *mixer mill*, devido aos argumentos citados no item 4.2.2.2. Na CADAM, a pulverização é realizada em um equipamento mais potente, que provoca um forte atrito por cisalhamento nas partículas.

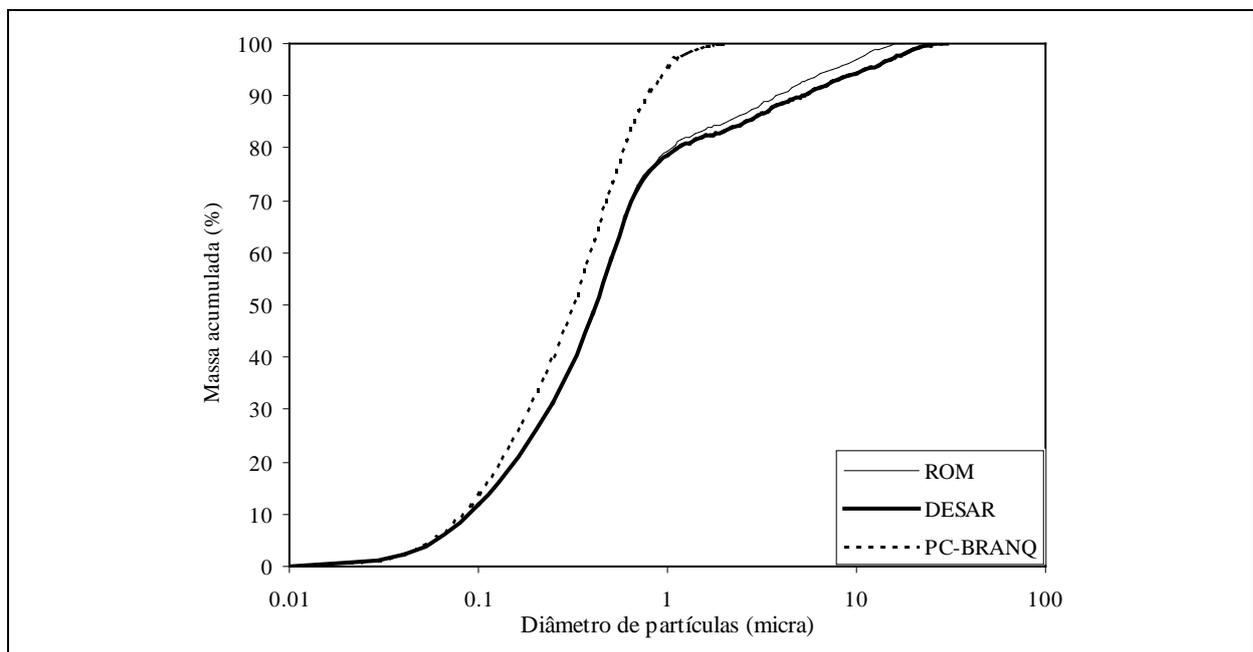


FIGURA 14: Distribuições granulométricas do ROM e das alíquotas Desareada e Produto da Centrifuga Branqueado, da amostra LI-AM1.

Ambos equipamentos não alteram o tamanho original, muito pequeno, das partículas. Na realidade, a ação não é pulverizadora, mas é dispersiva. Essa ação provoca um intenso atrito nos grãos, deixando-os mais dispersos após o processo. A diferença está no equipamento da CADAM que é mais eficaz que o do LAPROM. Naquele, as partículas ficam mais liberadas entre si, evidenciado pelo aumento de volume da massa seca pulverizada. Análises granulométricas em amostras do produto Amazon 90, pulverizadas nos dois equipamentos, mostraram resultados idênticos ao referido produto não pulverizado.

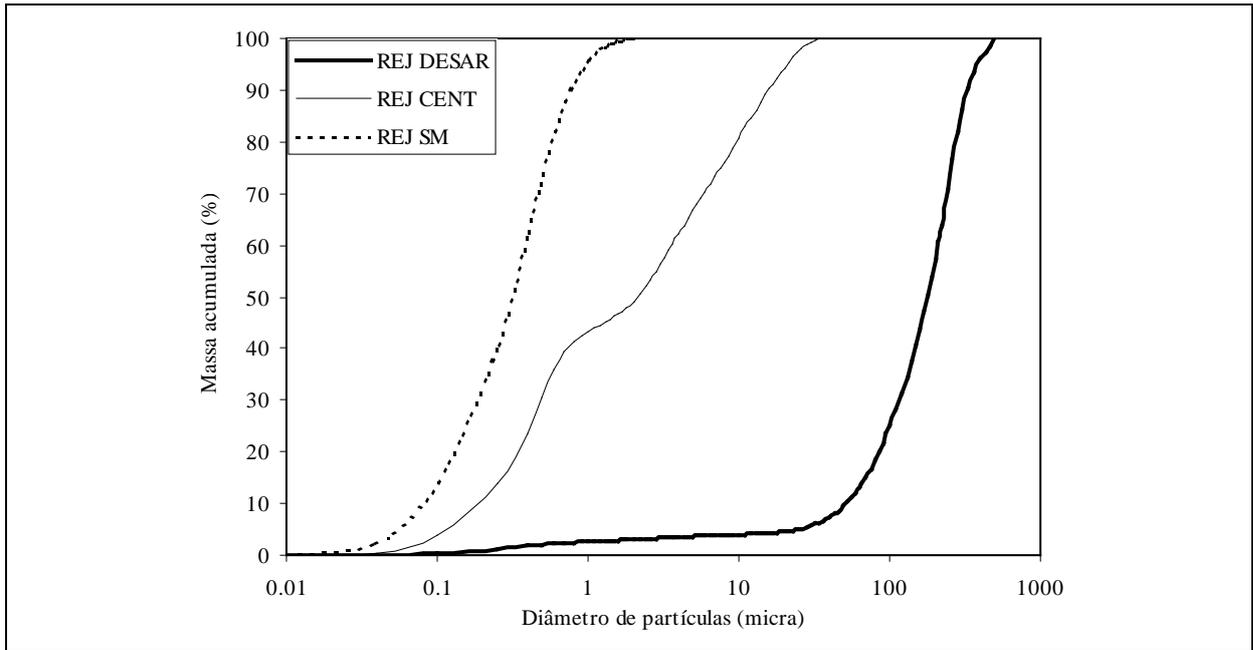


FIGURA 15: Distribuições granulométricas dos rejeitos do beneficiamento da amostra LI-AM1.

A forma de prensagem das pastilhas é outro fator que pode ter relação com as diferenças observadas no quadro 23. No LAPROM, utilizou-se um tipo de prensa idêntico ao utilizado nos laboratórios da empresa English China Clay, enquanto que a CADAM desenvolveu um dispositivo próprio que pode ser mais eficaz no processo.

Há um terceiro fator que pode ter influência nos resultados: os equipamentos de espectro-colorimetria. No LAPROM, as amostras foram avaliadas no equipamento da marca HunterLab. Na CADAM, a avaliação foi no da marca Elrepho, modelo Datacolor 2000. Placas de fórmica coloridas foram avaliadas nos dois equipamentos e os valores das alvuras no Elrepho foram até 2% maiores que os no HunterLab.

Divergências entre sistemáticas de preparação de pastilhas, ou entre equipamentos, no entanto, aparentemente não são importantes nessa etapa do estudo. Todas as avaliações no LAPROM foram realizadas com as mesmas sistemáticas em todas as amostras. Provavelmente, os resultados serão proporcionais se obtidos por meio das sistemáticas aplicadas na CADAM.

Os valores de alvura entre as amostras ROM são variáveis. As baixas alvuras no minério são atribuídas aos minerais de ferro e de titânio. Essa relação não é bem conhecida mas é notório que quanto maior a quantidade de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no minério, menor é a sua alvura. Essa tendência pode ser verificada confrontando-se os valores do quadro 18 (análise química) com os do quadro 23 (parâmetros colorimétricos).

QUADRO 23: Parâmetros colorimétricos das amostras ROM analisadas no LAPROM e na CADAM.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	Yellowness	Alvura	Yellowness	Alvura
LA-AM1	92,05	2,99	4,80	7,81	75,05	11,01	78,75
LA-AM2	91,33	2,79	5,93	9,60	72,26	13,08	76,00
LA-AM3	93,17	1,03	4,11	6,53	78,42	7,69	82,42
LA-AM4	92,40	1,78	4,70	7,54	76,01	9,33	80,36
LB-AM1	89,61	3,14	5,94	9,77	68,72	13,01	73,77
LB-AM2	91,26	3,11	5,46	8,89	72,63	12,15	76,44
LB-AM3	89,69	3,09	4,94	8,18	69,99	11,11	74,47
LB-AM4	90,94	2,45	5,27	8,58	72,23	11,32	76,23
LC-AM1	92,67	0,80	5,14	8,13	76,17	10,73	78,17
LC-AM2	90,39	1,31	6,07	9,76	70,30	7,19	83,36
LC-AM3	90,86	2,59	2,88	4,80	74,80	7,97	77,93
LC-AM4	90,20	2,64	4,34	7,14	71,78	7,26	80,77
LD-AM1	93,86	0,35	3,55	5,57	80,69	6,05	84,98
LD-AM2	92,89	0,74	3,69	5,86	78,34	6,47	84,06
LD-AM3	92,83	0,78	3,88	6,16	77,98	6,80	83,23
LD-AM4	92,59	0,48	3,54	5,62	77,89	6,21	81,79
LE-AM1	94,19	0,45	3,80	5,96	81,10	6,97	83,58
LE-AM2	92,95	0,35	3,61	5,72	78,60	5,91	80,11
LE-AM3	90,46	1,76	5,52	8,99	70,96	9,69	71,12
LE-AM4	93,22	0,22	4,63	7,28	77,99	5,84	81,73
LF-AM1	83,68	7,65	20,89	33,05	43,81	44,48	48,89
LF-AM2	75,36	13,66	19,79	34,32	33,13	51,58	37,00
LF-AM3	92,13	1,13	4,19	6,73	76,07	8,59	79,26
LF-AM4	86,36	5,53	14,31	23,19	53,88	30,82	58,97
LF-AM5	83,36	7,34	22,37	35,19	42,06	47,86	46,66
LG-AM1	91,87	1,44	3,04	4,93	76,83	6,22	80,38
LG-AM2	87,65	4,29	4,21	7,23	66,65	9,91	74,80
LG-AM3	90,77	1,41	5,65	9,10	71,54	9,82	75,32
LG-AM4	93,56	0,73	4,80	7,58	78,45	7,74	83,94
LG-AM5	90,19	1,82	2,02	3,35	74,43	5,37	78,63
LH-AM1	92,26	1,25	3,49	5,61	77,18	6,58	81,32
LH-AM2	75,43	12,77	18,25	31,99	34,30	38,58	47,68
LH-AM3	82,33	10,12	12,69	21,78	48,59	30,08	55,37
LH-AM4	91,67	2,18	4,92	7,97	74,18	9,45	78,03
LH-AM5	92,44	1,04	6,15	9,73	74,47	9,18	81,90
LI-AM1	94,06	0,59	4,01	6,30	80,54	7,16	84,01
LI-AM2	82,67	8,94	15,70	26,08	46,60	35,48	53,00
LI-AM3	85,14	7,77	16,40	26,45	49,97	30,37	59,24
LI-AM4	72,29	14,08	15,67	29,08	32,11	31,79	49,57
LJ-AM1	91,73	2,08	5,73	9,22	73,37	10,41	79,34
LJ-AM2	92,83	0,91	4,33	6,85	77,47	6,13	84,25
LJ-AM3	91,44	2,49	3,57	5,88	75,22	7,81	80,55
LJ-AM4	86,19	4,68	2,06	3,74	66,06	8,36	71,09
LJ-AM5	89,59	2,03	2,89	4,78	72,21	6,09	78,43

Uma questão importante é a condição física em que se encontra o ferro no minério. Isto é, se ocorre sob a forma de grãos liberados, se recobrindo a caulinita ou se substituindo o alumínio na estrutura da caulinita ou, ainda, pela combinação das três formas. Esse assunto é

polêmico e tem sido avaliado por alguns autores. Estudos com caulinitas de solos tropicais indicam que o ferro, nessas caulinitas, pode ser dividido em duas categorias: numa, há um conteúdo de ferro estrutural medido segundo a quantidade de ferro dissolvido em igual proporção que o alumínio, por ataque ácido. Noutra, há um conteúdo de ferro resistente, concentrado nos minerais resistatos. Nesses solos, é comum um elevado conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  estrutural (> 2%) nas caulinitas (HERBILLION, 1976).

Estudos com espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) nas mesmas caulinitas de solos tropicais indicaram que, dependendo da quantidade e da natureza do ferro, as caulinitas classificam-se em três grupos. O primeiro contém variedades bem cristalizadas, caracterizadas por um baixo conteúdo de ferro total. O segundo constitui variedades mal cristalizadas e contém mais ferro que o primeiro. O terceiro é um grupo intermediário com relação a quantidade e a natureza do ferro (MESTDAGH *et al.*, 1980).

Outra questão importante está na possibilidade de se estabelecer um limite de alvura, abaixo do qual o minério ROM seria descartado, porque estaria com minerais contaminantes em excesso. Entretanto, conforme comentários dos parágrafos anteriores, seria fundamental conhecer as relações estruturais ferro/caulinita no minério. Se o ferro estivesse liberado, os processos físicos e químicos do beneficiamento teriam eficácia na sua eliminação e eficácia parcial nos outros casos. Sem esse conhecimento, seria arriscado estabelecer um limite de alvura para o descarte, ou para o aproveitamento de determinados blocos de minério ROM.

Todas as alíquotas geradas no beneficiamento das 11 amostras ROM foram avaliadas por espectro-colorimetria nos dois laboratórios. Os espectros de reflectâncias encontram-se nas figuras 16 a 26 e correspondem aos valores lidos no LAPROM. Os quadros 24 a 34 mostram as principais informações colorimétricas geradas nos laboratórios LAPROM e CADAM.

Os quadros 24 a 34 mostram algumas tendências. O parâmetro  $L^*$ , que mede a luminosidade, aumenta com o beneficiamento; o parâmetro  $a^*$ , que quanto mais positivo indica que a amostra é mais vermelha, diminui com o beneficiamento; o parâmetro alvura, então, aumenta com o beneficiamento. Essas tendências indicam a progressiva diminuição dos contaminantes de cor vermelha, com o beneficiamento. Nas amostras onde os óxidos estão mais concentrados (LB-AM3, por ex.), as diferenças de uma fase para a outra são acentuadas. Quando o ROM contém pouco contaminante (LI-AM1, por ex.) não há muita variação nos parâmetros. Amostras com altas concentrações de contaminantes (LF-AM4, por ex.) não atingem alvuras desejadas, após o branqueamento.

QUADRO 24: Dados colorimétricos da amostra LA-AM2.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	89,87	3,18	6,64	10,86	68,49	13,08	76,00
DESAR	91,13	2,78	5,72	9,29	72,09	12,11	77,49
PC-UNB	92,24	2,60	5,88	9,43	74,26	11,99	79,63
PSM-UNB	93,67	1,88	6,18	9,75	76,98	11,38	82,11
PSM-BRANQ	95,42	0,13	4,69	7,22	82,82	7,16	87,58

QUADRO 25: Dados colorimétricos da amostra LB-AM3.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	87,81	3,23	5,15	8,66	66,02	11,24	73,07
PC-UNB	91,27	2,64	5,08	8,25	73,14	10,52	79,44
PSM-UNB	93,46	1,66	5,71	9,02	77,13	10,29	82,78
PSM-BRANQ	95,03	0,10	4,88	7,54	81,69	6,93	87,50

QUADRO.26: Dados colorimétricos da amostra LC-AM1.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	91,90	1,24	5,67	9,03	73,90	9,68	79,87
DESAR	93,54	0,76	4,99	7,83	78,23	8,69	82,49
PC-UNB	94,07	0,93	5,09	7,96	79,27	8,45	84,71
PSM-UNB	95,09	0,50	4,92	7,61	81,78	8,23	85,64
PSM-BRANQ	95,28	0,05	4,95	7,60	82,23	7,01	87,25

QUADRO 27: Dados colorimétricos da amostra LC-AM3.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	89,37	2,41	2,77	4,64	71,84	8,10	76,51
DESAR	90,66	2,35	2,62	4,35	74,69	7,01	79,90
PC-UNB	91,55	2,40	2,84	4,67	76,35	7,08	81,89
PSM-UNB	92,37	2,11	3,46	5,60	77,41	7,27	83,76
PSM-BRANQ	95,20	0,03	4,18	6,45	82,97	5,94	88,73

QUADRO 28: Dados colorimétricos da amostra LD-AM1.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	93,17	0,29	3,97	6,25	78,67	7,18	82,33
DESAR	93,81	0,28	3,58	5,60	80,54	5,66	85,78
PC-UNB	94,74	0,29	4,03	6,25	82,10	5,98	87,82
PSM-UNB	95,41	0,13	3,99	6,16	83,65	6,14	88,45
PSM-BRANQ	95,86	0,11	3,96	6,10	84,74	5,81	89,09

QUADRO 29: Dados colorimétricos da amostra LD-AM4.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	92,25	0,47	4,46	7,08	76,07	6,78	81,83
DESAR	92,66	0,42	3,74	5,92	77,81	6,07	84,07
PC-UNB	94,22	0,41	4,54	7,08	80,29	6,86	86,61
PSM-UNB	95,01	0,22	4,41	6,83	82,25	6,38	87,85
PSM-BRANQ	95,09	(0,04)	4,48	6,90	82,35	5,94	88,66

QUADRO 30: Dados colorimétricos da amostra LE-AM3.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	88,95	2,13	6,49	10,65	66,87	10,66	73,73
DESAR	91,25	1,86	5,50	8,91	72,62	11,91	75,74
PC-UNB	92,33	2,49	6,52	10,44	73,67	13,47	77,90
PSM-UNB	93,53	1,96	6,25	9,88	76,58	11,66	81,67
PSM-BRANQ	95,22	0,03	4,89	7,53	82,11	7,06	87,47

QUADRO 31: Dados colorimétricos da amostra LF-AM4.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	84,63	5,77	14,29	23,52	51,01	31,06	57,84
DESAR	86,51	5,47	13,56	22,06	54,89	28,82	61,73
PC-UNB	87,54	5,61	13,75	22,13	56,51	28,70	63,63
PSM-UNB	89,79	4,49	10,76	17,24	63,80	21,03	71,56
PSM-BRANQ	92,47	2,23	10,33	16,10	69,64	18,01	76,26

QUADRO 32: Dados colorimétricos da amostra LG-AM3.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	92,87	0,46	4,19	6,62	77,74	7,43	82,68
DESAR	94,04	0,45	3,64	5,71	80,98	6,01	86,07
PC-UNB	94,49	0,39	3,85	6,01	81,73	6,04	87,88
PSM-UNB	94,98	0,25	4,13	6,40	82,51	6,18	88,54
PSM-BRANQ	95,24	(0,04)	3,93	6,07	83,35	5,60	89,37

QUADRO 33: Dados colorimétricos da amostra LI-AM1.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	93,16	0,45	4,45	7,01	78,05	7,50	83,44
DESAR	94,79	0,29	3,74	5,82	82,55	6,23	86,65
PC-UNB	95,62	0,21	3,78	5,84	84,39	6,20	88,34
PSM-UNB	95,00	0,35	4,01	6,24	82,66	6,12	88,84
PSM-BRANQ	95,44	0,01	3,88	5,99	83,88	5,41	89,42

QUADRO 34: Dados colorimétricos da amostra LJ-AM3.

AMOSTRA	LAPROM					CADAM	
	L*	a*	b*	<i>Yellowness</i>	Alvura	<i>Yellowness</i>	Alvura
ROM	90,66	2,47	4,02	6,59	73,11	9,20	77,89
DESAR	91,85	2,14	3,48	5,67	76,24	7,23	81,63
PC-UNB	92,63	2,03	3,57	5,77	77,84	7,40	83,51
PSM-UNB	93,64	1,57	3,79	6,03	79,83	7,30	85,14
PSM-BRANQ	95,37	0,09	4,41	6,81	83,05	5,89	88,84

Nas figuras 16 a 26 as curvas ROM, DESAR, PC-UNB e PSM-UNB - seqüência do beneficiamento - gradativamente alcançam reflectâncias, ou alvuras, mais elevadas e seus formatos parecem semelhantes. Entretanto, a curva PSM-BRANQ, da última fase, tem um formato diferente, exceto quando o ROM tem excesso de óxidos de ferro (LF-AM4, por ex.). Nesse caso, a última curva acompanha o formato das anteriores.

Os espectros de reflectâncias das figuras 16 a 26 apresentam 3 conjuntos de seqüências de curvas. No primeiro, o ganho de alvura caracteriza uma seqüência de curvas

que apresenta formas semelhantes do ROM ao PSM-BRANQ. Esse conjunto é formado pelas amostras LD-AM1, LD-AM4, LG-AM3 e LI-AM1. No segundo conjunto, o ganho de alvura caracteriza uma seqüência de curvas com formas semelhantes do ROM ao PSM-UNB. Mas a forma da curva PSM-BRANQ varia acentuadamente em relação às anteriores. Esse conjunto é formado pelas amostras LA-AM2, LB-AM3, LC-AM1, LC-AM3, LE-AM3 e LJ-AM3. Nesses dois primeiros conjuntos, as reflectâncias têm valores superiores a 50% no início da faixa de comprimentos de onda.

No terceiro conjunto, as reflectâncias têm valores inferiores a 50% no início da faixa de comprimentos de onda. O ganho de alvura caracteriza uma seqüência de curvas com formas semelhantes do ROM ao PSM-BRANQ, mas de padrão distinto das demais seqüências. É o caso da amostra LF-AM4.

Dos 3 conjuntos, o terceiro caracteriza um tipo de minério não econômico, de cor avermelhada e que é descartado quando presente na jazida. Os outros dois são os conjuntos de maior interesse nesse estudo.

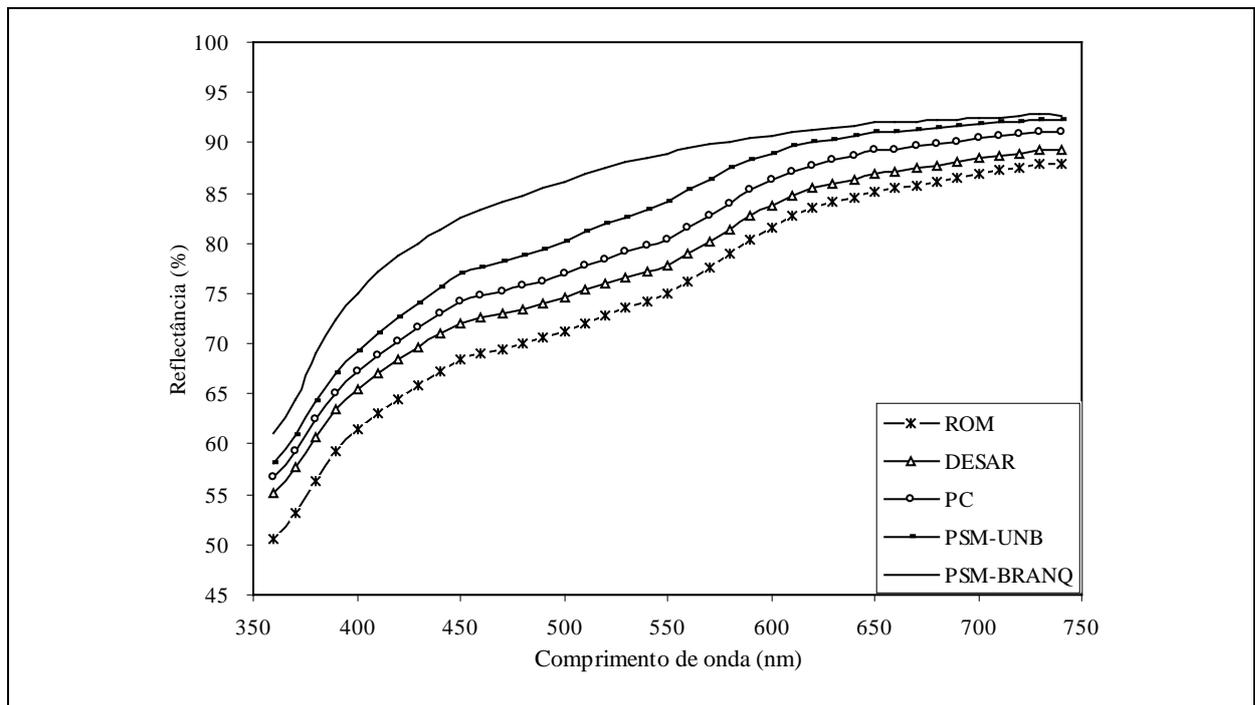


FIGURA 16: Espectros de reflectância do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LA-AM2.

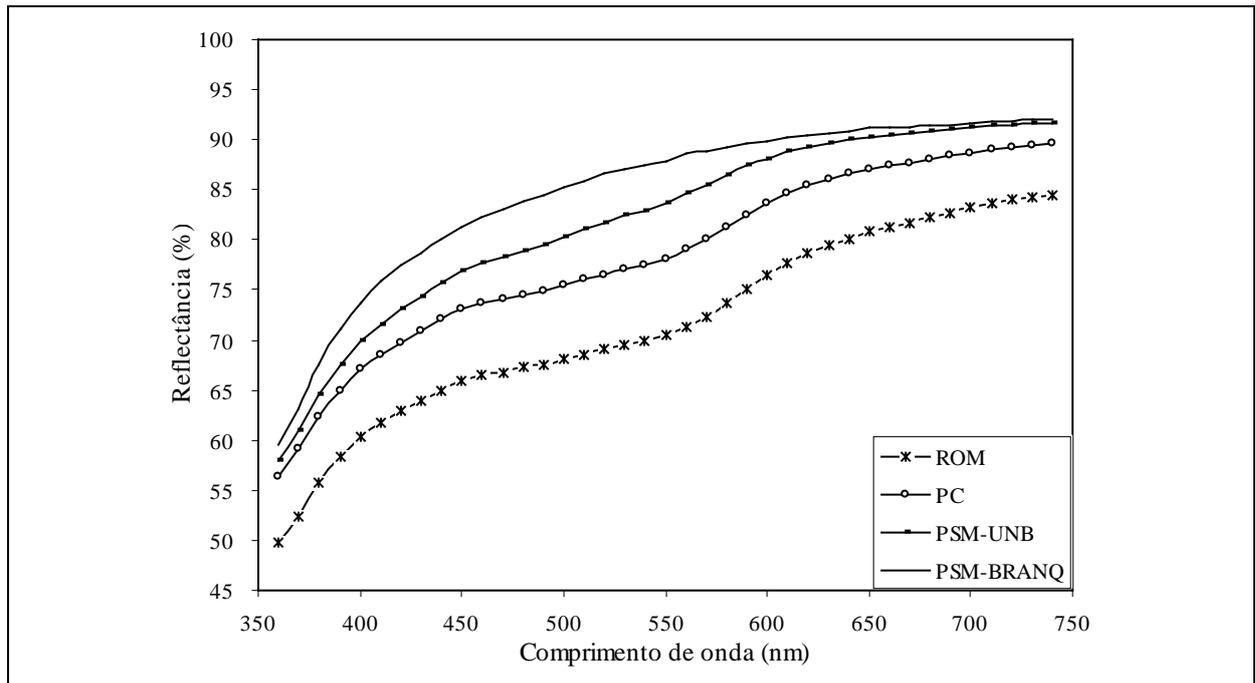


FIGURA 17: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LB-AM3.

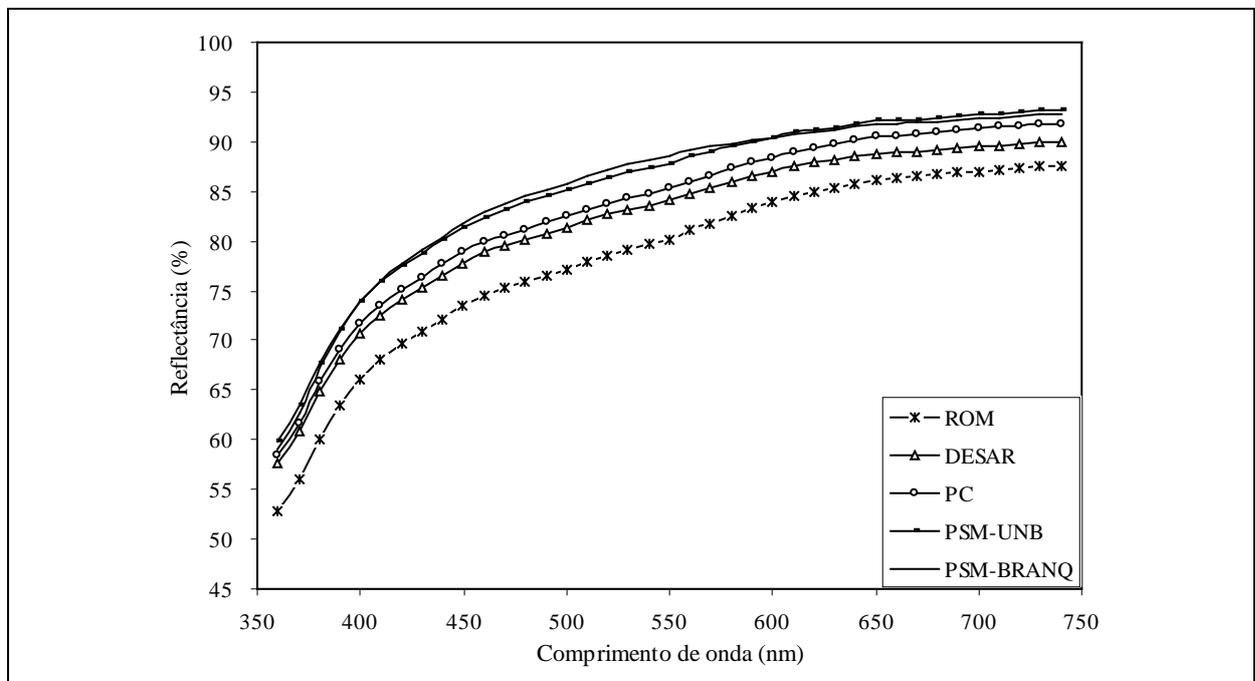


FIGURA 18: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LC-AM1.

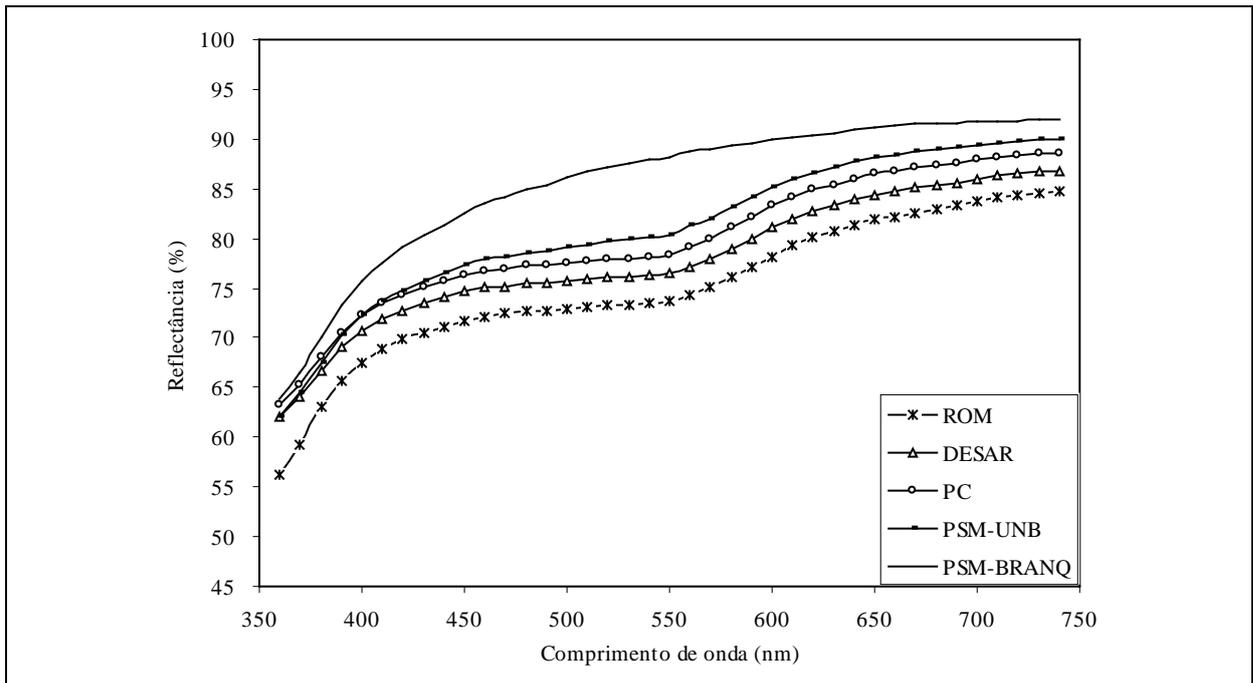


FIGURA 19: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LC-AM3.

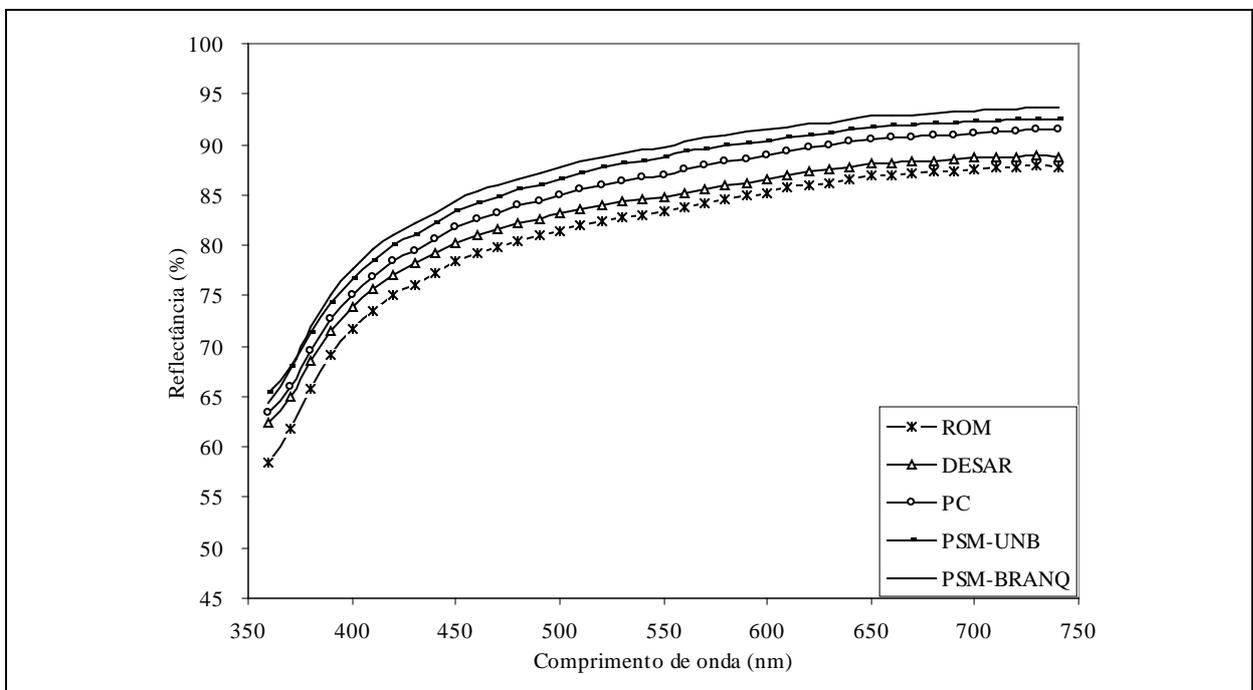


FIGURA 20: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LD-AM1.

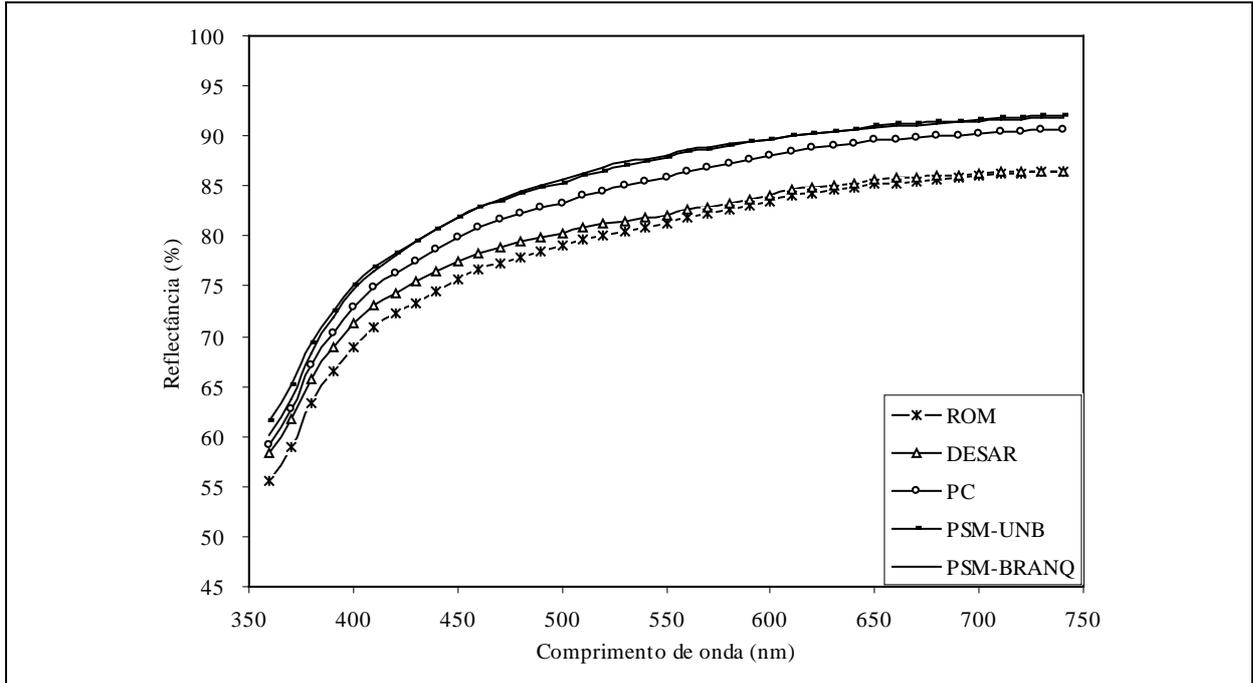


FIGURA 21: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LD-AM4.

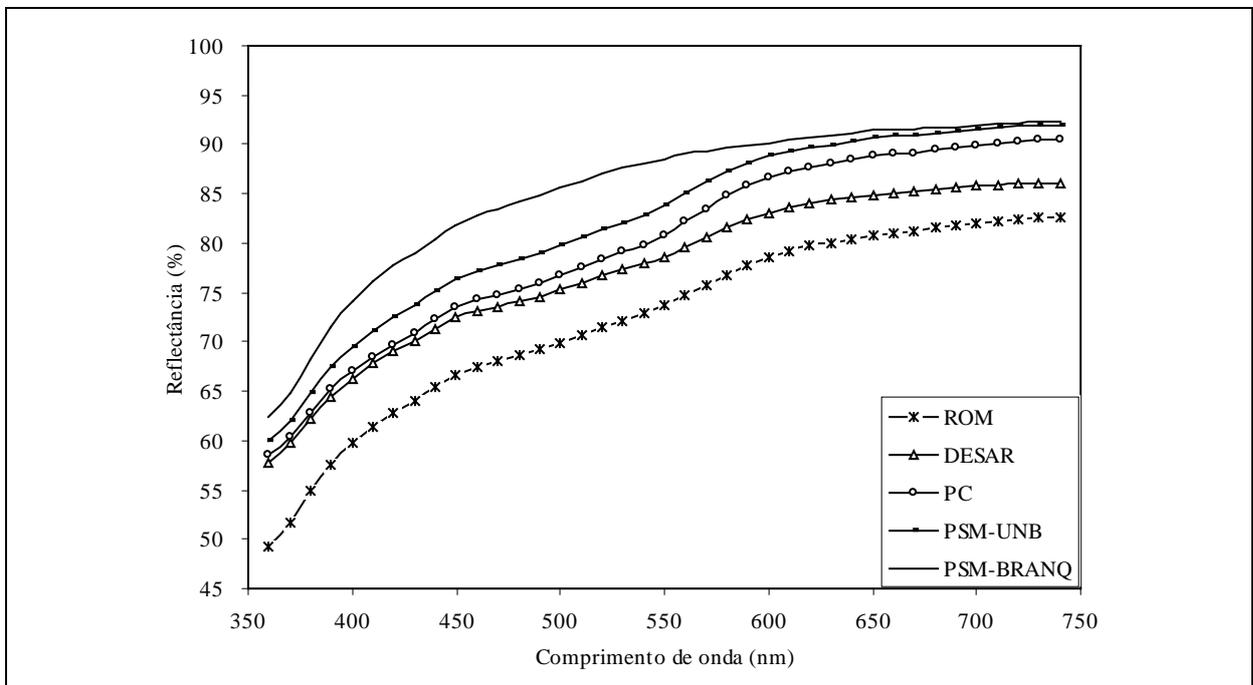


FIGURA 22: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LE-AM3.

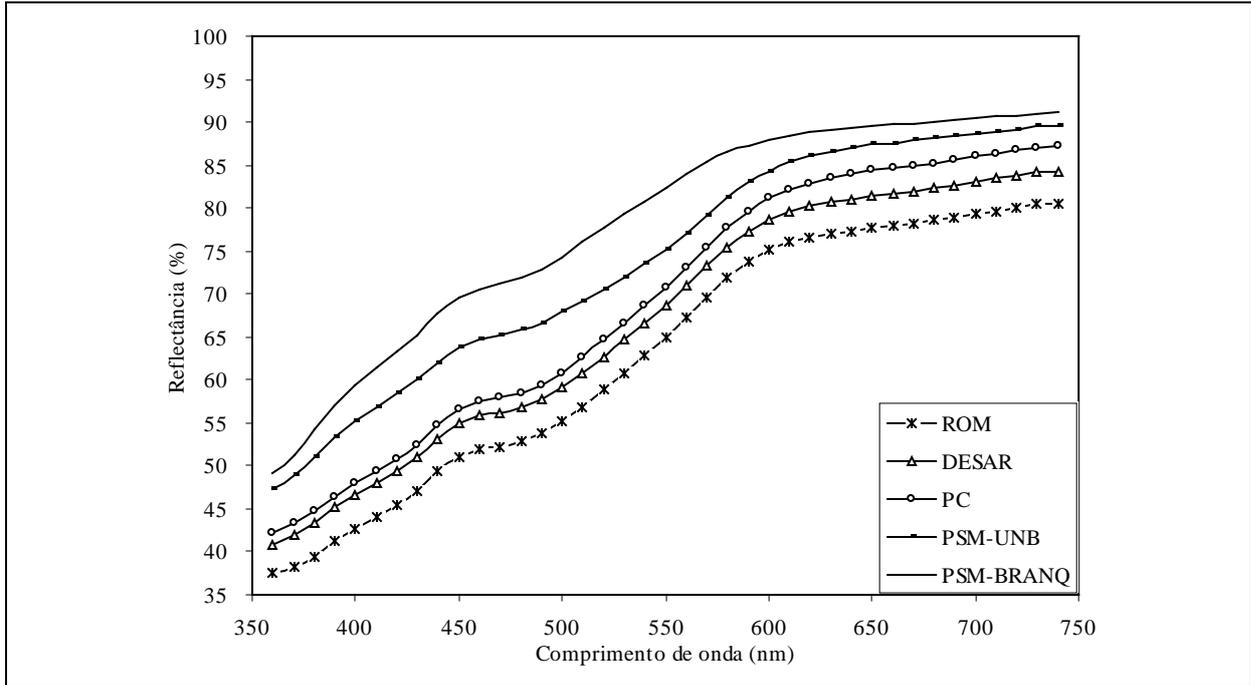


FIGURA 23: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LF-AM4.

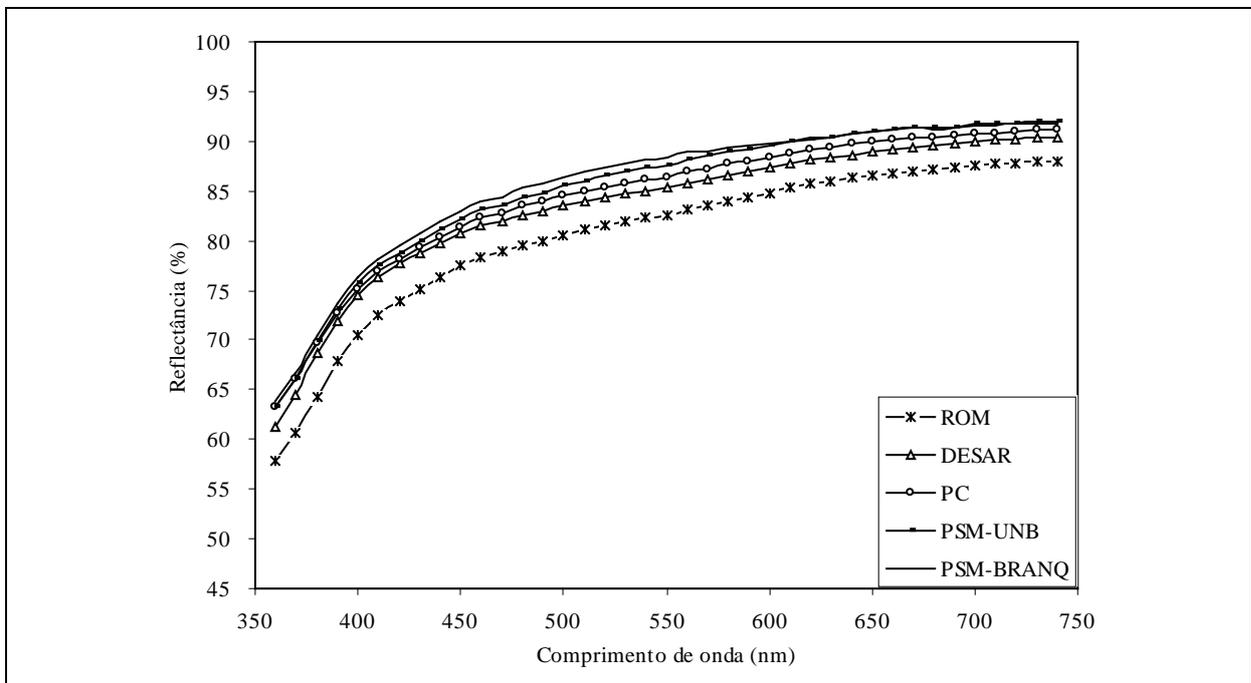


FIGURA 24: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LG-AM3.

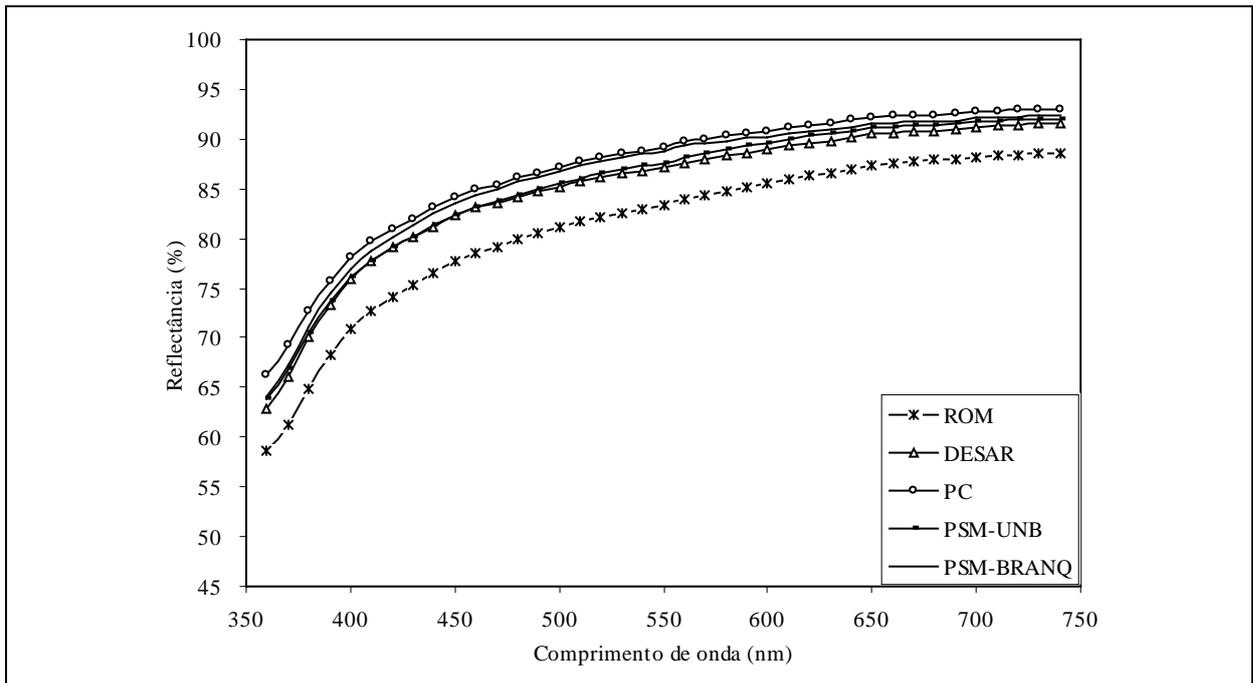


FIGURA 25: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LI-AM1.

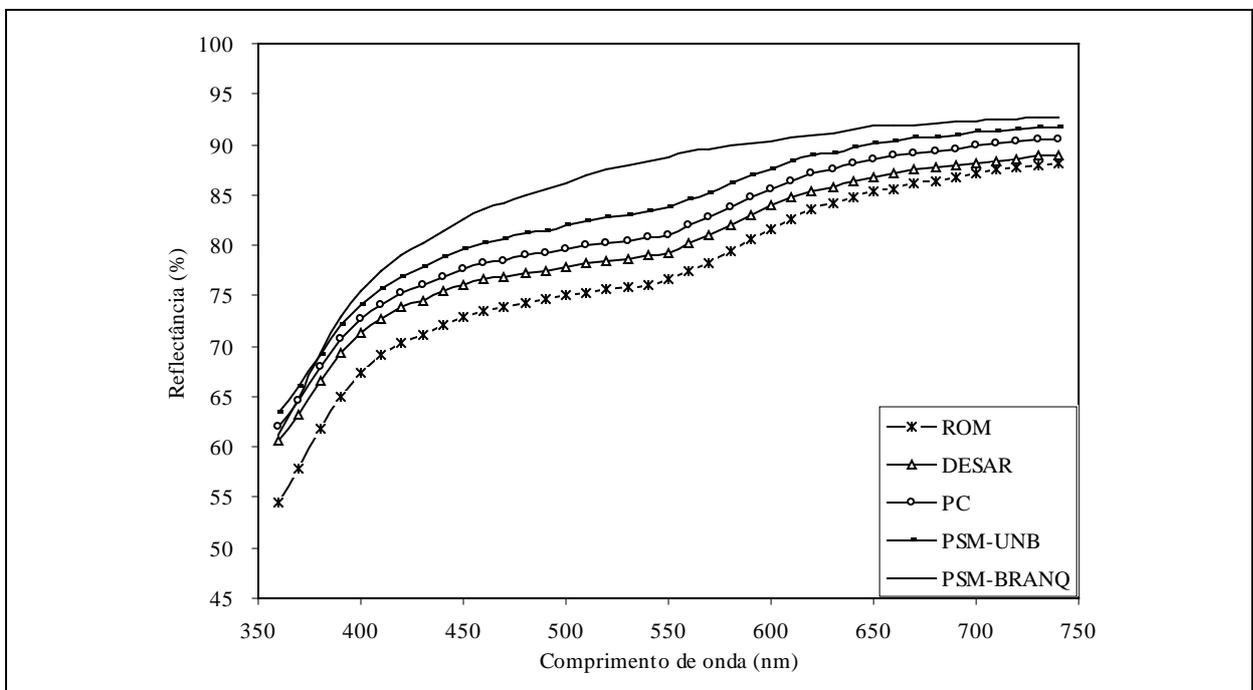


FIGURA 26: Espectros de reflectâncias do ROM e das etapas de beneficiamento da amostra LJ-AM3.

## 6 AVALIAÇÃO DE TIPOLOGIAS DE CAULINS POR COLORIMETRIA

A relação entre a cor do minério bruto e o seu aproveitamento econômico é fundamental para o profissional que atua na lavra e decide sobre o destino dos blocos minerados. Existem tipos litológicos que são facilmente identificados na jazida por meio da percepção visual, quer pela cor extremamente clara, indicando tipos econômicos, quer pela cor avermelhada, que indica tipos não econômicos. Entretanto, existem tipos de caulim que apresentam coloração intermediária, de intensidades variadas entre cinza claro, amarelo claro e creme que podem, ou não, ser enviados para o beneficiamento.

Durante o estágio realizado na empresa, observou-se que os técnicos operadores da lavra tinham dificuldades para definir, com segurança, o destino dos blocos que apresentavam as cores intermediárias. As dúvidas recaiam geralmente sobre as variedades de caulim do tipo III. Segundo os técnicos, alguns desses tipos atingem a alvura esperada no final do branqueamento e outros não.

Verificada a inexistência de alternativas que pudessem auxiliar os profissionais da lavra, pensou-se no desenvolvimento de uma “ferramenta” de apoio, com base técnica e mensurável por meio dos fenômenos interativos entre luz, cor e matéria. A avaliação espectro-colorimétrica das 44 amostras indicou diferentes formas de curvas espectrais nos diferentes tipos litológicos. Esse fato determinou a direção a ser seguida para o estabelecimento de possíveis relações entre a forma de espectro e o tipo litológico.

### 6.1 ESPECTROS DE REFLECTÂNCIAS DAS AMOSTRAS ROM

Os minerais de ferro e de titânio são os contaminantes que, presentes no caulim, influenciam na sua cor rósea/avermelhada. Esses minerais, dependendo de suas concentrações e das formas de ocorrência, influenciam na forma do espectro. Estudos com caulins nos estados bruto e branqueado, de diferentes ambientes de formação, relacionando derivada segunda de espectros com a presença de diferentes fases de ferro (hematita, goetita, magnetita, etc.), indicaram que o método de espectroscopia difusa é uma poderosa ferramenta para o estudo da evolução e da natureza dos óxidos de ferro no minério bruto (MALENGREAU, 1994). Segundo esse autor, o método possibilita a identificação de óxidos de ferro recobrando ou fazendo parte da

estrutura cristalina da caulinita. O método pode eventualmente ajudar na interpretação genética dos caulins.

A figura 27 mostra os espectros de reflectâncias, na faixa do visível, de alguns tipos de caulins não branqueados (A), a derivada segunda dos mesmos espectros (B) e a derivada segunda dos espectros de diversos minerais de ferro (C). As barras verticais indicam as bandas diagnósticas da absorção na faixa do visível, que identificam o(s) mineral(ais) presente(s) na amostra.

Aplicou-se essa metodologia em 3 amostras de tipos litológicos diferentes: LA-AM2, LE-AM3 e LJ-AM3. A figura 28 mostra os espectros de absorção de energia ( $A = \log(1/R) \rightarrow R = \text{reflectância}$ ) dos minérios brutos e a figura 29 mostra as respectivas derivadas segunda.

Na figura 29, verifica-se a forte absorção de energia nas bandas próximas a  $15.000$  e  $18.500 \text{ cm}^{-1}$ , que caracteriza a presença de hematita, nas 3 amostras. A amostra LJ-AM3 mostra absorções de energia nas bandas próximas a  $20.300$  e  $23.400 \text{ cm}^{-1}$ , diagnosticando presença de goetita. As amostras LA-AM2 e LE-AM3 mostram absorções de energia na banda próxima a  $24.000 \text{ cm}^{-1}$ , que tanto pode diagnosticar a presença de goetita ou de ferro substituindo o alumínio na estrutura da caulinita, de acordo com os espectros da figura 27 (C). Existem outras bandas de absorção nos espectros da figura 29 que são de difícil diagnóstico quando comparadas com as formas apresentadas na figura 27. Essa avaliação é superficial e não teve, nesse trabalho, outra sustentação técnica, além das referências citadas por MALENGREAU, (1994). O objetivo do comentário foi mostrar uma das aplicações possíveis com a análise dos espectros de reflectâncias.

A avaliação visual e conjunta dos 44 espectros de reflectâncias ROM indicou a possibilidade de separá-los em 6 grupos, de acordo com seus formatos. Convencionou-se denominá-los grupos A, B, C, D, E e F. As 44 amostras foram agrupadas conforme a semelhança entre o formato de seu espectro e o formato de um dos espectros dos grupos A a E. As formas agrupadas de espectros e as suas amostras correspondentes encontram-se nas figuras 30 a 35.

As amostras do grupo **A** caracterizam-se por um espectro sem inflexão (ou absorção) aparente nos comprimentos de onda na faixa do visível. Esse espectro tem um formato semelhante aos espectros das amostras PSM-BRANQ que correspondem ao caulim passado no separador magnético e branqueado (produto final).

O espectro do grupo **B** apresenta uma leve inflexão na faixa de 550 a 600 nm. No espectro do grupo **C** a inflexão é um pouco mais acentuada na mesma faixa. No espectro do grupo **D** a inflexão é bem acentuada naquela faixa.

Os espectros dos grupos **E** e **F** apresentam formatos diferentes dos grupos anteriores, onde se observa uma forte absorção da radiação incidente até a faixa próxima a 600 nm.

Nos grupos A, B, C e D observa-se que as amostras apresentam reflectâncias superiores a 50% na faixa inicial dos comprimentos de onda do visível (350 a 400 nm). Nos grupos E e F as amostras têm reflectâncias inferiores a 50%, na mesma faixa. As amostras desses últimos grupos correspondem ao minério não econômico, descartado durante a lavra, porque os teores de óxidos de ferro são muito elevados e, visualmente, caracterizam-se pela cor bem avermelhada.

## 6.2 A IMPORTÂNCIA DOS GRUPOS COLORIMÉTRICOS A, B, C, D

No quadro 35 mostra-se a identificação das 44 amostras segundo os tipos litológicos visuais da CADAM e os tipos litológicos colorimétricos do LAPROM. Nesse quadro, na coluna CADAM há uma mistura de tipos litológicos em relação à coluna LAPROM, que apresenta a seqüência de A a F. Comparando-se os espectros dos grupos A (figura 30) e D (figura 33), observa-se que seus formatos são diferentes. Isto é, as amostras classificadas como sendo do grupo A certamente apresentam diferenças em relação as do grupo D, identificadas pela absorção da luz na faixa do visível, muito mais intensa nas amostras do grupo D.

Essas diferenças não são identificadas na percepção visual. Na coluna CADAM do quadro 35 há tipos III e IIIb nos dois grupos A e D da coluna LAPROM.

Os grupos E e F (figuras 34 e 35) contêm amostras cujos espectros apresentam formas completamente distintas das demais, caracterizadas por fortes absorções da luz na faixa do visível. Essas amostras apresentaram elevados teores de óxidos de ferro nas análises químicas. Visualmente, correspondem a tipos de caulim de cores avermelhadas, representando minério não econômico e classificados como sendo do tipo IV, na CADAM.

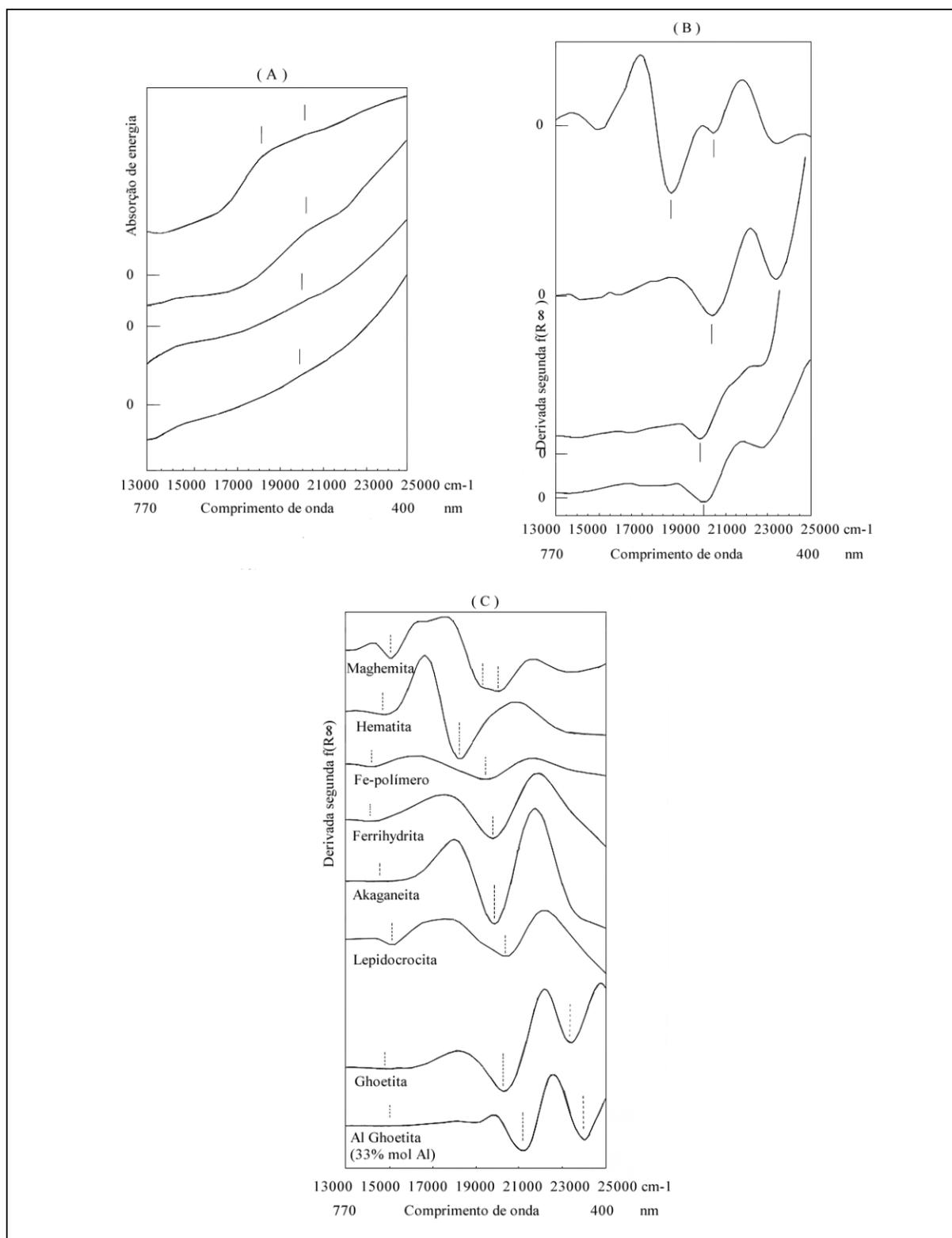


FIGURA 27: Espectros de reflectâncias, na faixa do visível, de alguns tipos de caulins não branqueados (A); derivada segunda dos espectros anteriores (B); derivada segunda dos espectros de diversos minerais de ferro (C).

Fonte: MALENGREAU (1994), modificada.

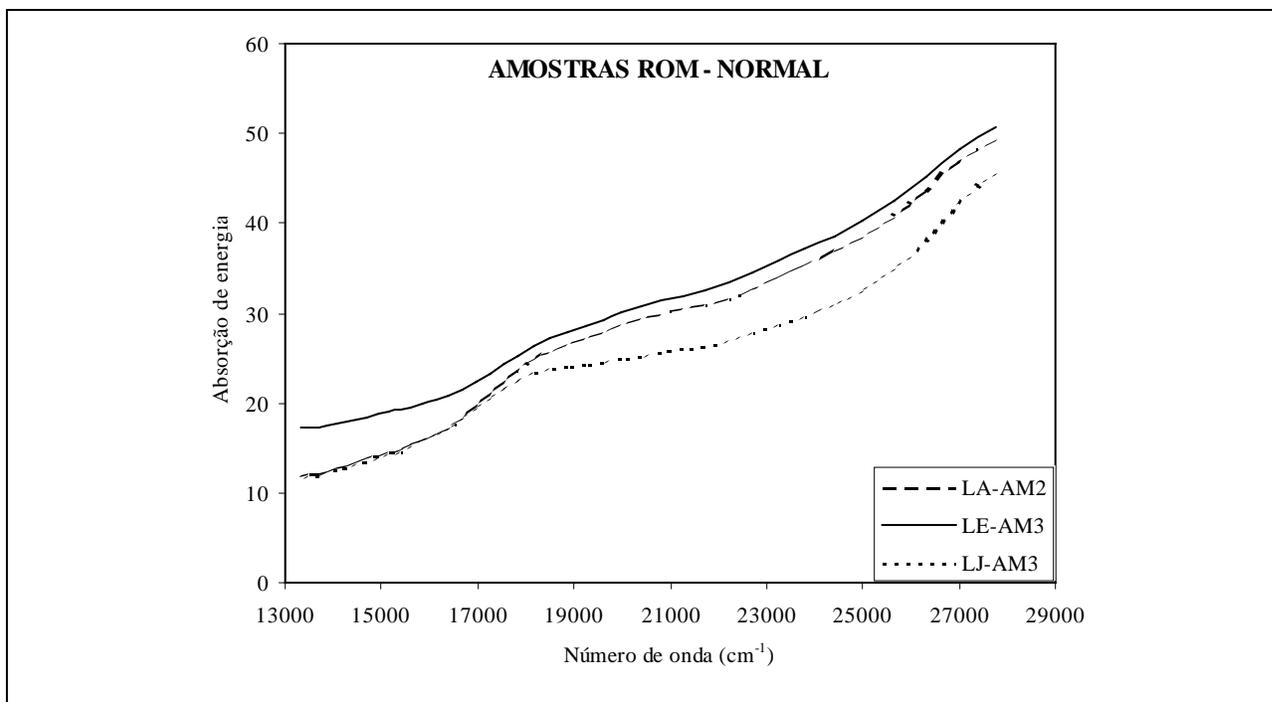


FIGURA 28: Espectro de absorbância (absorção de luz) de 3 amostras ROM.

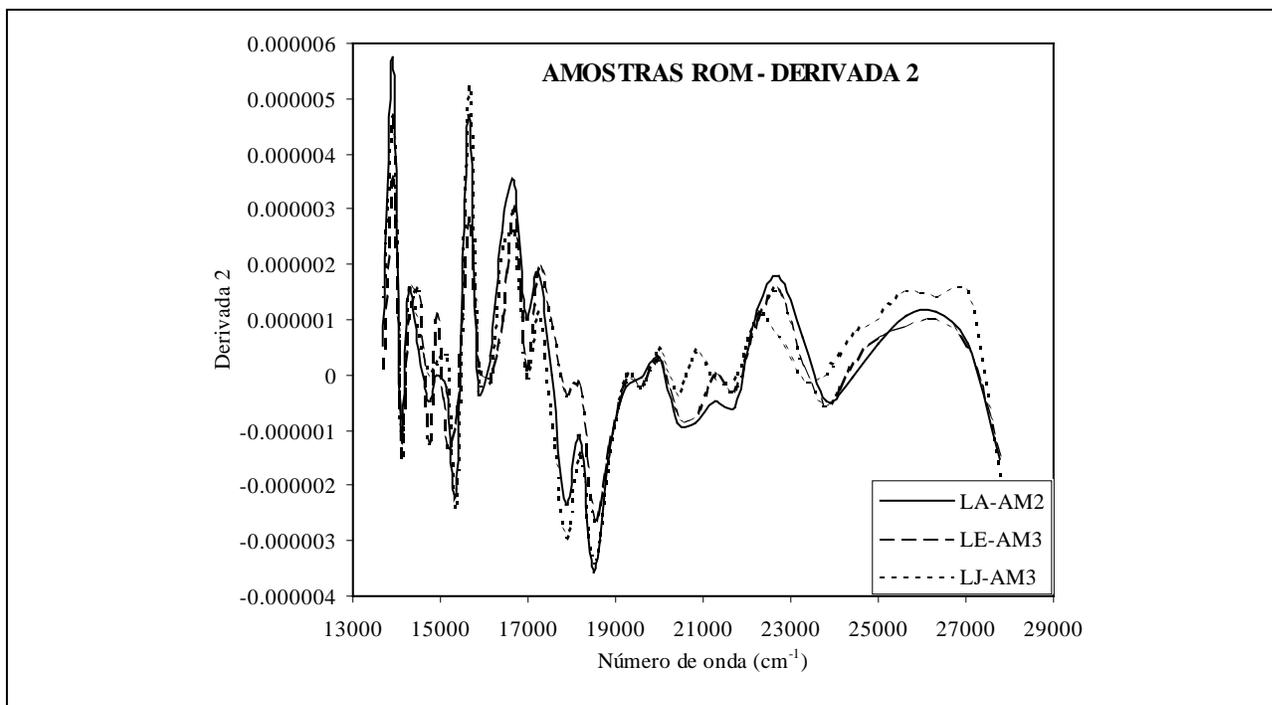


FIGURA 29: Derivada segunda dos espectros das 3 amostras ROM, mostrados na figura 28.

QUADRO 35: Identificações litológicas visuais (CADAM) e colorimétricas (LAPROM) das 44 amostras ROM coletadas na jazida Morro do Felipe.

AMOSTRA	CADAM	LAPROM
LD-AM1 LE-AM1 LE-AM2 LE-AM4 LG-AM4 LH-AM5 LI-AM1	II / III IIIb IIIg III / V III / IIIa IIIb III	A
LA-AM3 LC-AM1 LC-AM2 LD-AM2 LD-AM3 LD-AM4 LE-AM3 LG-AM3	III II III III / IIIb IIIb IIIb / V V III	B
LA-AM4 LB-AM1 LB-AM3 LF-AM3 LG-AM1 LH-AM1 LH-AM4 LJ-AM1 LJ-AM2	IIIb III III IIIb IIIb IIIb IV IIIb / IV III	C
LA-AM1 LA-AM2 LB-AM2 LB-AM4 LC-AM3 LC-AM4 LG-AM2 LG-AM5 LJ-AM3 LJ-AM4 LJ-AM5	0 / I 0 III III IIIb IIIb IIIb IIIb IIIb IIIb IIIb	D
LF-AM1 LF-AM2 LF-AM4 LF-AM5 LH-AM2 LI-AM2 LI-AM3	IV IV IV IV IV IV IV	E
LH-AM3 LI-AM4	III / IV IV	F

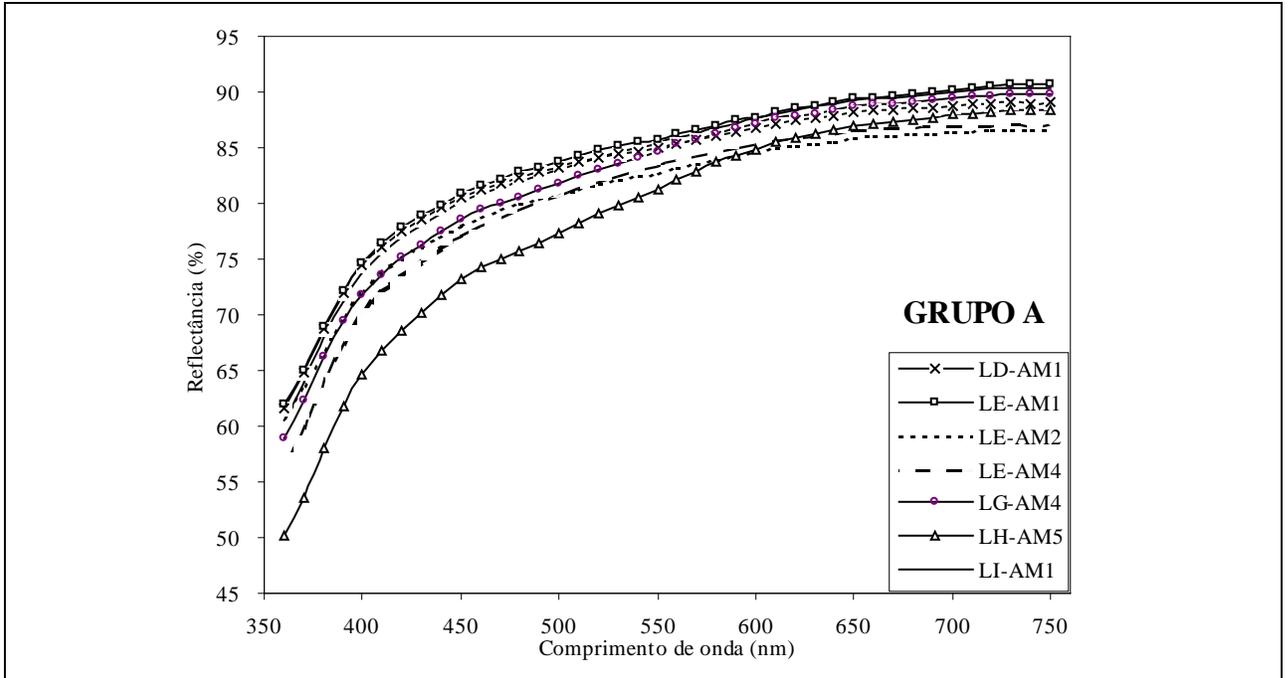


FIGURA 30: Espectros de refletâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo A.

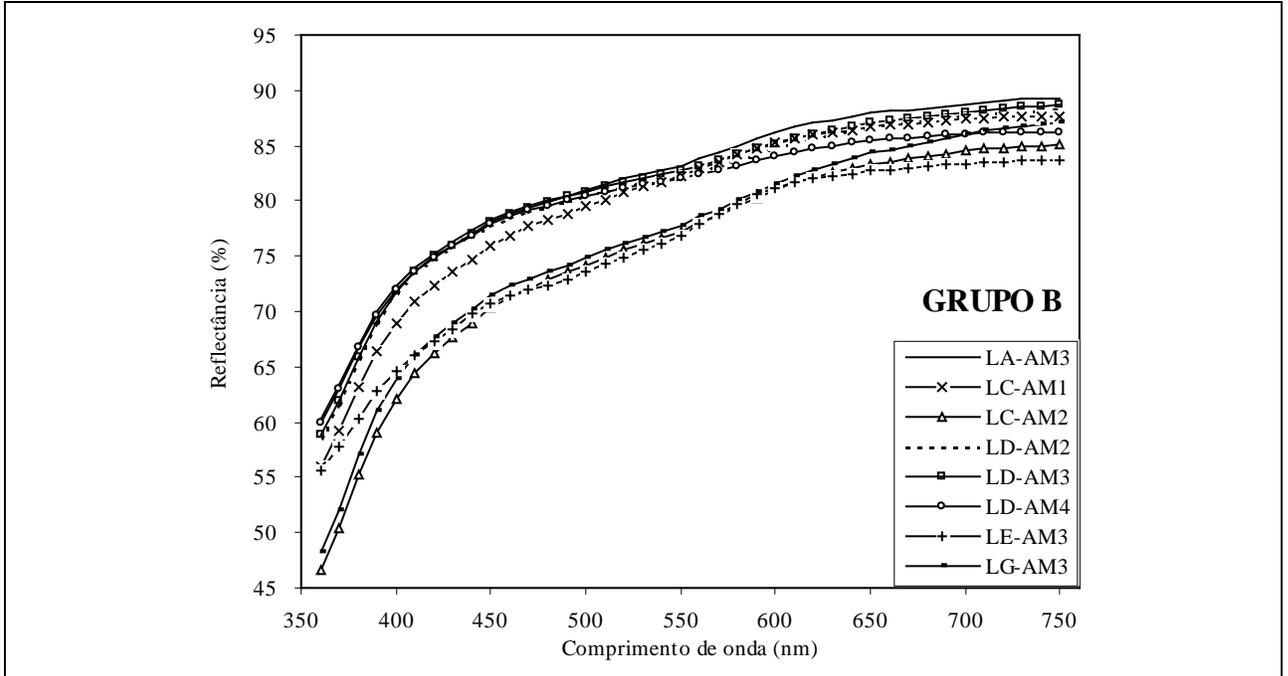


FIGURA 31: Espectros de refletâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo B.

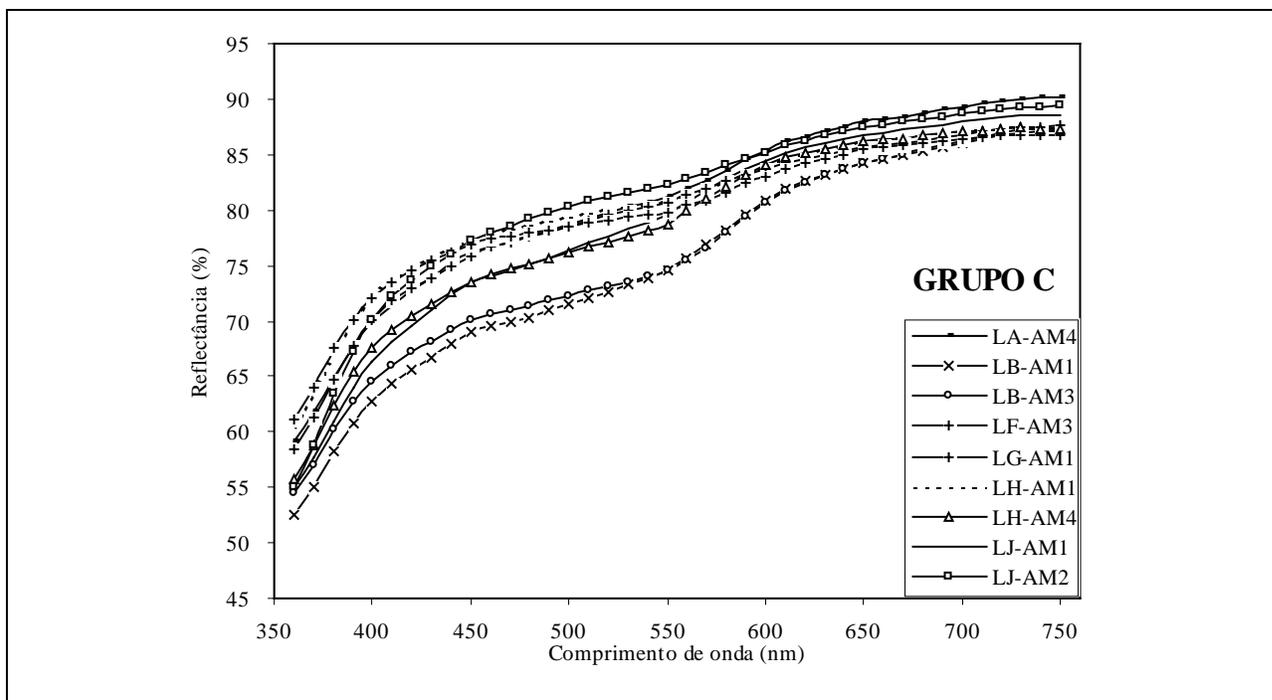


FIGURA 32: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo C.

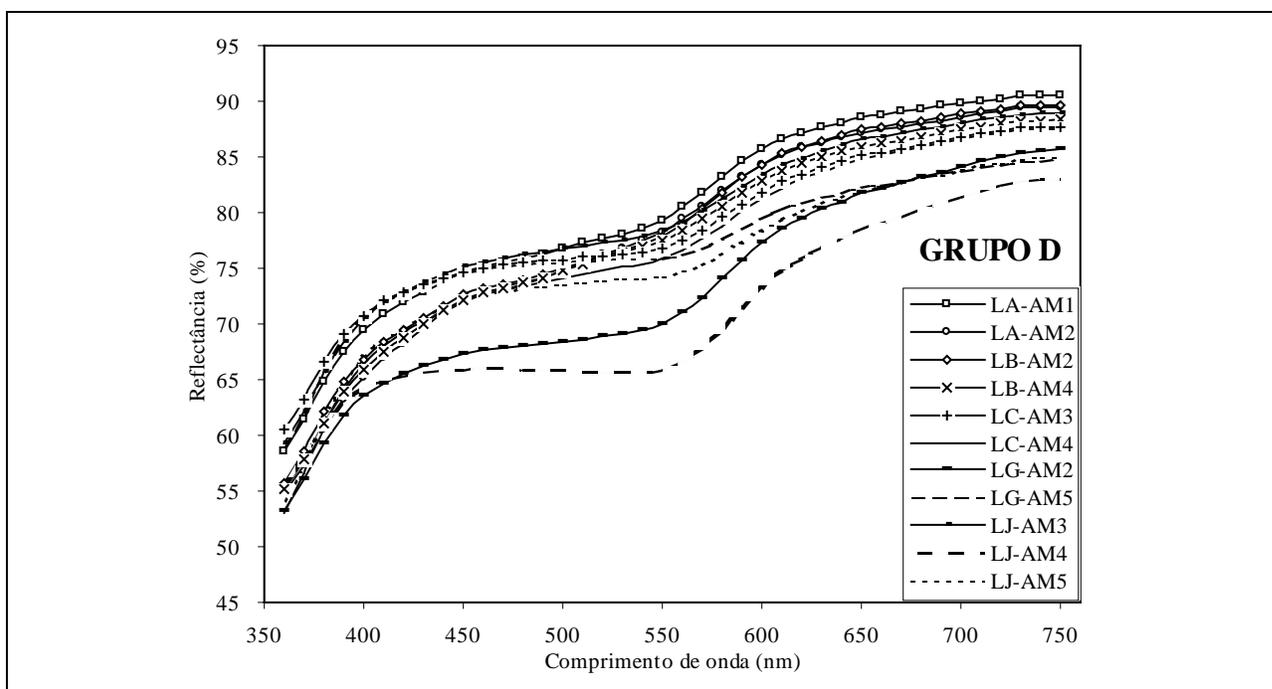


FIGURA 33: Espectros de reflectâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo D.

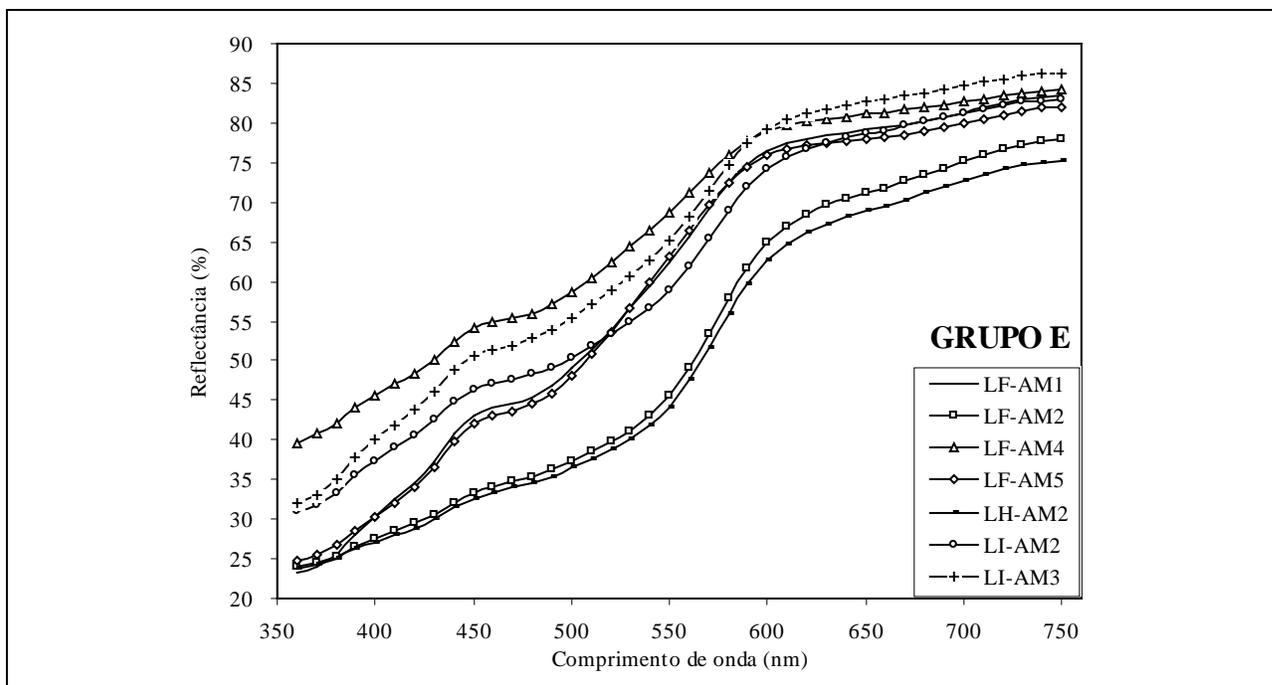


FIGURA 34: Espectros de refletâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo E.

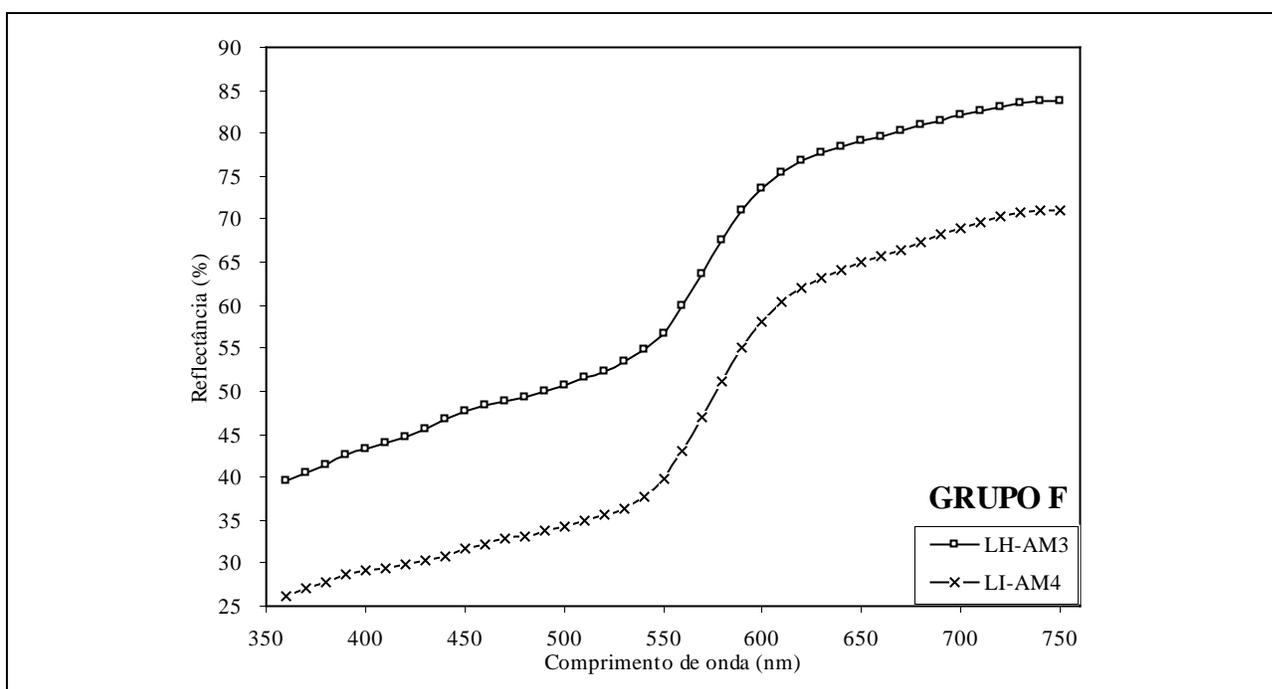


FIGURA 35: Espectros de refletâncias de amostras ROM classificadas como tipos litológicos do Grupo F.

Voltando ao quadro 35, verifica-se, ainda, que a amostra LH-AM4 corresponde ao tipo IV não beneficiado da CADAM, mas tem o espectro identificado como pertencente ao grupo C, do LAPROM, onde os tipos apresentam espectros com possibilidades de aproveitamento econômico.

Esses exemplos mostram o grau de dificuldade para a identificação de minério por meio da observação de suas cores, mesmo tendo as outras características (texturais e mineralógicas) como auxiliares.

Um aspecto que parece fundamental é a identificação das causas determinantes dos formatos das curvas. A forma do espectro é a resposta colorimétrica que indica as características mineralógicas e texturais do minério. Acredita-se que a determinação dessas características poderia ser útil para evitar o beneficiamento de tipos litológicos indesejáveis.

Outra questão certamente importante é o estabelecimento de uma relação entre a forma do espectro ROM e a alvura do produto final, branqueado. Isto é, a definição de um procedimento onde seja possível “prever” o ganho de alvura do minério ROM, por meio da forma do seu espectro de reflectância. Esse estudo está sendo desenvolvido pela equipe do LAPROM e será comentado no item 7, adiante.

Também considera-se importante uma avaliação com blendagens entre os tipos colorimétricos, para a identificação de misturas indesejáveis no beneficiamento. A jazida é lavrada em bancadas e os tipos de caulins estão distribuídos de forma irregular. A coleta das 44 amostras na bancada B 10 mostrou bem essa questão. As pilhas do minério, próximas à estação de dispersão, são mistura de vários tipos de caulins. Poder-se-ia evitar tipos indesejáveis com uma rápida avaliação espectral da bancada, antes da lavra.

O tempo e os recursos disponíveis no LAPROM não permitiram que as questões acima colocadas pudessem ser investigadas com mais aprofundamento, na fase prevista para essa dissertação de mestrado. Até onde foi possível, verificou-se que o teor de óxidos de ferro no ROM não seria a alternativa ideal, porque em todos os grupos colorimétricos a concentração tem variação homogênea:

Grupo A: 1,7% a 2,2% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

Grupo B: 1,8% a 2,1% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

Grupo C: 1,8% a 2,4% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;

Grupo D: 1,8% a 2,3% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

A concentração de  $\text{TiO}_2$  nas 44 amostras varia numa amplitude menor (1,1% a 2,2%) e, também, homogeneamente.

As concentrações de óxidos de ferro e de titânio nas amostras PSM-BRANQ também não indicaram alternativas para a explicação do fenômeno. O quadro 19 mostra os valores desses óxidos. Verifica-se haver variações pouco significativas após as sucessivas etapas do beneficiamento, exceto nas amostras que contêm altas concentrações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no ROM, como a LF-AM4.

É possível que a eliminação do ferro, em cada etapa, possa ser em quantidades pequenas e que estejam na faixa do erro analítico do método utilizado, fluorescência de raios-x.

A falta de um indício seguro para demonstrar a relação entre os teores dos óxidos de Fe e de Ti nos tipos A a D e a forma de seus espectros de reflectâncias, não descarta a hipótese de que essa relação exista. Os óxidos possuem coloração avermelhada. Misturados com a cor branca das caulinitas, o minério apresenta uma coloração que varia entre o amarelo, o laranja e o vermelho.

HERBILLION *et al.* (1976), MESTDAGH *et al.* (1980) e MALENGREAU (1994), consideram relevantes as relações entre a forma do espectro, a evolução do ferro no caulim e a sua identificação como fases isoladas ou como parte integrante da estrutura da caulinita.

A classificação de amostras em grupos colorimétricos, de acordo com a forma de seus espectros de reflectâncias, nesse estudo, foi uma etapa inicial. A maior parte do tempo foi aplicado na otimização das técnicas que permitiram definir os grupos. A sistemática é interessante mas ainda é incipiente e, certamente, deverá ser melhorada. Fica evidente que há tipos distintos de caulins, com características marcantes, mas não perceptíveis a olho nu.

Nesse trabalho, pode-se, a princípio, dividir o minério de caulim em dois macrogrupos: um, constituindo os tipos de A a D, correspondente ao minério aproveitável; outro, constituindo os tipos E e F, não aproveitável. Entretanto, um estudo mais aprofundado poderá determinar novos agrupamentos, aglutinando ou distribuindo melhor os tipos sugeridos nesse estudo.

O universo de amostras, restrito a um nível topográfico da jazida (bancada B10), pode ou não ter sido representativo do depósito mineral na sua distribuição espacial. Por essa razão, considera-se prudente ampliar a área de estudo para níveis topográficos diferentes da jazida, verificando se existem relações semelhantes aos resultados mostrados nesse estudo.

## **7 RELAÇÕES MATEMÁTICAS ENTRE ESPECTRO DE REFLECTÂNCIA, ALVURA ROM E ALVURA DO PRODUTO FINAL**

Verificado a importância da classificação colorimétrica para as amostras, seria fundamental que os espectros pudessem ser avaliados e identificados por parâmetros matemáticos consistentes e eficazes, que evitassem a interpretação visual. Não faria sentido propor uma alternativa igualmente baseada nessa condição. O enquadramento de um espectro de reflectância em um dos grupos colorimétricos propostos, por meio da identificação visual, poderia ser diferente para diferentes pessoas que avaliassem o espectro. As amostras beneficiadas foram o ponto de partida para esse novo estudo em desenvolvimento pela equipe do LAPROM. O objetivo é o estabelecimento de uma relação matemática que, identificando o formato do espectro de reflectância de uma amostra ROM, possa “prever” sua alvura final.

Nesse novo estudo, os parâmetros colorimétricos estão sendo tratados com recursos computacionais e matemáticos. Através deles, o formato dos espectros de reflectâncias serão previamente identificados. Posteriormente, interpoladores matemáticos permitirão a avaliação do produto final.

O universo de amostras beneficiadas foi pequeno, mas suficiente para essa fase inicial do estudo. A equipe já está trabalhando as amostras de sondagens remetidas pela CADAM e um exemplo do trabalho que está em desenvolvimento será apresentado a seguir. Ressalta-se, entretanto, que esse tema não será abordado com detalhes nessa dissertação, por se tratar de um trabalho paralelo, sem a participação desse autor. Por se tratar de um estudo que segue o tema desenvolvido nessa dissertação, a intenção é abordá-lo em caráter informativo.

A identificação dos espectros de reflectâncias é implementada por meio de um *software* desenvolvido especificamente para essa fase.

Quanto aos interpoladores matemáticos, inicialmente foi trabalhado o modelo linear para a correlação entre as reflectâncias de 10 amostras ROM e as de seus produtos finais, branqueados. Essas amostras são as mesmas que foram tratadas na CADAM, durante o estágio. Das 11 amostras tratadas, uma foi desconsiderada (LF-AM4) por se tratar de um tipo de minério não econômico.

A correlação foi avaliada em toda a faixa de comprimentos de onda do visível, em intervalos de 10 nm. A figura 36 mostra o comportamento do coeficiente de correlação obtido com as 10 amostras. A figura 37 mostra a correlação entre a alvura ROM e o ganho de alvura após beneficiamento das 10 amostras, em um específico comprimento de onda (450 nm). A figura 36 indica que a correlação foi muito boa na faixa de comprimentos de onda entre 500 e 600 nm, mas nas faixas extremas as performances não foram semelhantes à faixa central.

O passo seguinte foi a aplicação de um interpolador polinomial de terceiro grau, que apresentou melhor correlação em relação ao linear. A figura 38 mostra o comportamento obtido com as 10 amostras, na faixa do visível.

Tendo como base a aplicação dos conceitos de redes neurais, foi introduzido um terceiro interpolador matemático, com resultados ainda mais satisfatórios que o polinomial.

Um quarto interpolador, também baseado na aplicação de redes neurais e considerando os diâmetros  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$  das 10 amostras beneficiadas, apresentou melhor correlação que o terceiro interpolador.

A aplicação dos métodos desenvolvidos com os interpoladores matemáticos indicou resultados animadores quando se trabalhou apenas com os espectros ROM das 10 amostras. Os valores dos espectros de reflectâncias ROM foram introduzidos via *software*. Após o processamento computacional dos dados, o programa calculou a alvura final prevista para cada amostra. Os resultados estão demonstrados nas figuras 39 a 42. Nessas figuras, o eixo X corresponde a alvura final medida após os processos de beneficiamento. O eixo Y corresponde a alvura final prevista após introdução e processamento dos dados das reflectâncias do produto ROM, das mesmas amostras.

A figura 39 mostra os resultados com a utilização do interpolador linear. Observa-se que a correlação linear foi pouco satisfatória.

A figura 40 mostra os resultados com o uso do interpolador polinomial. As correlações são melhores que a linear, mas ainda não são satisfatórias.

Na figura 41 estão os resultados com o interpolador rede neural, sem considerar os diâmetros das partículas. O valor 0,9766 para  $R^2$  (correlação) é satisfatório e demonstra a eficácia do método.

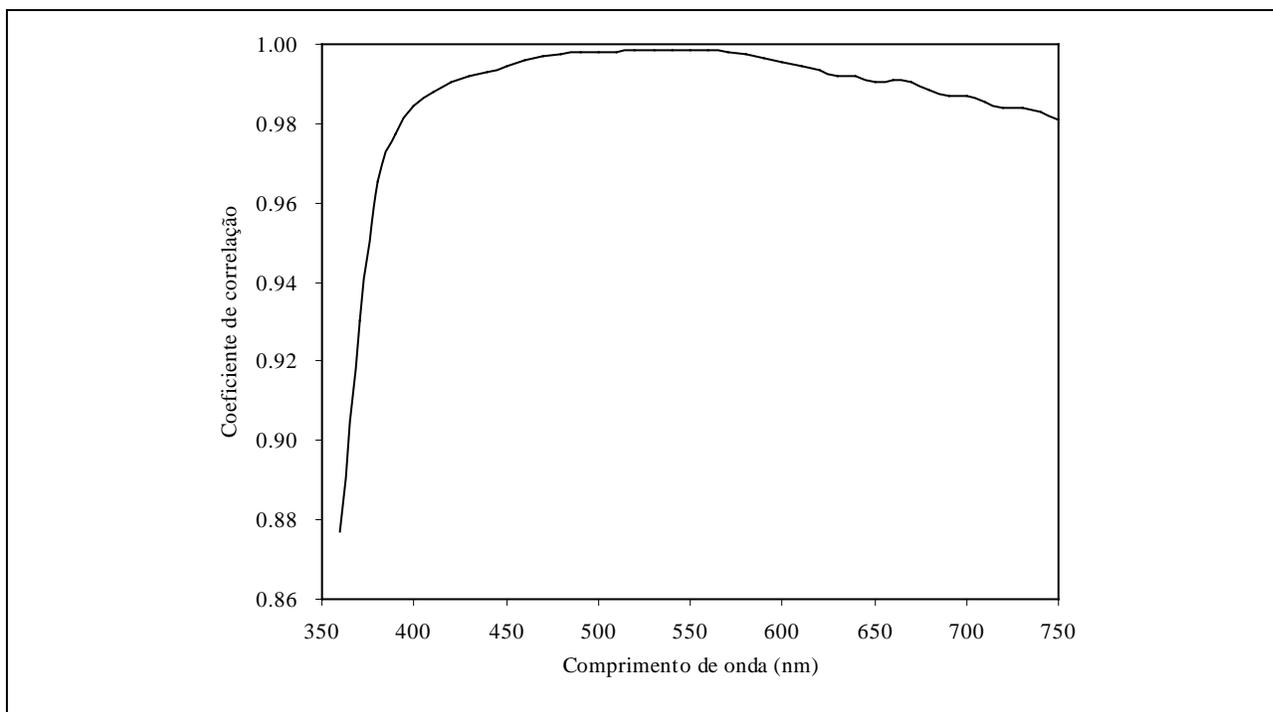


FIGURA 36: Curva de correlação entre as alvuras do ROM e dos produtos finais de 10 amostras, na faixa de comprimento de onda do visível.

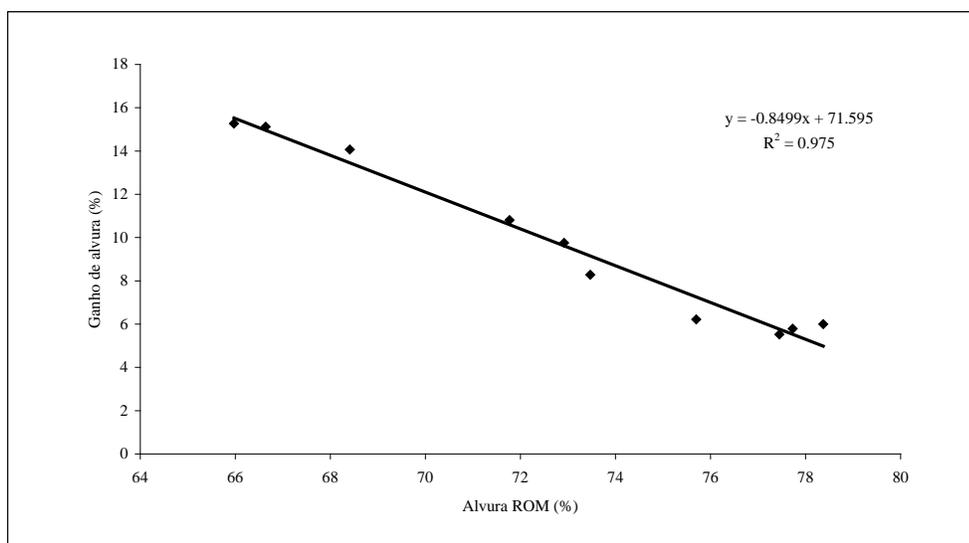


FIGURA 37: Correlação entre as alvuras ROM de 10 amostras e os correspondentes ganhos de alvura após beneficiamento, no comprimento de onda 450 nm.

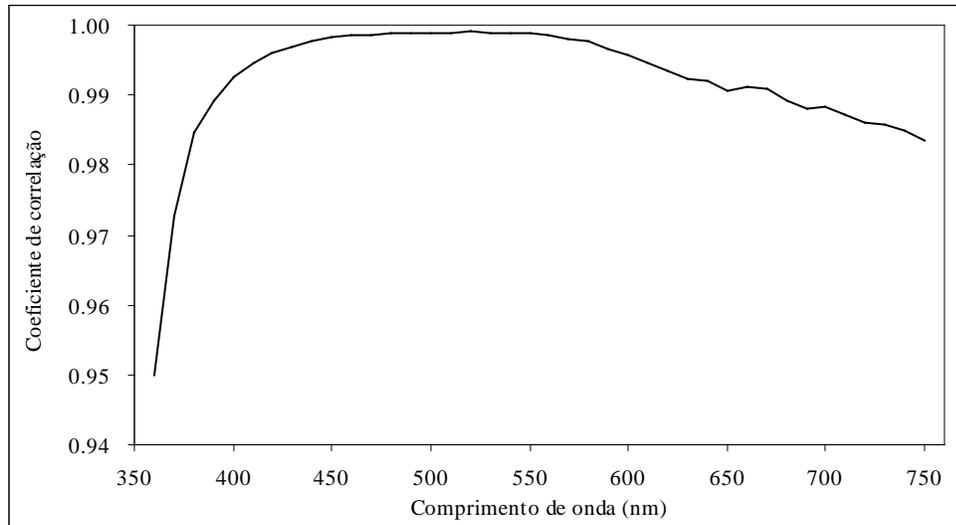


FIGURA 38: Coeficiente de correlação polinomial de 3º grau entre as alvuras ROM e produtos finais de 10 amostras, na faixa de comprimentos de onda do visível.

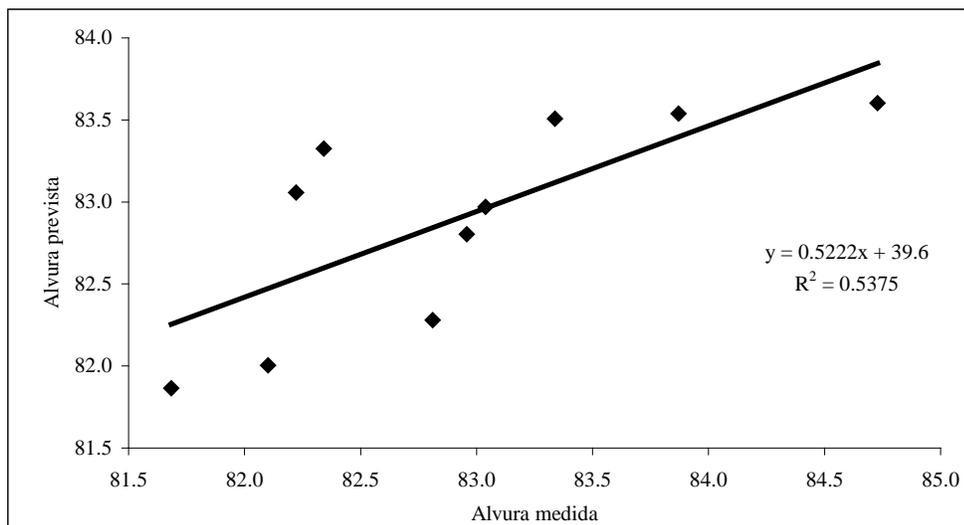


FIGURA 39: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador linear.

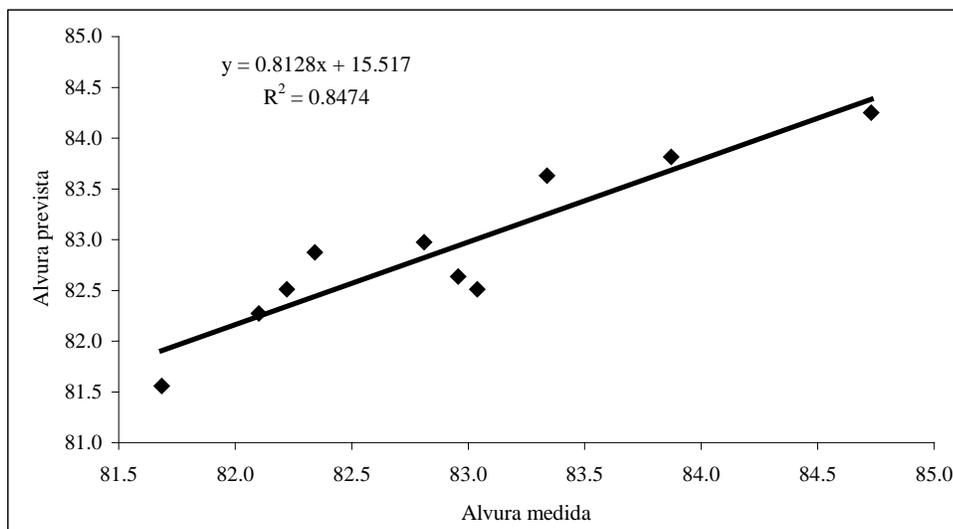


FIGURA 40: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador polinomial.

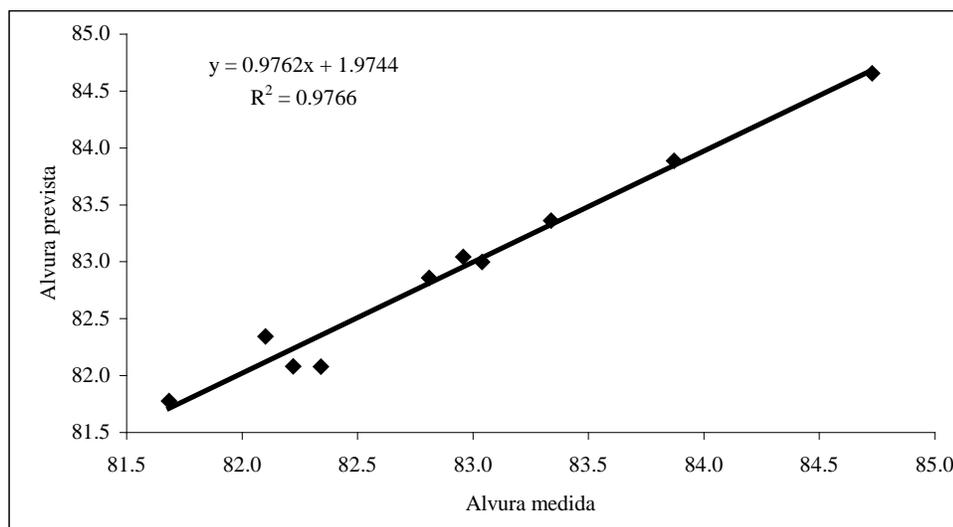


FIGURA 41: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador redes neurais.

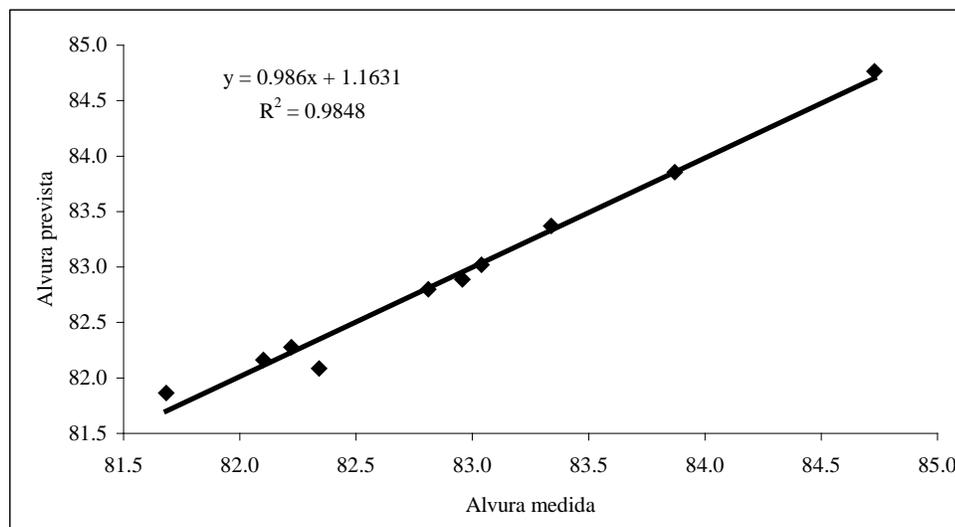


FIGURA 42: Correlação entre alvura medida e alvura prevista, com a utilização do interpolador redes neurais e diâmetros  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{90}$ .

Os resultados da figura 42 mostram que o interpolador neural com avaliação dos diâmetros das partículas, apresenta a melhor correlação entre os 4 interpoladores, com  $R^2$  de 0,9848.

Os gráficos apresentados nas figuras 43 e 44 oferecem uma boa ilustração sobre a “previsão” de alvura com o auxílio dos 4 interpoladores matemáticos. Correspondem a duas das amostras beneficiadas: LA-AM2 e LC-AM1. A identificação PSM-BRANQ corresponde a alíquota produto da separação magnética branqueado. A alvura da alíquota foi medida no espectro-colorímetro. A alvura dos demais itens foi “prevista” por meio dos interpoladores.

Conforme observado nesse item, parece promissor o estudo relacionando os espectros de reflectâncias do minério ROM com a “previsão” de sua alvura final, por meio dos interpoladores matemáticos. O universo de amostras foi reduzido mas houve coerência nos resultados.

O LAPROM está desenvolvendo estudos semelhantes nas amostras de sondagens que a CADAM realiza no Morro do Felipe. Com esse novo universo de amostras, certamente os estudos com os interpoladores terão maior consistência e maior confiabilidade.

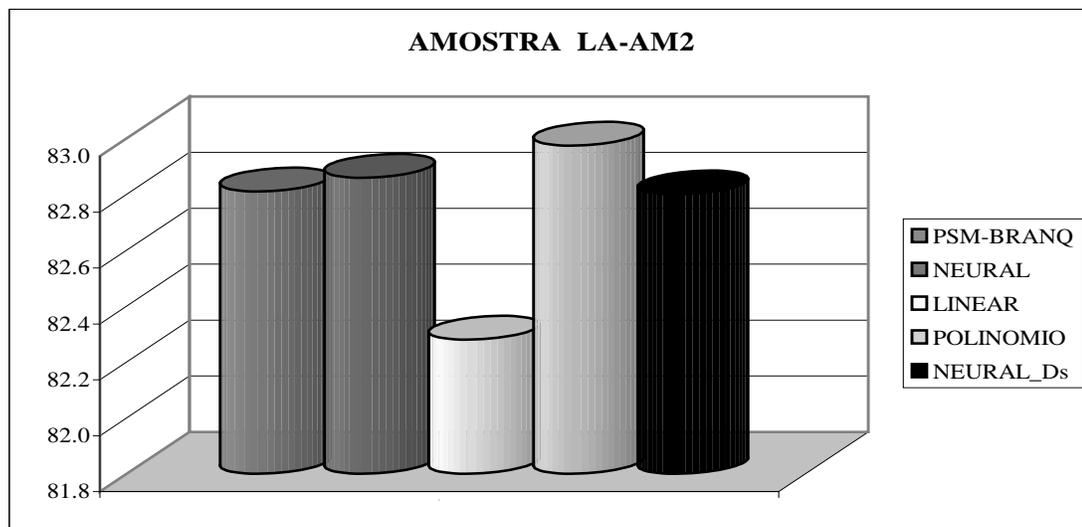


FIGURA 43: Ilustração das alvuras obtidas na amostra LA-AM2, medida no beneficiamento (PSM-BRANQ) e previstas com os interpoladores matemáticos.

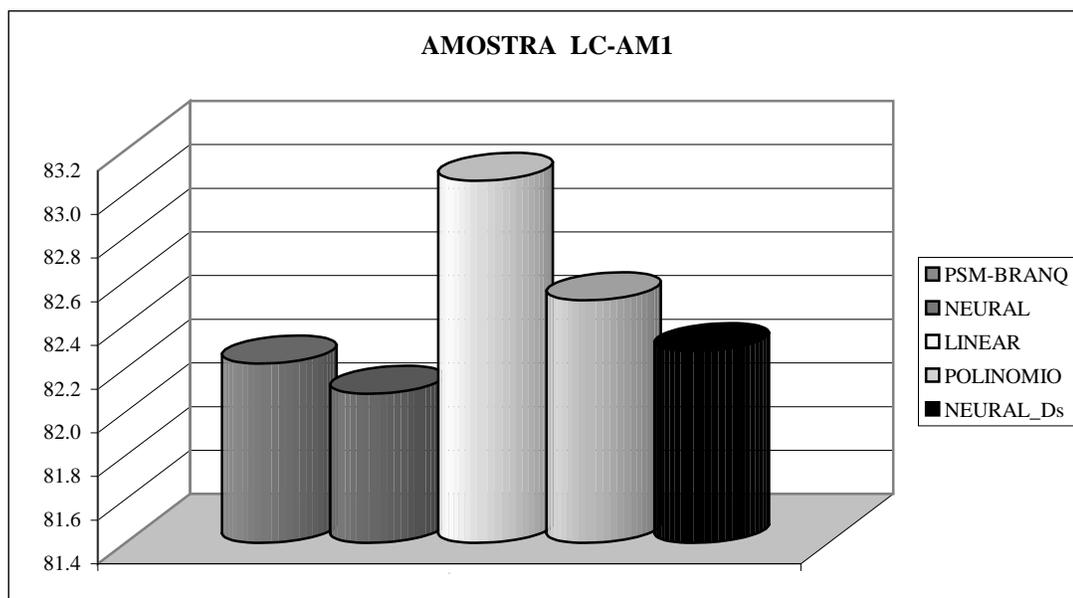


FIGURA 44: Ilustração das alvuras obtidas na amostra LC-AM1, medida no beneficiamento (PSM-BRANQ) e previstas com os interpoladores matemáticos.

## 8 CONCLUSÕES

8.1 - Para a caracterização do minério da jazida Morro do Felipe, com base nos aspectos colorimétricos dos tipos litológicos, era necessário, antes do estudo, uma etapa com testes diversos para se obter um conhecimento detalhado sobre o caulim. Por esta razão, conclui-se que seriam importantes testes com dispersões físicas, confecção de pastilhas e ensaios com os equipamentos para obtenção de resultados confiáveis.

8.2 - Os testes com pulverização de amostras ROM indicaram que a melhor opção seria com o equipamento *mixer mill*, porque foi o que melhor preservou a granulometria original do minério. Desejava-se preservar o quartzo da fração grossa ( $> 44 \mu\text{m}$ ), porque o mineral seria analisado de forma a se conhecer os efeitos de sua presença nos espectros de reflectâncias do ROM.

8.3 - A avaliação colorimétrica do minério em espectro-colorímetro é feita em pastilhas, confeccionadas do material pulverizado e prensado. Os procedimentos de preparação de pastilhas, com os dispositivos indicados na norma TAPPI T 534, foram eficazes. As pastilhas apresentaram superfícies regulares e os resultados foram homogêneos quando variou-se as áreas de leitura na pastilha.

8.4 - Os testes com dispersão mecânica do caulim ROM foram implementados com diversos equipamentos, variando-se, também, outros parâmetros operacionais. Os melhores resultados foram obtidos com:

- equipamento: liquidificador comercial;
- tipo de água: comum;
- concentração de sólidos na polpa: 40%;
- volume de solução dispersante: 32 ml;
- tempo de agitação: 10 minutos.

Com esses parâmetros, o material retido na peneira +44  $\mu\text{m}$ , após dispersão, era composto, essencialmente, por quartzo e agregados de minerais de ferro/titânio.

8.5 - A realização de testes com dispersão manual foi implementada para a obtenção de quartzo livre, que seria estudado posteriormente. Esperava-se que a quantidade desse mineral fosse elevada no rejeito do processo de desareamento. Entretanto, os testes indicaram que a quantidade do mineral na fração grossa ficou abaixo de 1% na maioria das amostras, inviabilizando o estudo inicialmente pretendido. Os resultados também serviram para comparar a eficácia entre os processos de dispersão mecânica e manual.

8.6 - Os resultados dos testes com dispersões mecânica e manual comprovaram que o rejeito do processo de desareamento é composto, basicamente, por caulinita não dispersa. A operação industrial, neste processo, gera cerca de 8% a 15% de rejeito, indicando que a dispersão do minério ROM não está otimizada.

8.7 - O quartzo liberado do minério ROM, observado em lupa binocular, mostra-se intensamente fraturado. Essa característica faz com que a ação mecânica da dispersão provoque alterações na granulometria original do minério. Avaliações granulométricas no quartzo grosso e no material *underflow* do desareamento, ambos obtidos nos processos de dispersão manual e mecânico, indicaram alterações significativas no diâmetro  $D_{50}$  do quartzo grosso e no diâmetro  $D_{90}$  do *underflow* do desareado. O quartzo grosso do processo manual apresentou um valor de 224  $\mu\text{m}$  para  $D_{50}$ . No processo mecânico, o valor foi de 158  $\mu\text{m}$  para o mesmo material. Ou seja, uma redução de 29,5% do tamanho original. No segundo material, a parte mais grossa da fração (-44  $\mu\text{m}$  +0,5  $\mu\text{m}$ ) é, basicamente, quartzo. O valor  $D_{90}$  para este segundo material, gerado na dispersão manual, foi de 9,83  $\mu\text{m}$ . Na dispersão mecânica, o valor baixou para 3,78  $\mu\text{m}$ , indicando uma redução de 61,5% do tamanho original.

8.8 - A operação com o granulômetro à difração laser Cilas precisou ser otimizada, antes dos estudos definitivos com o caulim. Três parâmetros foram avaliados para se obter uma boa

dispersão entre as partículas: massa de amostra, volume de solução dispersante e tempo de ultrassom. Para os caulins do Morro do Felipe, os parâmetros otimizados foram:

- massa de amostra: 0,5 grama. Essa massa, diluída no volume de 500 ml (volume da cuba do aparelho), representa uma concentração de 0,1% de sólidos em suspensão;
- volume de solução dispersante: 5 ml;
- tempo de ultrassom: 10 minutos.

8.9 - Análises comparativas entre o desempenho dos granulômetros Cilas e Sedigraph (este último é tido como padrão na avaliação de caulins) indicaram que o Cilas tem uma tendência a superestimar as frações mais finas do caulim. Essa tendência possivelmente esteja relacionada com a diferença entre os princípios operacionais dos equipamentos. O Cilas opera com base no princípio físico da difração da luz, com a formação de figuras de difração. O Sedigraph opera com base na velocidade de sedimentação das partículas, segundo a lei de Stokes. A vantagem do uso do Cilas está no tempo operacional, cerca de 1/12 do tempo do Sedigraph.

8.10 - O caulim do Morro do Felipe é composto por tipos litológicos distribuídos irregularmente na jazida. Na empresa, a identificação dos tipos é por meio de suas cores e de suas características texturais e mineralógicas. Dependendo dessas características, o minério é beneficiado ou rejeitado. A empresa identifica 9 tipos litológicos na jazida: tipos 0, I, II, III, IIIa, IIIb, IIIg, IV e V. Os tipos 0, IV e V não são beneficiados. Os tipos I e II são os que dão origem a produtos finais de alvura elevada. Os tipos III, IIIa, IIIb e IIIg são os que tendem a apresentar problemas durante o beneficiamento, por apresentarem quantidades variadas de minerais contaminantes.

Na lavra, a identificação dos tipos econômicos é visual e um dos critérios importantes é a cor. Quando o minério apresenta cores tendendo ao branco, geralmente é beneficiado. Quando apresenta cores avermelhadas é rejeitado. Quando apresenta cores intermediárias, devido a variações nas concentrações dos minerais contaminantes (óxidos de ferro e de titânio), podem, ou não, ser beneficiados. Não havia, durante o período em que se realizou o estágio na empresa, outro critério mais eficaz para saber se o beneficiamento desses tipos intermediários produziria um produto final com a alvura esperada.

8.11 - A análise química do minério ROM indicou teores variados de óxidos de ferro nos diversos tipos litológicos. Nos tipos considerados econômicos, os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  variaram entre 1,7% e 2,5%. Os teores dos óxidos de titânio variaram entre 1,1% e 2,2% nas 44 amostras coletadas. A variação desse óxido parece não ter relação com a variação do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no minério.

8.12 - Análises químicas das alíquotas geradas no beneficiamento de 11 amostras ROM indicaram variações pouco significativas entre os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  do minério ROM e da alíquota PSM-BRANQ, última etapa do beneficiamento do caulim. Essas mesmas análises indicaram que os processos de beneficiamento foram mais eficazes na eliminação do  $\text{TiO}_2$ .

8.13 - As avaliações granulométricas das amostras ROM indicaram que o caulim do Morro do Felipe tem granulometria média extremamente fina. Os diâmetros  $D_{50}$  das 44 amostras analisadas variaram entre 0,32 e 0,61  $\mu\text{m}$ . O produto centrifugado da maioria dos tipos apresentou um diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 0,31  $\mu\text{m}$ .

8.14 - As avaliações colorimétricas de 11 amostras ROM e suas correspondentes alíquotas do beneficiamento, indicaram 3 conjuntos de seqüências de espectros de reflectâncias. No primeiro, o ganho de alvura caracterizou uma seqüência de espectros semelhantes do ROM ao PSM-BRANQ, sem inflexões aparentes nos espectros. No segundo, o ganho de alvura caracterizou uma seqüência de espectros que apresenta formas semelhantes do ROM ao PSM-UNB, porém com inflexões na faixa de comprimento de ondas entre 500 e 600 nm. O processo de branqueamento, que gera a alíquota PSM-BRANQ, gera, também, uma forma de espectro completamente diferente das alíquotas anteriores, sem inflexões. No terceiro, o ganho de alvura caracterizou outra seqüência de espectros com formas semelhantes do ROM ao PSM-BRANQ, mas com baixas reflectâncias (< 50%) na faixa inicial de comprimentos de onda do visível. Nos dois tipos anteriores, as reflectâncias são superiores a 50%, na mesma faixa.

8.15 - As avaliações colorimétricas da 44 amostras ROM indicaram 6 grupos diferentes de espectros. Os grupos foram denominados de A a F e suas curvas apresentam diferentes

intensidades de inflexões na faixa de comprimentos de onda do visível. Essas inflexões diferenciadas indicam que os materiais apresentam características colorimétricas diferenciadas, traduzidas pela maior ou menor reflectância da luz, naquela faixa de comprimentos de onda. Quanto maior a absorção da luz incidente, menor é a alvura do material analisado.

8.16 - Os grupos A, B e C mostram formas de espectros com pouca inflexão, indicando que esses grupos contêm amostras de minério com as melhores características colorimétricas para o beneficiamento. O grupo D apresenta uma forma de espectro com intensa absorção da luz na faixa do visível, indicando que as amostras do minério apresentam características que absorvem mais a luz incidente. Os grupos E e F apresentam formas de espectros completamente diferentes das demais, com intensa absorção da luz na faixa de comprimentos de onda do visível. Nesses grupos, encontram-se a maioria das amostras classificadas como tipo IV da CADAM; isto é, minério não econômico.

8.17 - A avaliação por espectro-colorimetria é uma ferramenta que identifica características no minério, imperceptíveis pela visão. Os formatos dos espectros de reflectâncias dos grupos A e D são distintos. Entre as amostras coletadas, classificadas visualmente, há tipos de minérios III e IIIb que se enquadram, ora no grupo A, ora no grupo D da classificação colorimétrica. Isso indica que a sistemática de identificação visual não é completamente eficiente para determinados tipos litológicos. Nesse caso, a técnica pode ser uma importante ferramenta para o pessoal que atua na lavra do Morro do Felipe.

8.18 - Os estudos até aqui desenvolvidos com a técnica por espectro-colorimetria está longe de ser uma proposta definitiva. A princípio, considera-se que a alternativa de avaliação do minério por meio dessa técnica tem boas perspectivas de ser aplicada, mas precisa ser melhorada. Não há dúvidas de que os parâmetros colorimétricos do minério são bons indicadores para a sua classificação. Entretanto, o estudo precisa evoluir para a identificação das causas determinantes dos formatos das curvas; isto é, que características do minério contribuem para o formato do espectro de reflectância.

## 9 RECOMENDAÇÕES

9.1 - Uma das primeiras investigações a serem implementadas para a otimização da técnica por espectro-colorimetria é a avaliação do ganho de alvura que cada um dos grupos A a D pode proporcionar, após o beneficiamento. As 11 amostras beneficiadas, disponíveis para esse tipo de avaliação, formaram um universo muito restrito para esclarecer ou evidenciar alguma tendência. As seqüências de curvas - do ROM ao PSM-BRANQ - permitiram que se estabelecesse, no máximo, a existência de 3 padrões de comportamento, um dos quais para o minério não econômico.

9.2 - Outra investigação que pode ser rapidamente implementada é a avaliação do comportamento dos espectros nas blendagens de tipos diferentes de minério. Na lavra, obteve-se informações de que determinadas variedades de minério do tipo III apresentam características que impedem a produção de caulim com a alvura final esperada. A identificação dessas variedades, via espectro de reflectância, seria uma forma de evitar misturas indesejáveis.

9.3 - As características mineralógicas e texturais do minério ROM são as responsáveis pelos formatos dos espectros de reflectâncias. A associação do formato do espectro com características bem definidas seria fundamental para o técnico da lavra decidir, com segurança, que tipos litológicos poderiam ou não ser beneficiados.

9.4 - Esse estudo foi desenvolvido com amostras de um determinado nível topográfico da jazida. É recomendável que seja estendido para variados níveis da jazida para comprovar sua representatividade na amplitude do corpo mineralizado.

9.5 - O universo de 11 amostras beneficiadas foi pequeno para definir com maior clareza as relações entre espectro de reflectância, características mineralógicas e ganho de alvura. Entretanto, foram suficientes para permitir uma abordagem inicial com os interpoladores matemáticos e as relações entre os espectros de reflectâncias, a alvura do minério ROM e a alvura do minério beneficiado, razão pela qual, é recomendável a continuidade desses estudos com amostras representativas dos variados tipos de caulim da jazida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, H. **Mais branco e menos abrasivo**. Minérios e Minerales, jun., n. 218, p. 15-19, 1997.
- BAUDET, G.; MORIO, M. **Méthodes de valorisation des kaolins**. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Service Géologique National, Orléans, France, 1974. 54 p.
- BILLMEYER JR, F.W.; SALTZMAN, M. **Principles of color technology**. New York: Interscience Publishers, 1966. 181 p.
- BRISTOW, C.M. **An introduction to the evaluation of mineral filler deposits**. Industrial Minerals, June, p. 59-65, 1992.
- BRISTOW, C.M. **World kaolin**; genesis, exploitation and application. Industrial Minerals, July, p. 45-59, 1987.
- BRISTOW, C.M. **World kaolins**; genesis, exploitation and application. Industrial Minerals, July, p. 45-87, 1987.
- BUNDY, W.M.; ISHLEY, J.N. **Kaolin in paper filling and coating**. Applied Clay Science, n.5, Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V., p. 397-420, 1991.
- CADAM - CAULIM DA AMAZÔNIA S/A **Relatório técnico do projeto**; - parte 1. Belém, 1973. Relatório Interno. Não publicado.
- CHIA, Y.H.; SOMASUNDARAN, P. **A theoretical approach to flocculation in carrier flotation for beneficiation of clay**. Colloids and Surfaces, 8, p. 187-202, 1983.
- CLARK, D.A. **A review of kaolin markets in the USA**. Industrial Minerals, n. 176, May, p. 27-39, 1982.
- COCKS, J.K. **Development of a range of hydrocyclones by practice and experience**. Minerals Engineering, v. 4, n. 3/4, p. 271-278, 1991.
- COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS **Granulometer 1064**; user manual. Marcoussis, France, 1992. 73 p.
- CRISCUOLO, P.S.R. **Palestra sobre processamento de caulim**. Belém, 1996. Divulgação interna da empresa CADAM. Não publicado.

- D'ASSUMPÇÃO, L.F.G. *et al.* **High-gradient magnetic separation of kaolin clay.** Minerals and Metallurgical Processing, Aug., p. 124-130, 1996.
- DALLMANN, W. *et al* **Die neue hydrozyklontechnik in der kaolinaufbereitung der DDR.** Aufbereitungs - Technik, n. 4, p. 186-192, 1988.
- DANA, J.D. **Manual de mineralogia.** Rio de Janeiro - RJ: Livros Técnicos e Científicos S/A, v. 1 e 2, 1974, 642 p.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas;** uma introdução. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 1981. 558 p.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL **Sumário mineral.** v. 16, Brasília - DF, 1996. 103 p.
- DORDET, Y. **La colorimétrie;** principes et applications. Paris: Éditions Eyrolles, 1990. 148 p.
- DR RANGE **Basics of colorimetry.** Catálogo do Equipamento Micro Color, 37 p.
- DUARTE, A.L.S.; KOTSCHOUBEY, B. **Cobertura caolínica da região do Baixo rio Jari;** proposta de evolução. IV Simpósio de Geologia da Amazonia, Sociedade Brasileira de Geologia, Belém-PA, p. 79-82, 1994.
- ENGLISH CHINA CLAY **Produits pour l'industrie papetière - methodes d'essais.** International paper division. [S.l:s.n.].
- FAZANO, C.A.T.V. **Tintas - métodos de controle de pinturas e superfícies.** São Paulo, SP: Hemus Editora Limitada, 1995. 321 p.
- FERRON, J.J. *et al.* **Bleaching of kaolins of Galicia (NW Spain);** Part 2: increase of their brightness. Silicates Industriels, 11-12, p. 225-228, 1991.
- FORBUS, E.S.; YOUNG, R.H.; WILLIS, M.J. **Alternative reductive bleaching process for kaolin.** Mining Engineering, June, p. 603-605, 1993.
- GEOKLOCK **Avaliação geológica e mineira do caulim do Rio Jari.** São Bernardo do Campo, 1984. Relatório técnico para a empresa CADAM. Não publicado.
- GRIMSHAW, R.W. **The chemistry and physics of clays and allied ceramic materials.** Wiley Interscience, 4.ed. (revised), 1971.
- GROUNDS, A. **Fine particle treatment by ultraflotation.** Mine & Quarry Engineering, Mar., p. 128-133, 1964.

- HERBILLION, A.J. *et al.* **Iron in kaolinite with special reference to kaolinite from tropical soils.** Clay Minerals, 11, p. 201-220, 1976.
- HOFFMANN, H.J. **Projektierung und bau moderner kaolin;** Aufbereitungsanlagen. Aufbereitungs Technik, n. 6, p. 343-355, 1985.
- HUNTERLAB **Universal software version 3.0;** - user's manual. Hunter Associates Laboratory, Inc., Virginia, USA. 1995.
- KENDALL, T. **Dancing to a new tune.** Industrial Minerals, n. 350, november, p. 21-38, 1996.
- KINGERY, W.D.; BOWEN, H.K.; UHLMANN, D.R. **Introduction to ceramics.** New York: John Wiley & Sons, Second Edition, 1976. 1032 p.
- KÖSTER, R. *et al.* **New reagent systems for the flotation of kaolinite.** Minerals Engineering, V. 5, n. 3-5, p. 445-456, 1992.
- LOCZY, L. **Contribuições à paleogeografia do desenvolvimento geológico da bacia do Amazonas.** Departamento Nacional da Produção Mineral, Rio de Janeiro-RJ: Boletim n. 223, 1966. 96 p.
- LOFTHOUSE, C.H. **The beneficiation of kaolin using a commercial high intensity magnetic separator.** IEEE Transactions on Magnetics, v. MAG 17, n. 6, Nov., p. 3302-3304, 1981.
- LOUGHBROUGH, R. **Kaolin producer move upmarket.** Industrial Minerals, Oct., p. 51-69, 1993.
- LOUGHBROUGH, R. **North american paper industry.** Industrial Minerals, Dec., p. 39-45, 1992.
- LOZANO, R.D. **El color y su medición.** Buenos Aires: Editorial Americalee S. R. L., 1978. 612 p.
- LUZ, A.B. **Beneficiamento de caulim.** São Paulo, 1994 54p. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LUZ, A.B. **Influência das impurezas mineralógicas no beneficiamento de caulins;** exemplo do caulim do Morro do Felipe, Amapá. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, p 17-35, [S.l:s.n], (199\_).

- LUZ, A.B.; DAMASCENO, E.C. **Caulim: um mineral industrial importante**. Revista Tecnologia Mineral, Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, n. 65, 1993. 32 p.
- MALENGREAU, N.; MULLER, J-P.; CALAS, G. **Fe-speciation in kaolins: a diffuse reflectance study**. Clays and Clay Minerals, v.42, n.2, p. 137-147, 1994.
- MANNING, D.A.C. **Introduction to industrial minerals**. London: Chapman & Hall, 1995. 276 p.
- MARQUES, M.; RODRIGUES, C. **A expansão da CADAM**. Brasil Mineral, n. 120, p. 36-38, 1994.
- MAURYA, C.B.; DIXIT, S.G. **Effect of pH on the high-gradient magnetic separator of kaolin clays**. International Journal of Mineral Processing, 28, p. 199-207, 1990.
- MAURYA, C.B.; DIXIT, S.G. **High-gradient magnetic separation of China clays**. Bulletin Mater. Science, v. 10, n. 5, Aug., p. 471-475, 1988.
- MAYNARD, R.N.; MILLMAN, N.; YANNICELLI, J. **A method of beneficiating clay by removal of titanium impurities**. Clays and Clay Minerals, v. 17, p. 59-62, 1969.
- McVEY, H.; HARBEN, P. **Industrial minerals in paper; - a chase for technical superiority**. Industrial Minerals, n. 267, Dec., p. 41-47, 1989.
- MESTDAGH, M.M.; VIELVOYE, L.; HERBILLON, A.J. **Iron in kaolinite; II - the relationship between kaolinite crystallinity and iron content**. Clay Minerals, 15, p. 1-13, 1980.
- MURRAY, H.H. - **Clay**. Chapter 6, p. 95-142, [S.1:s.n.].
- MURRAY, H.H. **Diagnostics tests for evaluation of kaolin physical properties**. Acta Mineral. Petrographica, v. 24, p. 67-77, 1979.
- MURRAY, H.H. **Industrial applications of kaolin**. Tenth National Conference on Clays and Clay Minerals, p. 291-298, 1964.
- MURRAY, H.H. **Kaolin project in the Amazonia area - Brazil**. Society of Engineers of AIME, p. 81-87, 1981.
- MURRAY, H.H.; PATTERSON, H.S. **Clays, Industrial Minerals and Rocks**. v. 1, New York: Society of Mining Engineers, p. 585-65, 1983.
- ORUMWENSE, O.F.F. **Dispersion-flocculation studies on a goethite-clay system**. J. Chem. Tech. Biotechnol., 60, p. 405-411, 1994.

- PAULO ABIB ENGENHARIA S/A **Caracterização mineralógica em amostras de caulim e seus respectivos produtos - CADAM.** São Paulo, 1994, 53 p. Relatório técnico para a empresa CADAM. Não publicado.
- PEÑA, J.M.G. *et al.* **Effect of the delamination of kaolin on its properties.** Interceram, n. 6, p. 24-26, 1988.
- PEREIRA, C.A.S. *et al.* **Descrição do processo de industrialização do caulim.** Belém, 1995. Relatório Interno da empresa CADAM. Não publicado.
- PETTER, C.O. **Fundamentos de colorimetria.** Porto Alegre, 1996. PPGEM/ UFRGS, Material de divulgação interna, 59 p. Não publicado.
- PICKERING JR, S.M.; HURST, V.J. **Commercial kaolins in Georgia.** Georgia Geological Society Guidebooks, v. 9, n. 1, p. 29-75. 1989.
- PRASAD, M.S.; REID, K.J.; MURRAY, H.H. **Kaolin: processing, properties and applications.** Applied Clay Science, 6, p. 87-119, 1991.
- RAVISHANKAR, S.A.; KHOSLA, N.K. **Selective flocculation of iron from its synthetic mixtures with clays; a comparison of polyacrylic acid and starch polymers.** International Journal of Mineral Processing, 43, p. 235-247, 1995.
- SABEDOT, S; PETTER, C.O. **Estudos para o uso do granulômetro a difração laser na indústria de caulins para papel.** Porto Alegre, 1997, 20 p. Trabalho preparado para o Segundo Congresso Internacional de Tecnologia Metalúrgica e de Materiais, out., São Paulo. Não Publicado.
- SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas.** São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher Ltda, 2v. v.2, 1975. 802 p.
- SHOUMKOV, S.; DIMITROV, Z.; BRAKALOV, L. **High-gradient magnetic treatment of kaolin.** Interceram, n. 6, v. 36, p. 26-28, 1987.
- SOBRINHO, J.F.G.; OLIVEIRA, R.N.; SALLES FILHO, L.S. **Purificação de caulim de Registro (SP) por separação magnética.** Mineração e Metalurgia, n. 485, p. 13-17, 1987.
- SOMBROEK, W.O. **Amazon soils. A reconnoissance of the soils of the Brazilian amazon region.** Wageningen, Centre for Agri. Publ. Document, 1966. 292 p.
- TRAWINSKI, H.; EISENLOHR, V. **O beneficiamento do caulim.** Cerâmica, v. 26, n. 122, fevereiro, p. 25-33 (1ª parte) e v. 26, n 124, abr., p. 65-72 (2ª parte), 1980.

- TRUCKENBRODT, W.; KOTSCHOUBEY, B. **Argila de belterra**; cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, v.11(3), p. 203-208, 1981.
- VAN OLPHEN, H. **An introduction to clay colloid chemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1977. 318 p.
- VEGLIO, F.; PAGLIARINI, A.; TORO, L. **Factorial experiments for the development of a kaolin bleaching process**. *International Journal of Mineral Processing*, v. 39, p. 87-99, 1993.
- VELHO, J.A.G.L.; GOMES, C. S. F. **Characterization of Portuguese kaolins for the paper industry**; beneficiation through new delamination techniques. *Applied Clay Science*, n. 6, p. 155-170, 1991.
- VELHO, J.A.G.L.; GOMES, C.S.F. **Matérias-primas minerais alternativas do caulino para carga e cobertura do papel**. *O Papel*, jul., p. 33-44, 1992.
- VOLZONE, C.; TAVANI, E.L. **Chromium (III) adsorption on kaolinita from an industrial effluent**. *Clean Technology for the Mining Industry*, University of Concepción, Chile, p. 121-128, 1996.
- WINTERS JR, A.J.; SELVAGGI, J.A. **Large scale superconducting separator for kaolin processing**. *Chemical Engineering Progress*, Jan., p. 36-40, 1990.
- XUEDE, H.; KEWU, W. **A study of iron removal from fine kaolin by two-liquid flotation**. XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, May, p. 1389-1393, 1993.
- YAN, L.G. *et al.* **A laboratory superconducting high gradient magnetic separator**. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 25, n. 2, mar., p. 1873-1876, 1989.
- YOON, R.H. *et al.* **Beneficiation of kaolin clay by froth flotation using hydroxamate collectors**. *Minerals Engineering*, V. 5, n. 3-5, p. 457-467.

**ANEXO 1**

## 1 COLORIMETRIA

Considerando a importância da propriedade alvura no contexto desse trabalho, far-se-á, a seguir, uma abordagem teórica sobre a colorimetria e alguns comentários sobre os aspectos físicos da reflexão, difusão e reflectância da luz.

### 1.1 FUNDAMENTOS

Sob o ponto de vista puramente físico, a produção de cor requer três fatores: uma fonte de luz, um objeto a ser iluminado e um detector fotosensitivo (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966).

A luz visível é uma forma de energia (E), descrita pelo seu comprimento de onda. Os raios luminosos são ondas eletromagnéticas e podem ser definidos por vários parâmetros (DORDET, 1990):

- frequência ( $\nu$ ): número de vibrações por segundo;
- período (T): duração de vibração em segundos;
- comprimento de onda ( $\lambda$ ): distância de propagação durante um período T.

$$T = 1/\nu$$

$$\lambda = c/\nu$$

$$E = h.\nu$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$h = \text{constante de Planck} = 6,63 \times 10^{-34} \text{ joules.s}$$

$$1 \text{ joule} = 2,4 \times 10^{-8} \text{ calorias.}$$

O sistema ótico humano é sensível às radiações de  $\lambda$  entre 380 e 780 nm. Esse intervalo é subdividido em diferentes faixas de estímulo colorido (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966; DORDET, 1990), conforme mostrado no quadro 36.

Na realidade, o olho humano percebe três diferentes estímulos de cor: azul, verde e vermelho. Esses três estímulos somam-se para determinar as impressões coloridas no cérebro. Assim, qualquer cor pode ser composta pela adição de vermelho, verde e azul. Esse fato foi a base da evolução técnica para a medição de cores (DR RANGE).

QUADRO 36: Cores detectadas pelo olho humano, na faixa de comprimentos de onda do visível.

COMPRIMENTO DE ONDA (nm)	COR PERCEBIDA
380 - 436	violeta
436 - 495	azul
495 - 566	verde
566 - 589	amarelo
589 - 627	laranja
627 - 780	vermelho

Quando a luz incide sobre um objeto, um ou mais fenômenos pertinentes à cor pode acontecer:

- a) Transmissão: a luz é transmitida através de um material que é dito transparente.
- b) Absorção: além de transmitida, a luz pode ser absorvida. Se o material é colorido parte da luz é absorvida, mas se toda a luz for absorvida o material é preto.
- c) Espalhamento ou reflexão: parte da luz além de transmitida e/ou absorvida pode ser refletida. A reflexão pode se dar em apenas uma direção quando a superfície do material for lisa. Nesse caso, a reflexão é dita especular. Quando a superfície for rugosa a reflexão é dita difusa (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966; DORDET, 1990; DR RANGE; PETTER, 1996; KINGERY *et al.*, 1976). As duas reflexões podem ocorrer simultaneamente. A figura 45 mostra o fenômeno da reflexão da luz em diferentes superfícies.

Quando não há absorção da luz e a reflexão (difusora + especular) for total, diz-se que o material é branco, mas se houver absorção o material é colorido.

Resumindo, pode-se classificar os materiais em três grandes grupos: opacos, transparentes e translúcidos. São opacos aqueles que não deixam passar radiação através deles. São transparentes os que não modificam muito a trajetória da radiação incidente. São translúcidos os que modificam a maior parte do fluxo incidente, transmitindo ou refletindo em direções distintas da incidência (LOZANO, 1978). Esse trabalho relaciona-se com os materiais opacos.

A quantidade de luz difusa mais especular refletida é o que se denomina de reflectância. O efeito da luz sobre objetos opacos pode ser avaliado por meio das curvas de reflectâncias, que mostram a fração da luz refletida pelo objeto, em cada comprimento de onda. Os objetos coloridos sempre refletem a luz de suas próprias cores e absorvem as outras

tonalidades, exceto o amarelo (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966). A figura 46 mostra os espectros (ou curvas) de reflectâncias de alguns objetos opacos e coloridos.

O olho humano, o sistema nervoso e o cérebro formam o sistema mais importante para a detecção das cores. Além deste sistema, as cores podem ser medidas por meio dos fotodetectores denominados colorímetros ou espectro-colorímetros. A resposta espectral desses equipamentos é diferente para diferentes comprimentos de onda (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966).

## 1.2 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DE UMA COR

Para o entendimento do fenômeno da cor, três variáveis, ou parâmetros, são importantes: tonalidade, saturação e intensidade (luminosidade). Os três parâmetros são usados de maneiras variadas para definir e medir cores (DORDET, 1990).

A tonalidade é um fator de qualidade na cor. Permite descrever a cor em termos de comprimento de onda. Exemplo: amarelo, azul, verde, etc.

A saturação é a percentagem de tonalidade presente na cor. Tem relação com a pureza da cor (cor espectral pura), ou seja, quanto mais parecido a essa, tanto mais saturado.

A intensidade está relacionada com o brilho, isto é, tonalidade mais clara ou mais escura. Exemplo: azul claro, verde escuro, etc.

A figura 47 mostra as relações dos parâmetros.

## 1.3 SISTEMAS DE MEDIÇÕES DE CORES

Um princípio enunciado por Newton (1672), reafirmado por Young (1802) e verificado na prática, afirma que qualquer cor pode ser igualada pela soma das três cores primárias. Esse princípio fundamental é a base sobre a qual se sustenta toda a colorimetria (LOZANO, 1978). As cores primárias são: vermelho, azul e verde.

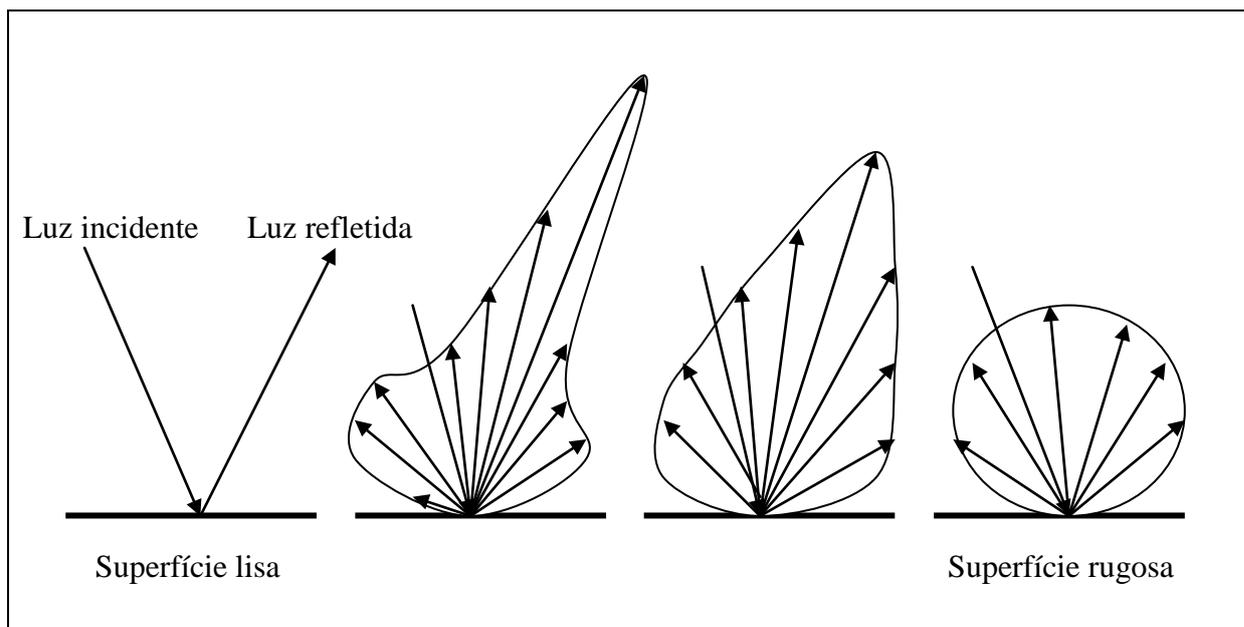


FIGURA 45: Fenômeno da reflexão da luz em diferentes tipos de superfícies, com o aumento da rugosidade. Fonte: KINGERY (1975), modificada.

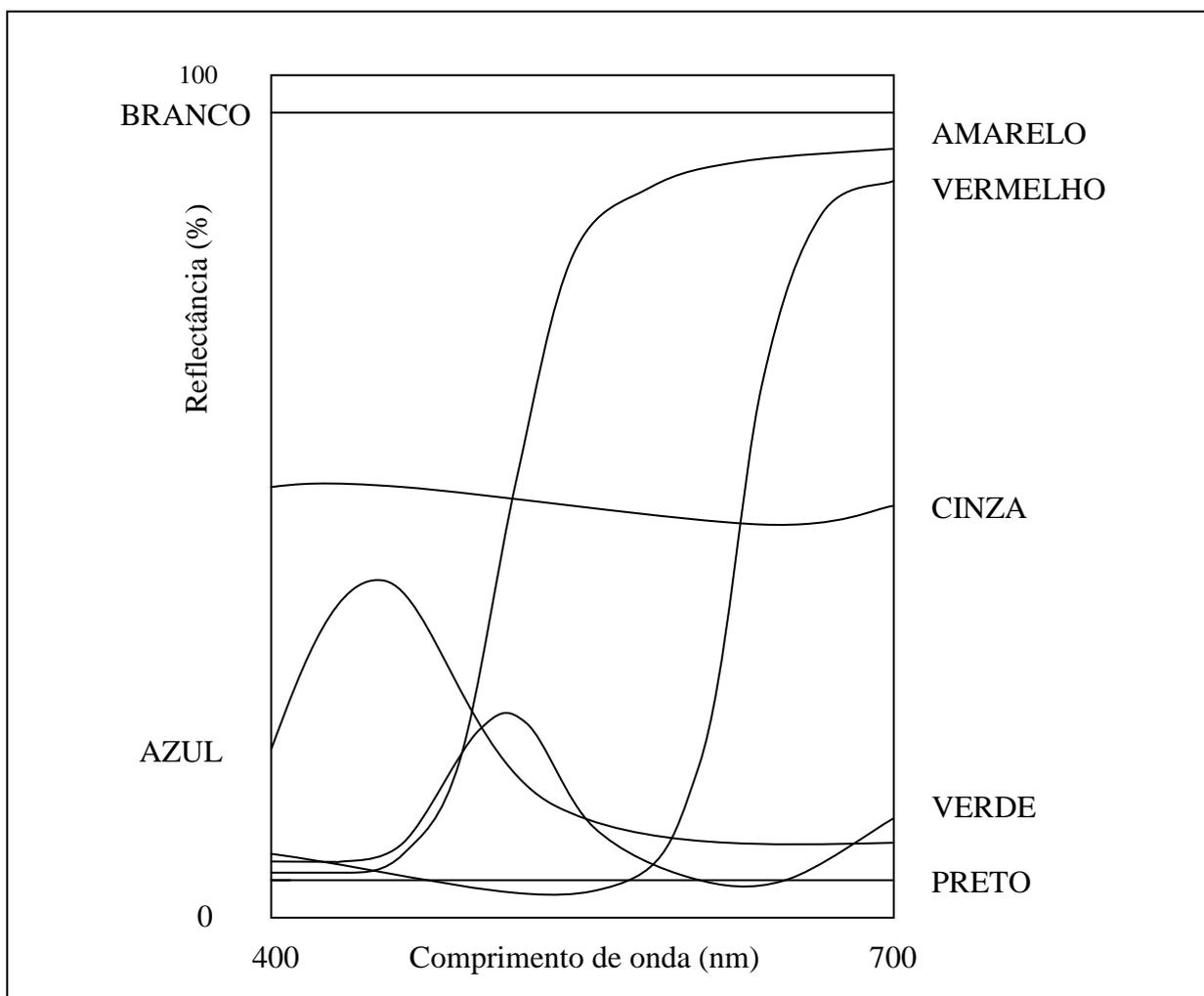


FIGURA 46: Espectros de reflectâncias de objetos opacos e coloridos, na faixa de comprimento de onda do visível. Fonte: BILMEYER E SALTZMAN (1966), modificada.

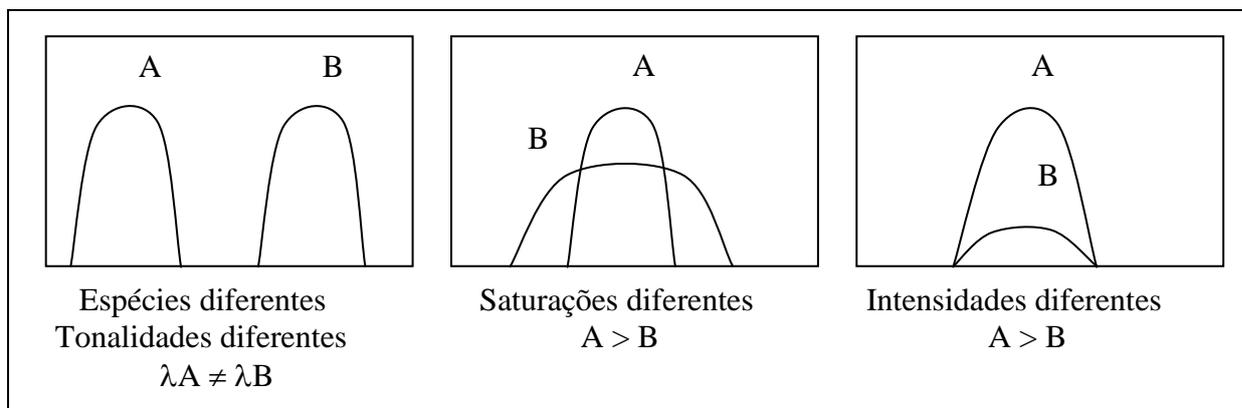


FIGURA 47: Relação entre os parâmetros tonalidade, saturação e intensidade.

Matematicamente, de acordo com a primeira lei de Grassmann (1853), enunciada anteriormente por Young, este princípio pode ser expresso por

$$c[C] \equiv r[R] + b[B] + g[G]$$

ou seja, a potência radiante  $c$  da cor  $C$  é equivalente a soma das potências  $r$  do vermelho primário [R],  $b$  do azul primário [B] e  $g$  do verde primário [G]. O essencial dessa primeira lei é que existe uma e somente uma combinação de três cores primárias que iguala a percepção de qualquer cor real (LOZANO, 1978).

### 1.3.1 Tricromia

Conforme citação anterior, três fatores são importantes na percepção da cor: o iluminante, a cor do objeto e o observador. Normalmente, são utilizados os iluminantes A, B, C e  $D_{65}$ . O iluminante A corresponde à luz emitida por um corpo escuro a  $2.856^\circ$  K, simulando as lâmpadas incandescentes. O iluminante B é obtido pela filtragem do iluminante A, com dois filtros líquidos de espessura de um centímetro, representando a luz direta do sol. O iluminante C representa a luz média do dia e é também obtido por filtragem de A. O iluminante  $D_{65}$  representa a repartição espectral da luz do dia, correspondendo a uma temperatura de cor de  $6.504^\circ$  K. A única fonte capaz de simular o  $D_{65}$  é a lâmpada de xenônio (PETTER, 1996).

As quantidades das três cores primárias presentes em um objeto são chamadas de valores tristimulus da cor do objeto.

Em cada comprimento de onda a quantidade de luz que chega no observador é obtida por meio da multiplicação da emissão espectral ( $E$ ) do iluminante pela reflectância ( $R$ ) do material. A figura 48 mostra a relação. Assim, os valores tristimulus

$$[R] = \sum_{\lambda} ERr$$

$$[G] = \sum_{\lambda} ERg$$

$$[B] = \sum_{\lambda} ERb$$

sendo  $r$ ,  $g$  e  $b$  as potências radiantes das cores primárias. A faixa de comprimento de onda é entre 380 e 780 nm, que é a faixa no visível do sistema ótico humano.

Um corpo perfeitamente branco não absorve nenhuma radiação no visível (380 - 780 nm), enquanto que um corpo colorido apresenta uma variação de reflectância em função do comprimento de onda (PETTER, 1996).

### 1.3.2 O sistema CIE

O sistema CIE (Comission International de l'Eclairage), ou Comissão Internacional de Iluminação, criada em 1931, é um dos mais importantes sistemas de medição de cores, baseado no conceito de tricomia aditiva, derivado de experimentos nos quais cores são combinadas pela mistura de 3 luzes coloridas: azul, verde e vermelho (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966).

No sistema CIE há diferentes escalas para representação das cores. As mais importantes são: Valores Tristimulus XYZ, Coordenadas de Cromaticidade Yxy e CIELab.

#### 1.3.2.1 Valores tristimulus XYZ

A CIE estabeleceu valores para  $r$ ,  $g$  e  $b$  para a faixa de comprimentos de onda entre 380 e 780 nm, tabelados em intervalos de 5 nm, identificando-os, respectivamente, como funções  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Assim, os valores tristimulus  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  são obtidos através de:

$$X = \sum_{\lambda} ERx$$

$$Y = \sum_{\lambda} ERy$$

$$Z = \sum_{\lambda} ERz$$

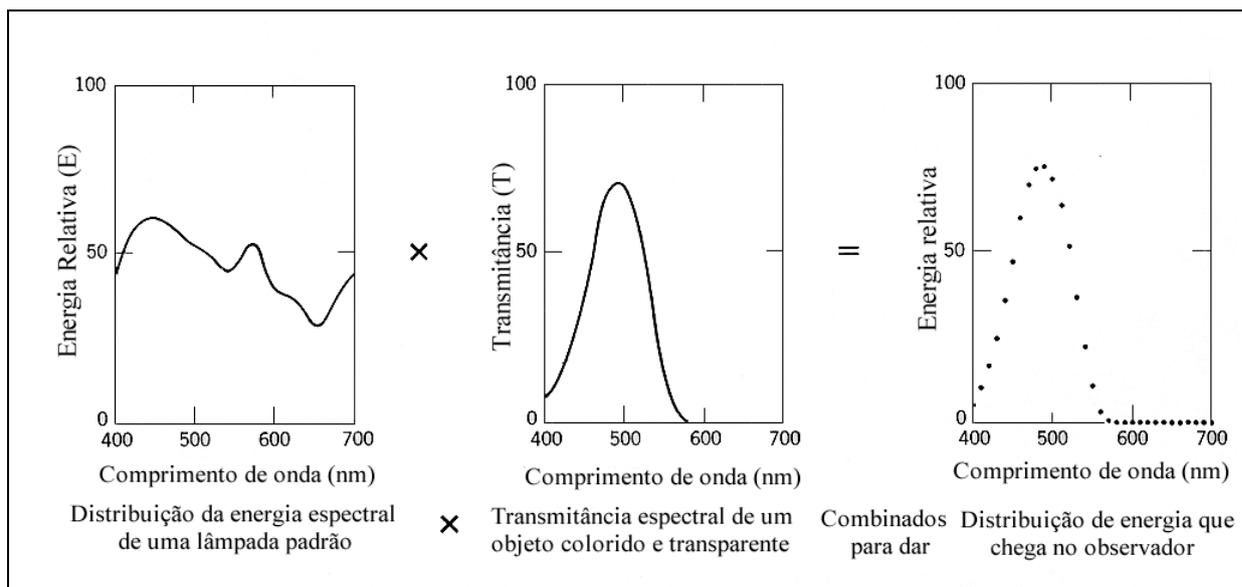


FIGURA 48: Em cada comprimento de onda, a quantidade de luz que chega no observador é obtida pela multiplicação de  $E \times T$ . Fonte: BILMEYER E SALTZMAN (1966), modificada.

### 1.3.2.2 Coordenadas de cromaticidade $Y_{xy}$

A cromaticidade de um objeto é a qualidade de sua cor. As coordenadas de cromaticidade  $x$ ,  $y$  e  $z$  são obtidas dos valores tristímulos, conforme equações abaixo (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966):

$$x = X / (X + Y + Z);$$

$$y = Y / (X + Y + Z);$$

$$z = Z / (X + Y + Z).$$

Considerando que a soma dessas coordenadas é igual a 1, apenas duas coordenadas (geralmente  $x$  e  $y$ ) são suficientes para descrever a cromaticidade de uma cor. Um dos valores tristímulos (geralmente  $Y$ ) deve ser, também, especificado (BILLMEYER & SALTZMAN, 1966).

No diagrama de cromaticidade, figura 49, uma cor será caracterizada por  $x$  e  $y$  quanto a sua tonalidade e saturação. O valor  $Y$  (que sai do plano  $x, y$ ) permite quantificar a intensidade luminosa de um objeto (PETTER, 1996).

### 1.3.2.3 Sistema uniforme CIELab

Esse sistema foi desenvolvido por Judd e Hunter e estandardizado na reunião da CIE, em 1976. Na prática, é o modelo mais amplamente utilizado. As coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  são relacionáveis com os valores tristímulos  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  (DR RANGE). O sistema também é

conhecido como escala Hunter. Nele, o parâmetro **L** mede a luminosidade que varia de 100, para o branco nominal, a zero, para o preto, de uma maneira aproximadamente igual como o olho humano poderia avaliar. O parâmetro **a** varia de positivo a negativo: quanto mais positivo mais vermelha é a cor e quanto mais negativo mais verde é a cor. Se for zero, a cor é cinza. O parâmetro **b** também varia de positivo a negativo: quanto mais positivo mais amarelada é a cor e quanto mais negativo, mais azulada é a cor. Se for zero, a cor é acinzentada (HUNTERLAB, 1995).

As relações das coordenadas **L a b** com **X Y Z** são:

$$\begin{aligned}L^* &= 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16; \\a^* &= 500 ((X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}); \\b^* &= 200 ((Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}),\end{aligned}$$

onde  $X_n$ ,  $Y_n$  e  $Z_n$  correspondem ao branco nominal. De uma maneira geral, atribui-se cor branca a um objeto com distribuição espectral plana. Entretanto, se usa a denominação “branco” para uma infinidade de objetos que não respondem a essa característica. Estes “brancos” diferem, em pelo menos, um dos seguintes aspectos:

- a) Tonalidade: tendência ao azul (+ branco); tendência ao amarelo (- branco).
- b) Luminosidade: mais luminoso (+ branco).
- c) Saturação: maior a tendência a apresentar uma cor definida (- branco) (PETTER, 1996).

A figura 50 mostra o diagrama do sistema CIELab, onde **C** é a saturação e **h** é o ângulo da tonalidade. Suas medidas são:

$$\begin{aligned}C &= (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \\h &= \text{arc tg} (b^*/a^*).\end{aligned}$$

### 1.3.3 Quantificação da alvura

Algumas fórmulas são utilizadas para a quantificação da alvura (PETTER, 1996):

Alvura ISO: reflectância a 457 nm ( $D/0^\circ$ );

Alvura TAPPI: reflectância a 457 nm ( $45/0^\circ$ );

Whiteness TAPPI:  $Z/1,089$  (iluminante  $D_{65}$ );

Whiteness Berger:  $Y + 3 [Z/1,089 - ((X - 0,1652Z)/0,77)]$  (iluminante  $D_{65}$ );

Whiteness Hunter:  $L - 3b$ .

Para a indústria do caulim há uma definição padrão para a alvura: é a relação expressa em percentagem da quantidade de energia luminosa refletida por uma amostra em relação à



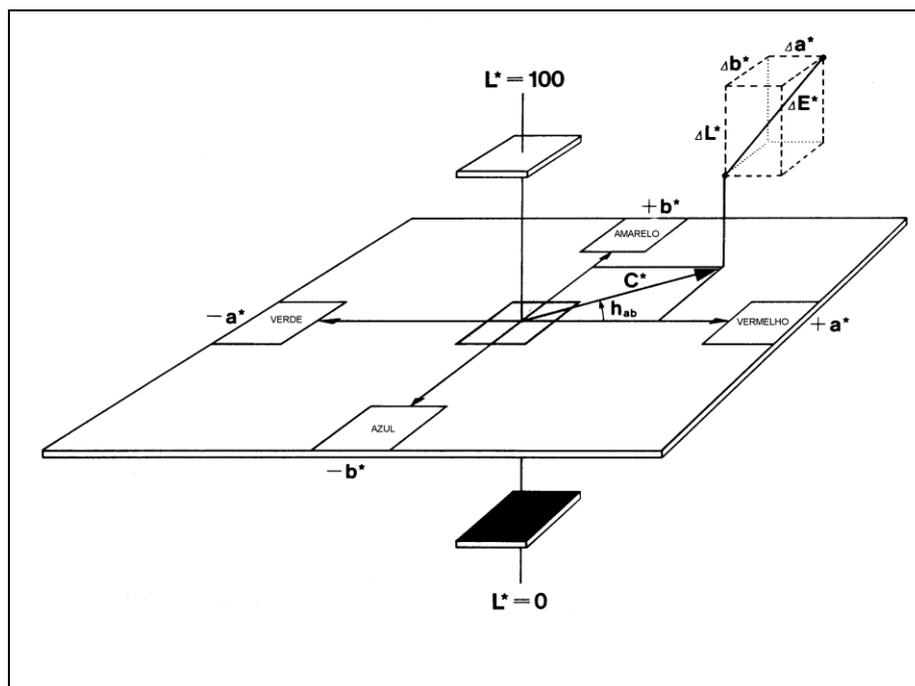


FIGURA 50: Diagrama do sistema CIELAB.  
 Fonte: Catálogo do equipamento Micro Color. Modificada.

**ANEXO 2**

**Quadros com balanços de massas e teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nas 11 amostras beneficiadas.**

<b>AMOSTRA LA-AM2</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,0	2,00
Desareado	94,12	2,0	1,88
Rejeito do Desareado	5,88	2,1	0,12
Centrifugado	81,57	1,8	1,47
Rejeito do Centrifugado	12,55	2,5	0,31
Separador Magnético	76,09	1,9	1,45
Rejeito do SM	5,48	3,0	0,16
Produto	76,09	1,8	1,37
Alimentação – Produto =			<b>0,63</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,60</b>
Diferença no balanço (%)			<b>4,56</b>

<b>AMOSTRA LB-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,4	2,40
Desareado	94,38	2,5	2,36
Rejeito do Desareado	5,62	2,8	0,16
Centrifugado	79,56	2,1	1,67
Rejeito do Centrifugado	14,82	3,4	0,50
Separador Magnético	70,60	2,0	1,41
Rejeito do SM	8,96	3,1	0,28
Produto	70,60	2,0	1,41
Alimentação – Produto =			<b>0,99</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,94</b>
Diferença no balanço (%)			<b>4,96</b>

<b>AMOSTRA LC-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,9	1,90
Desareado	91,98	2,2	2,02
Rejeito do Desareado	8,02	1,6	0,13
Centrifugado	71,55	2,0	1,43
Rejeito do Centrifugado	20,43	2,3	0,47
Separador Magnético	67,97	1,9	1,29
Rejeito do SM	3,58	2,4	0,09
Produto	67,97	2,1	1,43
Alimentação – Produto =			<b>0,47</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,68</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-44,75</b>

<b>AMOSTRA LC-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,0	2,00
Desareado	93,97	2,0	1,88
Rejeito do Desareado	6,03	2,8	0,17
Centrifugado	80,65	2,0	1,61
Rejeito do Centrifugado	13,32	2,7	0,36
Separador Magnético	75,64	1,9	1,44
Rejeito do SM	5,01	3,2	0,16
Produto	75,64	2,0	1,51
Alimentação – Produto =			<b>0,49</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,69</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-41,38</b>

<b>AMOSTRA LD-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,8	1,80
Desareado	91,78	1,8	1,65
Rejeito do Desareado	8,22	1,5	0,12
Centrifugado	74,01	1,7	1,26
Rejeito do Centrifugado	17,77	2,0	0,36
Separador Magnético	73,29	1,7	1,25
Rejeito do SM	0,72	3,2	0,02
Produto	73,29	1,7	1,25
Alimentação – Produto =			<b>0,55</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,50</b>
Diferença no balanço (%)			<b>9,45</b>

<b>AMOSTRA LD-AM4</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,0	2,0
Desareado	90,34	2,1	1,9
Rejeito do Desareado	9,66	1,8	0,17
Centrifugado	77,12	1,9	1,47
Rejeito do Centrifugado	13,22	2,9	0,38
Separador Magnético	71,49	1,9	1,36
Rejeito do SM	5,64	3,3	0,19
Produto	71,49	1,9	1,36
Alimentação – Produto =			<b>0,64</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,74</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-15,81</b>

<b>AMOSTRA LE-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,0	2,0
Desareado	77,72	2,4	1,87
Rejeito do Desareado	22,28	2,3	0,51
Centrifugado	63,58	2,0	1,27
Rejeito do Centrifugado	14,14	3,2	0,45
Separador Magnético	59,44	1,9	1,13
Rejeito do SM	4,15	3,3	0,14
Produto	59,44	1,9	1,13
Alimentação – Produto =			<b>0,87</b>
Σ Rejeitos =			<b>1,1</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-26,52</b>

<b>AMOSTRA LF-AM4</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	4,0	4,0
Desareado	93,01	3,5	3,26
Rejeito do Desareado	6,99	6,7	0,47
Centrifugado	74,16	2,9	2,15
Rejeito do Centrifugado	18,85	5,9	1,11
Separador Magnético	69,09	2,4	1,66
Rejeito do SM	5,06	12,7	0,64
Produto	69,09	2,4	1,66
Alimentação – Produto =			<b>2,34</b>
Σ Rejeitos =			<b>2,22</b>
Diferença no balanço (%)			<b>5,03</b>

<b>AMOSTRA LG-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,9	1,9
Desareado	95,36	2,0	1,91
Rejeito do Desareado	4,64	1,9	0,09
Centrifugado	81,34	1,8	1,46
Rejeito do Centrifugado	14,02	2,1	0,29
Separador Magnético	76,43	1,8	1,38
Rejeito do SM	4,91	2,1	0,10
Produto	76,43	1,8	1,38
Alimentação – Produto =			<b>0,52</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,49</b>
Diferença no balanço (%)			<b>7,36</b>

<b>AMOSTRA LI-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,7	1,7
Desareado	92,85	1,8	1,67
Rejeito do Desareado	7,15	1,3	0,09
Centrifugado	76,71	1,6	1,23
Rejeito do Centrifugado	16,14	1,9	0,31
Separador Magnético	74,16	1,7	1,26
Rejeito do SM	2,55	1,9	0,05
Produto	74,16	1,7	1,26
Alimentação – Produto =			<b>0,44</b>
$\Sigma$ Rejeitos =			<b>0,45</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-2,00</b>

<b>AMOSTRA LJ-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	2,0	2,0
Desareado	93,51	2,2	2,06
Rejeito do Desareado	6,49	2,0	0,13
Centrifugado	80,32	2,1	1,69
Rejeito do Centrifugado	13,19	2,5	0,33
Separador Magnético	75,26	2,0	1,51
Rejeito do SM	5,06	2,9	0,15
Produto	75,26	2,0	1,51
Alimentação – Produto =			<b>0,49</b>
$\Sigma$ Rejeitos =			<b>0,61</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-22,53</b>

**Quadros com balanços de massas e teores de TiO<sub>2</sub> nas 11 amostras beneficiadas.**

<b>AMOSTRA LA-AM2</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,3	1,3
Desareado	94,12	1,4	1,32
Rejeito do Desareado	5,88	1,5	0,09
Centrifugado	81,57	1,1	0,9
Rejeito do Centrifugado	12,55	2,7	0,34
Separador Magnético	76,09	1,1	0,84
Rejeito do SM	5,48	2,0	0,11
Produto	76,09	1,1	0,84
Alimentação – Produto =			<b>0,46</b>
$\Sigma$ Rejeitos =			<b>0,54</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-15,9</b>

<b>AMOSTRA LB-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,7	1,7
Desareado	94,38	2,1	1,98
Rejeito do Desareado	5,62	2,3	0,13
Centrifugado	79,56	1,3	1,03
Rejeito do Centrifugado	14,82	3,9	0,58
Separador Magnético	70,6	1,3	0,92
Rejeito do SM	8,96	1,8	0,16
Produto	70,6	1,3	0,92
Alimentação – Produto =			<b>0,78</b>
$\Sigma$ Rejeitos =			<b>0,87</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-11,03</b>

<b>AMOSTRA LC-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,8	1,8
Desareado	91,98	2,1	1,93
Rejeito do Desareado	8,02	2,2	0,18
Centrifugado	71,55	1,4	1,0
Rejeito do Centrifugado	20,43	3,6	0,74
Separador Magnético	67,97	1,4	0,95
Rejeito do SM	3,58	2,6	0,09
Produto	67,97	1,3	0,88
Alimentação – Produto =			<b>0,92</b>
$\Sigma$ Rejeitos =			<b>1,01</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-9,67</b>

<b>AMOSTRA LC-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,2	1,2
Desareado	93,97	1,2	1,13
Rejeito do Desareado	6,03	2,7	0,16
Centrifugado	80,65	1,0	0,81
Rejeito do Centrifugado	13,32	2,1	0,28
Separador Magnético	75,64	1,0	0,76
Rejeito do SM	5,01	1,7	0,09
Produto	75,64	1,0	0,76
Alimentação – Produto =			<b>0,44</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,53</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-18,97</b>

<b>AMOSTRA LD-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,1	1,1
Desareado	91,78	1,3	1,19
Rejeito do Desareado	8,22	1,0	0,08
Centrifugado	74,01	1,0	0,74
Rejeito do Centrifugado	17,77	2,0	0,36
Separador Magnético	73,29	0,9	0,66
Rejeito do SM	0,72	4,5	0,03
Produto	73,29	,09	0,66
Alimentação – Produto =			<b>0,44</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,47</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-6,7</b>

<b>AMOSTRA LD-AM4</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,5	1,5
Desareado	90,34	1,6	1,45
Rejeito do Desareado	9,66	1,7	0,16
Centrifugado	77,12	1,1	0,85
Rejeito do Centrifugado	13,22	3,8	0,5
Separador Magnético	71,49	1,1	0,79
Rejeito do SM	5,64	1,8	0,1
Produto	71,49	1,1	0,79
Alimentação – Produto =			<b>0,71</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,77</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-7,61</b>

<b>AMOSTRA LE-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,9	1,9
Desareado	77,72	2,1	1,63
Rejeito do Desareado	22,28	3,5	0,78
Centrifugado	63,58	1,2	0,76
Rejeito do Centrifugado	14,14	4,0	0,57
Separador Magnético	59,44	1,0	0,59
Rejeito do SM	4,15	2,1	0,09
Produto	59,44	0,9	0,53
Alimentação – Produto =			<b>1,37</b>
Σ Rejeitos =			<b>1,43</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-4,93</b>

<b>AMOSTRA LF-AM4</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,6	1,6
Desareado	93,01	1,7	1,58
Rejeito do Desareado	6,99	1,6	0,11
Centrifugado	74,16	1,2	0,89
Rejeito do Centrifugado	18,85	4,1	0,77
Separador Magnético	69,09	1,2	0,83
Rejeito do SM	5,06	2,7	0,14
Produto	69,09	1,1	0,76
Alimentação – Produto =			<b>0,84</b>
Σ Rejeitos =			<b>1,02</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-21,62</b>

<b>AMOSTRA LG-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,2	1,2
Desareado	95,36	1,4	1,34
Rejeito do Desareado	4,64	1,3	0,06
Centrifugado	81,34	1,0	,081
Rejeito do Centrifugado	14,02	2,6	,036
Separador Magnético	76,43	1,0	0,76
Rejeito do SM	4,91	1,5	0,07
Produto	76,43	1,0	0,76
Alimentação – Produto =			<b>0,44</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,5</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-14,41</b>

<b>AMOSTRA LI-AM1</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,0	1,0
Desareado	92,85	1,2	1,11
Rejeito do Desareado	7,15	0,79	0,06
Centrifugado	76,71	0,9	0,69
Rejeito do Centrifugado	16,14	1,8	0,29
Separador Magnético	74,16	0,9	0,67
Rejeito do SM	2,55	1,6	0,04
Produto	74,16	0,9	0,67
Alimentação – Produto =			<b>0,33</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,39</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-16,61</b>

<b>AMOSTRA LJ-AM3</b>	<b>Unidade de Massa</b>	<b>Teor TiO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>TiO<sub>2</sub> contido</b>
Alimentação	100,00	1,2	1,2
Desareado	93,51	1,4	1,31
Rejeito do Desareado	6,49	1,4	0,09
Centrifugado	80,32	1,1	0,88
Rejeito do Centrifugado	13,19	2,5	0,33
Separador Magnético	75,26	1,0	0,75
Rejeito do SM	5,06	1,9	0,1
Produto	75,26	1,0	0,75
Alimentação – Produto =			<b>0,45</b>
Σ Rejeitos =			<b>0,52</b>
Diferença no balanço (%)			<b>-15,51</b>