

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

**Título: Caracterização de amostras de bauxita visando a  
aplicação de métodos de concentração gravítica**

Autor: Diego de Souza Arenare

Orientador: Armando Corrêa de Araujo

Belo Horizonte, Março de 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Diego de Souza Arenare

CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DE BAUXITA VISANDO A APLICAÇÃO DE  
MÉTODOS DE CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Tecnologia Mineral  
Orientador: Prof. Armando Corrêa de Araujo

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2009

Para meus pais,  
Demétrio e Vera  
e minha esposa Aline,  
com muito carinho.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de nestas palavras agradecer a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. De fato, foram muitos os que colaboraram, seja com idéias, seja com trabalho “sujo”, seja com o apoio e carinho constante dos que nos amam.

Agradeço ao Prof. Armando por toda orientação e ajuda dada não somente para a realização deste trabalho, mas também para a minha formação como profissional e ser humano.

Aos professores Paulo Viana, Paulo Brandão, Toninho e Luis Cláudio pelos conselhos e dicas.

Agradeço a todos os amigos que tenho na Escola de Engenharia. Às amigas Aline e Otávia, pela partilha e amizade durante estes dois anos. Aos funcionários Ricardo, Izabel, Andréia, Ilda, Patrícia, Alberto, Claudia e Nilce, que sempre estiveram prontos a ajudar.

Ao Itamar, pela ajuda com a análise de imagens.

Ao aluno Henrique Gonçalves que ajudou na preparação das amostras.

À Alcoa, pelo fornecimento da bolsa de pesquisa, em especial à Eng.<sup>ra</sup> Diana Martins, pela disponibilidade em ajudar.

Em especial, agradeço muito a minha família, que não se limitou em estar presente em todos os momentos, alegres ou difíceis, que vivi neste período, mas que também se dispôs a ajudar, seja na preparação de amostras, seja na montagem de equipamentos. Agradeço minha mãe Vera, meu pai Demétrio, meus irmãos Matheus e Bruna. Agradeço à minha esposa Aline, por todo o carinho, paciência e amor que sempre teve para comigo.

Agradeço a Deus, que me permitiu chegar até este ponto, me conduzindo e colocando pessoas muito especiais no meu caminho.

## SUMÁRIO

Capítulo 1 : Introdução .....	16
Capítulo 2 : Objetivos .....	18
Capítulo 3 : Revisão Bibliográfica.....	19
3.1- Bauxita .....	19
3.1.1 – Mineralogia.....	19
3.1.2 – Geologia.....	21
3.1.3 - Reservas.....	26
3.1.4 - Lavra .....	28
3.1.5 - Beneficiamento mineral.....	29
3.1.6 - Processo Bayer.....	34
3.1.7 - Situação atual das reservas e tendências futuras .....	37
3.2- Concentração Gravítica .....	37
3.2.1 - Introdução geral sobre métodos de concentração.....	37
3.2.2 - Concentração gravítica .....	39
3.2.3 – Jigue .....	41
3.2.4 - Espirais concentradoras.....	42
3.3 - Histórico dos Estudos de Concentração de Bauxitas.....	44
Capítulo 4 : Metodologia .....	51
4.1 - Amostras estudadas .....	51
4.2 - Caracterização tecnológica.....	51
4.2.1 – Análise Granulométrica .....	51

4.2.2 – Espectrometria de Fluorescência de raios-x.....	51
4.2.3 - Difratometria de raios-x.....	52
4.2.4 – Análise química semi-quantitativa por EDS.....	52
4.2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS).....	52
4.2.6 – Microscopia Óptica de Luz Refletida .....	53
4.2.7 – Porosimetria de Condensação Gasosa, Densidade e Área Superficial Específica Por Isotherma de Adsorção do Tipo BET.....	53
4.2.8 – Análise de Imagens pelo programa LibMim® .....	53
4.3 - Ensaio de concentração.....	54
4.3.1 – Jigue .....	54
4.3.2 – Espiral .....	55
4.4 – Preparação das amostras.....	58
Capítulo 5 : Resultados e Discussão.....	62
5.1 – Análise granulométrica e análise química .....	62
5.2 – Difração de Raios-x .....	66
5.3 – Separação Magnética .....	68
5.5 – MEV/EDS e Microscopia Óptica.....	72
5.5.1- Bauxita Nodular.....	72
5.5.2- Laterita.....	85
5.5.3- Bauxita Maciça in Natura .....	97
5. – Testes de concentração.....	109
Capítulo 6 : Conclusões .....	116
Capítulo 7 : Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Características dos diversos tipos de bauxitas (Sampaio, 2001). .....	17
Tabela 3.1: Propriedades dos minerais majoritários encontrados em bauxitas.....	20
Tabela 3.2: Minerais de ganga secundários encontrados em bauxitas.....	21
Tabela 3.3: Distribuição mundial das reservas de bauxita .....	27
Tabela 3.4: Métodos de concentração e seus principais equipamentos (Peres e Araujo, 2003).....	38
Tabela 3.5: Métodos de concentração e suas faixas granulométricas de aplicação ....	39
Tabela 3.6: Resultados dos testes de concentração gravítica de Gandrud e De Vaney (1929).....	46
Tabela 3.7: Resultados de flotação direta com oleato de sódio, óleo de máquina e sulfeto de sódio. ....	47
Tabela 3.8: Resultados de concentração de bauxitas cársticas por meio denso e separação magnética. ....	48
Tabela 3.9: Testes de flotação reversa de bauxitas chinesas, Wang et all (2004) .....	49
Tabela 3.10: Testes de flotação reversa com minério da CBA – Zona da Mata Mineira .....	50
Tabela 4.1: Posição dos desviadores .....	57
Tabela 5.1: Resultados da Espectrometria de Fluorescência de raios-x.....	63
Tabela 5.2: Resultados da análise química por EDS para as diferentes faixas de tamanho .....	64
Tabela 5.3: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de bauxita nodular .....	66
Tabela 5.4: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de laterita.....	67

Tabela 5.5: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de bauxita maciça in natura.....	67
Tabela 5.6: Resultados da separação magnética em tambor de terras raras. ....	69
Tabela 5.7: Porosidade e superfície específica das amostras obtidas na separação magnética. ....	70
Tabela 5.8: Densidades obtidas pela picnometria a gás, picnometria a água e critério de concentração para as faixas granulométricas.....	71
Tabela 5.9: Resultados dos testes de concentração em jigue e espiral.....	115

### Lista de Figuras

Figura 3.1: Série de mobilidade iônica.....	22
Figura 3.2: Horizontes em um perfil de alteração de um típico depósito de bauxita laterítica (Sugden -1984).....	25
Figura 3.3: Bauxita nodular ( <a href="http://geology.com/minerals/bauxite.shtml">http://geology.com/minerals/bauxite.shtml</a> ) .....	26
Figura 3.4: Distribuição geográfica das reservas de bauxita.....	27
Figura 3.5: Distribuição da produção brasileira de bauxita .....	28
Figura 3.6: Esquema geral do método de lavra em tiras.....	29
Figura 3.7: Fluxograma de processo de minério bauxítico da MRN, em Porto Trombetas.....	31
Figura 3.8: Fluxograma de processo de minério bauxítico de Juruti, Alcoa. ....	31
Figura 3.9: resultados de processamento de perfis de bauxitas com camada laterítica estreita (a) e com camada laterítica espessa (b) da região de Trombetas (Greig, 1978). .....	33
Figura 3.10: Fluxograma apresentando o ciclo do processo Bayer (Sampaio et al, 2005).....	36
Figura 3.11: Limite de aplicabilidade para os métodos de concentração gravítica.....	40

Figura 3.12: Esquema de separação em um jigge (Sampaio e Tavares, 2005).....	42
Figura 3.13: Mecanismo de separação em uma espiral. ....	43
Figura 4.1: Jigge utilizado nos testes. ....	54
Figura 4.2: Espiral Modelo WW6E da Roche Mining utilizada nos testes. ....	55
Figura 4.3: Esquema da montagem utilizada na realização dos testes de concentração. .....	56
Figura 4.4: Britagem primária e secundária. ....	58
Figura 4.5: Separação por tamanho das alíquotas para realização dos testes de concentração: (a) corte em -0,425 +0,075mm; (b) corte em -0,815 +0,212mm .....	59
Figura 4.6: Separação de amostras para caracterização .....	60
Figura 4.7: Separador magnético de tambor de terras raras com campo de 7500Gauss, da Inbras. ....	61
Figura 4.8: Esquema da separação magnética .....	61
Figura 5.1: Distribuição Granulométrica .....	62
Figura 5.2: Distribuição acumulada dos óxidos de alumínio, silício, titânio e ferro. ....	65
Figura 5.3: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – Geral .....	73
Figura 5.4: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – detalhe da partícula 1 .....	73
Figura 5.5: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – partícula mista contendo quatro fases .....	74
Figura 5.6: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,2125mm) – Partícula contendo cristal euédrico de hematita. ....	74
Figura 5.7: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício.....	75
Figura 5.8: Bauxita Nodular - (-0,425 + 0,075mm) – Geral .....	76
Figura 5.9: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) – Detalhe da partícula 2 .....	77

Figura 5.10: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) – Detalhe da partícula 3 .....	77
Figura 5.11: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) - Partícula mista .....	78
Figura 5.12: Bauxita Nodular : (-0,425 + 0,075mm) - Partícula com alto teor de ferro	78
Figura 5.13: Bauxita Nodular: (-0,425 + 0,075mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício .....	79
Figura 5.14: Análise de imagem da fração -0,815 +0,212mm da Bauxita nodular. ....	80
Figura 5.15: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Nodular (a) +0,815 mm ; (b) -0,840 +0,600mm e (c) -0,600 +0,425mm. ....	82
Figura 5.16: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Nodular (a) -0,425 + 0,212 mm ; (b) -0,212 +0,150mm e (c) -0,150 +0,075mm. ....	83
Figura 5.17: Liberação das espécies em imagens de MEV. ....	84
Figura 5.18: Estrutura nodular presente na amostra -0,815+0,600mm.....	85
Figura 5.19: Laterita (-0,815 + 0,2125mm) – Geral.....	86
Figura 5.20: Laterita (-0,815 + 0,2125mm) – Detalhe da partícula 1 .....	86
Figura 5.21: Laterita (-0,815 +0,2125mm) – Detalhe da partícula 2.....	87
Figura 5.22: Laterita (-0,815 + 0,212mm) – Detalhe da partícula 3.....	87
Figura 5.23: Laterita (-0,815 + 0,212mm) - Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício.....	88
Figura 5.24: Laterita (-0,425+ 0,075mm) - Geral .....	89
Figura 5.25: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Detalhe da partícula 1.....	89
Figura 5.26: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Detalhe da partícula 2.....	90
Figura 5.27: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Partícula 3 – goethita.....	90
Figura 5.28: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – partícula de anatásio. ....	91

Figura 5.29: Laterita (-0,425 + 0,075mm) - Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício.....	91
Figura 5.30: Análise de imagem da fração -0,815 +0,212mm da amostra <i>Laterita</i> . ....	92
Figura 5.31: Análise de imagem da fração -0,425 +0,075mm da amostra <i>Laterita</i> . ....	93
Figura 5.32: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Laterita (a) +0,840 mm ; (b) -0,840 +0,600mm e (c) -0,425 +0,212mm. ....	94
Figura 5.33: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Laterita (a) -0,212 + 0,150mm ; (b) e (c) detalhe de partícula mista contendo argilas e hematita + goethita na fração -0,425 + 0,212mm e -0,212 + 0,150mm.....	95
Figura 5.34: Laterita - Liberação das espécies em imagens de MEV. ....	96
Figura 5.35: Estrutura nodular de partículas da fração +0,815mm da amostra <i>Laterita</i> . ....	96
Figura 5.36: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,815 + 0,2125mm) – Geral .....	98
Figura 5.37: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,815 + 0,2125mm) – detalhe da partícula 1.	98
Figura 5.38: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,815 + 0,2125mm) – partícula de gibbsita com agregado de caulinita.....	99
Figura 5.39: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,815 +0,2125mm) – Agregado de gibbsita e goethita. ....	99
Figura 5.40: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,815 + 0,212mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício. ....	100
Figura 5.41: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,425 + 0,075mm) – Geral. ....	101
Figura 5.42: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,425 + 0,075mm) – Geral .....	101
Figura 5.43: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,425 + 0,075mm) – Geral. ....	102
Figura 5.44: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,425 + 0,075mm) – presença de sílica no ton mais claro da partícula. ....	102
Figura 5.45: Bauxita Maciça <i>in Natura</i> (-0,425 + 0,075mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício. ....	103

Figura 5.46: Análise de imagem da fração -0,815 +0,212mm da amostra <i>Bauxita Maciça in natura</i> .....	104
Figura 5.47: Análise de imagem da fração -0,425 +0,075mm da amostra <i>Bauxita Maciça in natura</i> .....	104
Figura 5.48: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de <i>Bauxita Maciça in Natura</i> (a) +0,840 mm; (b) -0,840 +0,600mm e (c) -0,425 +0,212mm. ....	105
Figura 5.49: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de <i>Bauxita Maciça in Natura</i> (a) -0,425 + 0,212 mm ; (b) -0,212 +0,150mm e (c) -0,150 +0,075mm. ....	106
Figura 5.50: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de <i>Maciça in Natura</i> (a) -0,840 +0,600mm e (b) -0,212 +0,150mm. ....	107
Figura 5.51: <i>Bauxita Maciça in natura</i> - Liberação das espécies em imagens de MEV. ....	108
Figura 5.52: Recuperação mássica (a) e recuperação de óxidos (b) para os testes em Jigue. ....	109
Figura 5.53: Comparação entre os teores de alumina na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....	110
Figura 5.54: Comparação entre os teores de óxido de ferro na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....	110
Figura 5.55: Comparação entre os teores de sílica na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....	111
Figura 5.56: Recuperação mássica do concentrado das três amostras para os testes em espiral. ....	111
Figura 5.57: Recuperação de óxidos no concentrado das três amostras para os testes em espiral. ....	112
Figura 5.58: Comparação entre os teores de alumina na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....	113

Figura 5.59: Comparação entre os teores de óxido de ferro na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....113

Figura 5.60: Comparação entre os teores de sílica na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras. ....114

## RESUMO

A rocha “bauxita” (bauxito) compõe-se de uma mistura complexa de minerais de alumínio, sendo os mais importantes a gibbsita  $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ , o diásporo  $\alpha\text{-AlO(OH)}$  e a boehmita  $\gamma\text{-AlO(OH)}$  e de outros óxidos e silicatos. Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio e suas proporções na rocha variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade de impurezas (óxidos de ferro – hematita e goethita; aluminossilicatos – caulinita; quartzo, etc.). O processamento mineral dos minérios de bauxita é feito de maneira bastante simplificada, consistindo em britagem e posterior lavagem para a retirada da lama que contém grande parte dos minerais contaminantes, especialmente os aluminossilicatos (sílica reativa). A obtenção da alumina com alto grau de pureza é efetuada pelo processo Bayer, que consiste na digestão dos minerais de alumínio, especialmente a gibbsita, tornando-os solúveis e os demais contaminantes insolúveis.

Atualmente as empresas mineradoras de vários setores (ferrosos, metais básicos, minerais industriais) têm voltado sua atenção para a diminuição das reservas minerais de alto teor, e para a necessidade de se aproveitar minérios até o momento considerado como marginais. Como tal, as empresas que produzem alumínio também têm buscado o aproveitamento de partes de seus depósitos até então considerados estéreis.

Amostras de três diferentes níveis de um depósito de bauxita (bauxita nodular, laterita e bauxita maciça in natura), provenientes da mina de Juruti da Alcoa (PA), foram caracterizadas com foco em se aplicar separação gravítica no processo de concentração. Os resultados mostraram que existe certa correlação entre a presença de sílica e ferro nas tipologias bauxita nodular e laterita. Isso é interessante para que ocorra redução no teor de sílica reativa nas amostras mediante retirada da fração rica em ferro. Entretanto, o critério de concentração gravítica das frações estudadas se mostrou bem próximos ao limite de aplicação dos métodos gravíticos para as três tipologias, indicando a dificuldade de separação entre as fases. Testes realizados em jigge não apresentaram resultados satisfatórios, enquanto testes em espiral concentradora mostraram ganhos no teor de alumina e na relação alumina/sílica para a bauxita nodular e a laterita.

*Palavras chave: bauxita, concentração gravítica, caracterização tecnológica.*

## ABSTRACT

Bauxite Rock is a impure mixture of aluminum minerals, being gibbsite -  $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ , diaspore -  $\alpha\text{-AlO(OH)}$  and bohemite -  $\gamma\text{-AlO(OH)}$  the most importants. These minerals are aluminum oxi-hydroxes and their proportions in the rock are very variable, just as the kind and quantity of impurities (iron oxides – hematite and goethite; aluminossilicates – kaolinite; quartz, etc. Bauxite dressing is done by a much simple way, consisting of crushing and washing to withdraw the mud, which contains most part of aluminossilicates (reactive silica). High grade alumina is obtained by the Bayer process, which consists in the digestion of aluminum minerals, especially gibbsite. The latter becomes soluble while the other contaminants are insoluble at very alkaline pH conditions prevalent in the Bayer process reactors.

Currently, mining companies of various sectors (iron, basic metals, industrial minerals) has turned their attention to the decrease of quality of mineral reserves, and the necessity of exploring low grade reserves, taken as marginal deposits until the moment. Aluminum producers are, in the same way, looking for process routes which could allow the profit of beds of bauxite deposits considered inappropriate for Bayer process until now.

Samples of three different levels of a bauxite deposit (nodular bauxite, laterite and Massive bauxite *in natura*) owned by Alcoa (Juruti-PA), were characterized aiming application of gravity concentration. Results showed a correlation in particles between presence of silicon and iron in nodular bauxite and laterite samples. This is relevant once silicon content could reduce through removing iron rich fraction. However, gravity concentration criteria showed values close to application limit, indicating difficulty of separation. Jig tests did not showed good results, while spiral tests showed improvements in alumina grade and in relation alumina/silicon for nodular bauxite and laterite.

*Key words: bauxite, gravity concentration, technologic characterization.*

## Capítulo 1 : Introdução

A rocha bauxita (ou bauxito) é a principal matéria prima utilizada na indústria de alumínio, sendo cerca de 95% da produção mundial dessa rocha aplicados à produção de alumina (Mártires, 2001). Sua descoberta se deu em 1821, em um vilarejo francês chamado Les Baux, por um renomado químico Francês, M. Berthier. Ao analisar um solo avermelhado da região, o qual se acreditava ser algum tipo de argilomineral ferruginoso, verificou que este era constituído principalmente por hidróxidos de alumínio e óxidos e hidróxidos de ferro, sem nenhuma presença aparente de sílica e, por isso, não sendo argilominerais (Gandrud e De Vaney, 1929).

Os principais minerais que compõem a bauxita são a gibbsita  $\alpha\text{-Al(OH)}_3$ , o diásporo  $\alpha\text{-AlO(OH)}$  e a boehmita  $\gamma\text{-AlO(OH)}$ . Esses minerais são conhecidos como oxi-hidróxidos de alumínio e suas proporções na rocha variam muito entre os depósitos, bem como o tipo e a quantidade de impurezas (óxidos de ferro, argila, sílica, etc). A maioria das bauxitas, economicamente aproveitáveis possui um conteúdo de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre 50-55% e o teor mínimo para que ela seja aproveitável é da ordem de 30% (Sampaio\* et all, 2005). Óxidos de ferro, óxidos de titânio e aluminossilicatos também se encontram associados a estes minerais.

Em termos de aplicação industrial, a bauxita pode ser dividida em dois tipos, apresentados abaixo:

- Bauxita de grau metalúrgico: usada na produção de alumínio metálico. Apresenta maior proporção de gibbsita.
- Bauxita de grau não metalúrgico: empregadas em diversas áreas da indústria, como refratários, abrasivos, cimentos, indústria química (principalmente na produção de sulfato de alumínio) e outros. Apresenta maior proporção de diásporo.

Na Tabela 1.1 são apresentadas as principais especificações químicas nos diferentes tipos de bauxita.

Tabela 1.1: Características dos diversos tipos de bauxitas (Sampaio, 2001).

Composição(%)	Metalúrgica	Refratária	Cimentos	Ind. Química	Abrasivos
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45 a 55	Min. 85	45 a 55	40 a 60	80 a 88
SiO <sub>2</sub>	0 a 15	Máx. 11	Máx. 6	5 a 18	Máx. 5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 30	Máx. 2,5	20 a 30	Máx. 4	2 a 5
TiO <sub>2</sub>	0 a 6	Máx. 3,5	2 a 4	0 a 6	2 a 5

O crescente aumento da demanda por alumínio pelo mercado mundial e a exaustão de reservas de alto teor são fatores que levam à busca por novos métodos de concentração para a bauxita de grau metalúrgico, que permitam o aproveitamento de minérios considerados marginais pelo seu teor elevado de caulinita ou ferro. Atualmente, o processamento de bauxitas de grau metalúrgico consiste apenas em britagem, peneiramento e classificação.

A jazida de Juruti, localizada no extremo oeste do estado do Pará, apresenta uma reserva de 700 milhões de toneladas, além de áreas consideráveis de bauxitas marginais, que poderiam aumentar significativamente o tempo de vida útil da mina.

A concentração por métodos gravíticos, baseada na diferença de densidade entre gibbsita e os minerais de ferro, e a diferença de forma entre a gibbsita e a caulinita, e as possíveis associações entre os minerais pode ser uma opção para o aproveitamento de bauxitas de baixa qualidade. As espirais concentradoras, devido ao seu baixo custo de investimento e o baixo custo operacional, serão testadas e avaliadas, neste trabalho, como método de concentração para bauxitas.

## Capítulo 2 : Objetivos

Este trabalho tem por objetivo caracterizar três tipologias de bauxitas presentes num perfil de alteração da jazida de Juruti, no Pará, buscando avaliar a possibilidade de concentração através de métodos gravíticos, como jigue e espiral. Para tal, podem-se considerar os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as fases minerais presentes em cada uma das tipologias;
- Identificar a relação entre os minerais nas partículas e a liberação das fases;
- Identificar a relação entre a densidade das fases;
- Verificar em testes exploratórios em espiral e jigue a aplicabilidade desses métodos.

## Capítulo 3 : Revisão Bibliográfica

### 3.1- Bauxita

Nos tópicos que se seguem serão apresentados os principais aspectos das rochas bauxíticas relativamente à sua formação geológica, mineralogia, reservas minerais e aos processos de beneficiamento mineral e metalúrgico deste minério de alumínio.

#### 3.1.1 – Mineralogia

Os principais minerais componentes da bauxita pertencem à classe dos óxidos e hidróxidos, sendo a estrutura em camadas uma característica desses minerais. Os cátions alumínio possuem coordenação octaédrica (Milovsky e Kononov, 1985). No caso das bauxitas de grau metalúrgico, a gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ou hidrargilito ou trihidrato) e a bohemita  $\alpha$ -( $\text{AlOOH}$ ) são os principais minerais presentes. A presença de diásporo  $\gamma$ -( $\text{AlOOH}$ ) não é desejada em minérios de grau metalúrgico, uma vez que este exige uma temperatura maior para que ocorra a sua solubilização. Além da gibbsita, existem outras formas da alumina trihidratada: a nordstrandita, com ocorrência na Jamaica, e a bayerita, produzida artificialmente.

Bauxitas trihidratadas são aquelas que são compostas predominantemente por gibbsita, podendo conter até 2% de bohemita. Bauxitas monohidratadas são aquelas compostas predominantemente por bohemita, podendo conter alguma fração de diásporo na sua composição. Bauxitas mistas são constituídas primariamente por gibbsita, podendo conter bohemita acima de 2%. Por ser uma mistura de oxihidróxidos de alumínio hidratado, a bauxita não é considerada como uma espécie mineral, e sim como uma rocha. Por esse motivo, em uma classificação rígida, a nomenclatura correta deveria ser bauxito (Dana e Hulbrut, 1969). Entretanto, neste trabalho será utilizada a nomenclatura já consagrada.

Os minerais de ganga majoritários associados às bauxitas são óxidos e/ou hidróxidos de silício, ferro e titânio. Além desses, outros elementos presentes em frações de ppm e que podem causar problemas no processo de obtenção da alumina, também são encontrados. Os principais são: fósforo, arsênio, molibdênio, gálio, cloro, iodo, bromo, potássio, germânio, enxofre, vanádio, flúor e carbono.

Dentre os minerais portadores de silício estão o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), a caulinita e a halloysita, ambos de fórmula  $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ , sendo a diferença os sistemas cristalinos, pois a caulinita tem sistema triclínico e a halloysita sistema monoclinico.

Os minerais portadores de ferro são a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), responsável pela coloração vermelha nas bauxitas, e a goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ). Goethita aluminiana ( $(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) também pode ocorrer e é responsável pela coloração amarelada de algumas bauxitas. O Titânio ocorre na forma de óxido simples ( $\text{TiO}_2$ ) como os minerais rutilo e anatásio (Authier-Martin, 2001). A tabela 3.1 apresenta as principais características dos minerais majoritários presentes na bauxita. Na tabela 3.2 apresenta-se os minerais de ganga minoritários.

Tabela 3.1: Propriedades dos minerais majoritários encontrados em bauxitas

Elementos	Mineral	Composição química	Densidade	Dureza	Sistema Cristalino
Alumínio	Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	2,3-2,4	2,5-3,5	Monoclinico
	Bohemita	$\gamma\text{-AlOOH}$	2,9-3,0	3,5-4,0	Ortorrômico
	Diásporo	$\alpha\text{-AlOOH}$	3,35-3,45	6,5-7	Ortorrômico
Silício	Caulinita/Halloysita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	2,6-2,65	2-2,5	Monoclinico
	Quartzo	$\text{SiO}_2$	2,65	7	Trigonal
Ferro	Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	5,26	5,5-6,5	Trigonal
	Goethita	$\text{FeOOH}$	4,37	5-5,5	Ortorrômico
	Goethita aluminosa	$(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-	-	-
Titânio	Rutilo	$\text{TiO}_2$	4,18-4,25	6-6,5	Tetragonal
	Anatásio	$\text{TiO}_2$	3,9	5,5-6	Tetragonal

Tabela 3.2: Minerais de ganga secundários encontrados em bauxitas

Elementos	Mineral	Composição química
Carbono	-	Matéria orgânica
Fósforo	Crandallita Wavellita	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$ $\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Cálcio	Calcita Crandallita	$\text{CaCO}_3$ $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$
Potássio	Illita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
Manganês	Litioforita	$(\text{Al}, \text{Li})\text{MnO}_2(\text{OH})_2$
Magnésio	Magnesita Dolomita	$\text{MgCO}_3$ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Sódio	Dawsonita	$\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$
Estrôncio	Celestita	$\text{SrSO}_4$
Enxofre	Woodhouseita Pirita	$\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$ $\text{FeS}_2$
Zinco	Gahnita	$\text{ZnAl}_2\text{O}_4$
Cromo	Cromita	$\text{FeCr}_2\text{O}_4$
Vanádio	Schubnelita	$\text{Fe}_2(\text{V}_2\text{O}_8) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Zircônio	Zircão	$\text{ZrSiO}_4$

### 3.1.2 – Geologia

A bauxita é uma rocha residual que é formada intermitentemente pelo processo de intemperismo ao qual a superfície da crosta terrestre está submetida. A concentração residual dos minerais constituintes da bauxita depende de distintos fatores, tais como clima e condições tectônicas.

Os depósitos de bauxita são classificados em três tipos, segundo a sua gênese: Laterítico, cárstico e do tipo Tikhvin. A maioria dos depósitos conhecidos é do tipo laterítico (88%). O tipo cárstico possui cerca de 11,5% e o tipo Tikhvin 0,5% (Meyer, 2004) .

Segundo Toledo et al., 2001, o principal agente de intemperismo químico é a água da chuva, que infiltra e penetra nas rochas. Essa água possui uma grande quantidade de  $\text{O}_2$  dissolvido, que interage com o  $\text{CO}_2$  da atmosfera e do solo, formando ácido carbônico e abaixando assim o pH do sistema. Os constituintes mais solúveis das

rochas vão sendo lixiviados e transportados por essa água que penetra o solo. Os constituintes menos solúveis, também denominados fase residual, permanecem no solo e são progressivamente enriquecidos com a evolução do intemperismo. Essa fase residual pode estar em minerais primários que resistem à ação intempérica ou em minerais secundários que se formam pelo rearranjo das espécies remanescentes.

A facilidade que um elemento tem de ser removido de um mineral pela ação intempérica pode ser dada pela série de mobilidade iônica de Polynov, apresentada na Figura 3.1, a qual é dividida em cinco fases. Em um sistema com alta ação lixiviante, apenas os elementos da fase V permanecem no solo (Birkelano, 1999):

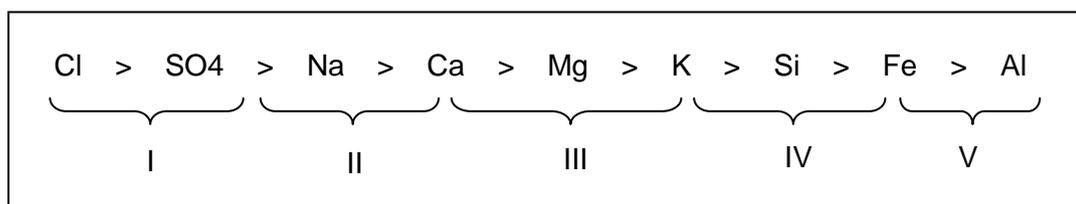


Figura 3.1: Série de mobilidade iônica.

As principais reações de intemperismo químico são: a hidratação, a dissolução, a hidrólise e a oxidação. Dessas, a hidrólise é a reação responsável pela formação de lateritas.

Os silicatos, principais formadores das rochas, podem ser concebidos como sais de um ácido fraco ( $H_4SiO_4$ ) e de bases fortes ( $NaOH$ ,  $KOH$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $Mg(OH)_2$ ). Em contato com água, os silicatos sofrem hidrólise, resultando em uma solução alcalina, pois o  $H_4SiO_4$  está praticamente não-dissociado e as bases muito dissociadas. Em contato com o íon  $H^+$  da solução aquosa, os cátions alcalinos ( $K^+$  e  $Na^+$ ) e alcalino-terrosos ( $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) são deslocados e transportados pela solução. A hidrólise ocorre sempre nas faixas de pH entre 5 e 9. Assim, a estrutura do mineral na interface sólido/solução é rompida e os átomos de Si e Al são liberados na fase líquida, podendo gerar novos minerais. O grau de eliminação dos elementos é o que define a intensidade da hidrólise.

A hidrólise pode ser total ou parcial. Na hidrólise total, os três elementos que compoem o mineral primário, tal como um plagioclásio (Si, Al, Na ou K), são

completamente liberados e aparecem no meio de alteração sob a forma de hidróxidos. Em sistema aberto,  $\text{Si(OH)}_4$  e  $\text{Na(OH)}$  ou  $\text{K(OH)}$  são eliminados completamente. No entanto, o  $\text{Al(OH)}_3$  é insolúvel e acumula-se in situ, sob a forma de hidróxidos de alumínio, tal como a gibbsita (Melfi; Pedro, 1977).



Se as condições de drenagem dos fluidos percolados não forem muito eficientes, parte da sílica dissolvida permanece no sistema e reage com o alumínio residual, formando aluminossilicatos hidratados, também denominados argilominerais. Abaixo é apresentada a reação de formação da caulinita, que ocorre quando 100% do potássio é removido. Se a remoção do potássio for parcial, ocorre a formação da esmectita.



O ferro é acumulado pelo processo de oxidação no qual os íons ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ) presentes em minerais ferro-magnesianos primários, como a biotita, anfibólios, piroxênios e olivinas, são oxidados a  $\text{Fe}^{3+}$  quando em contato com águas ricas em oxigênio dissolvido. Assim ele se precipita como um novo mineral: a hematita ou a goethita.

O ambiente quente e úmido encontrado nas regiões tropicais do globo tem um importante papel na formação dos solos lateríticos característico destes lugares. Isso porque em climas com tais condições, a degradação do material orgânico presente na cobertura dos solos é completa, gerando água e  $\text{CO}_2$ . A presença do  $\text{CO}_2$  no sistema permite que o pH das soluções que percolam o solo estejam na faixa entre 5,5 e 6. Isso favorece bastante o controle da solubilidade dos principais componentes das rochas, especialmente Al, Fe, metais alcalinos e alcalinos terrosos. Em climas secos e frios, a decomposição da matéria orgânica é lenta, levando os solos a terem um caráter ácido acentuado, sendo o meio redutor e complexante. (Melfi et al, 1999)

A figura 3-2, adaptada de Sugden (1984) apresenta um típico perfil de alteração em um depósito de bauxita. O autor divide o perfil em cinco horizontes distintos, dos quais apenas um é lavrável como minério.

O horizonte superior é constituído por uma cobertura argilosa de coloração amarela a amarronzada, formada basicamente por caulinita e gibbsita em uma fração superior a 25%. Como observado na figura 3-2, o teor de gibbsita aumenta com a profundidade, enquanto o de caulinita diminui com a mesma. É uma camada altamente porosa e

permeável, apesar de se argilosa. Não possui estruturas típicas, além de pequenas vesículas que servem de transporte à água. Sua espessura pode variar de 6 a até 15m.

O horizonte denominado bauxita nodular possui alto teor de gibbsita e um teor de caulinita que, apesar de menor do que na cobertura argilosa, não é suficiente para garantir que este horizonte seja considerado minério. É constituído por estruturas na forma de nódulos que se encontram presa em uma matriz argilosa, similar à da cobertura. Ocasionalmente, estes nódulos são cimentados em lentes ou blocos por gibbsita amorfa, ou mais raramente, por óxidos de ferro. Dois tipos de nódulos são possíveis de se encontrar: Um com forma de “feijão” ou “ervilha”, com tamanhos entre 0,5 e 1,5cm; outro em forma de pipoca, com tamanhos superiores a 2cm. Os nódulos podem ser mais aluminosos ou mais ferruginosos, dependendo da altura em que se localiza no perfil. Quanto maior a profundidade, mais ferruginosos eles serão. A figura 3-3 apresenta uma amostra de bauxita nodular. A espessura desta camada pode variar de 2 a 3m.

O próximo horizonte é denominado Bauxita ferruginosa ou laterita. Observa-se a queda acentuada no teor de gibbsita e o aumento no teor de hematita que ocorre neste horizonte. O teor de caulinita também tem um ligeiro aumento. O elevado teor de ferro confere a este horizonte cor escura. Nódulos maiores são observáveis, sendo que estes formam grandes agregados quando cimentados por óxidos de ferro. A espessura desta camada é bastante variável, podendo ter de alguns centímetros a 3m.

No horizonte Bauxita maciça é onde ocorre a maior concentração de gibbsita. Existe ainda presença tanto de óxidos de ferro como de caulinita, mas em uma proporção muito menor. Quartzo pode ser encontrado mais próximo da zona ferruginosa. O topo desta camada é mais massivo e contém pouca argila. À medida que aumenta a profundidade, a camada deixa de ser massiva e passa a se apresentar em blocos, com preenchimento de argila entre eles. A transição para o horizonte saprólito é bastante sutil, e se dá pelo constante aumento na presença de caulinita. Esse horizonte é o maior entre os demais, podendo variar de 3,5 a 5,5m.

No horizonte saprólito, que é o horizonte menos alterado do perfil de intemperismo, tem-se a presença de material argiloso e ainda gibbsita. Algumas das feições da rocha são podem ser observáveis. Não possui importância econômica.

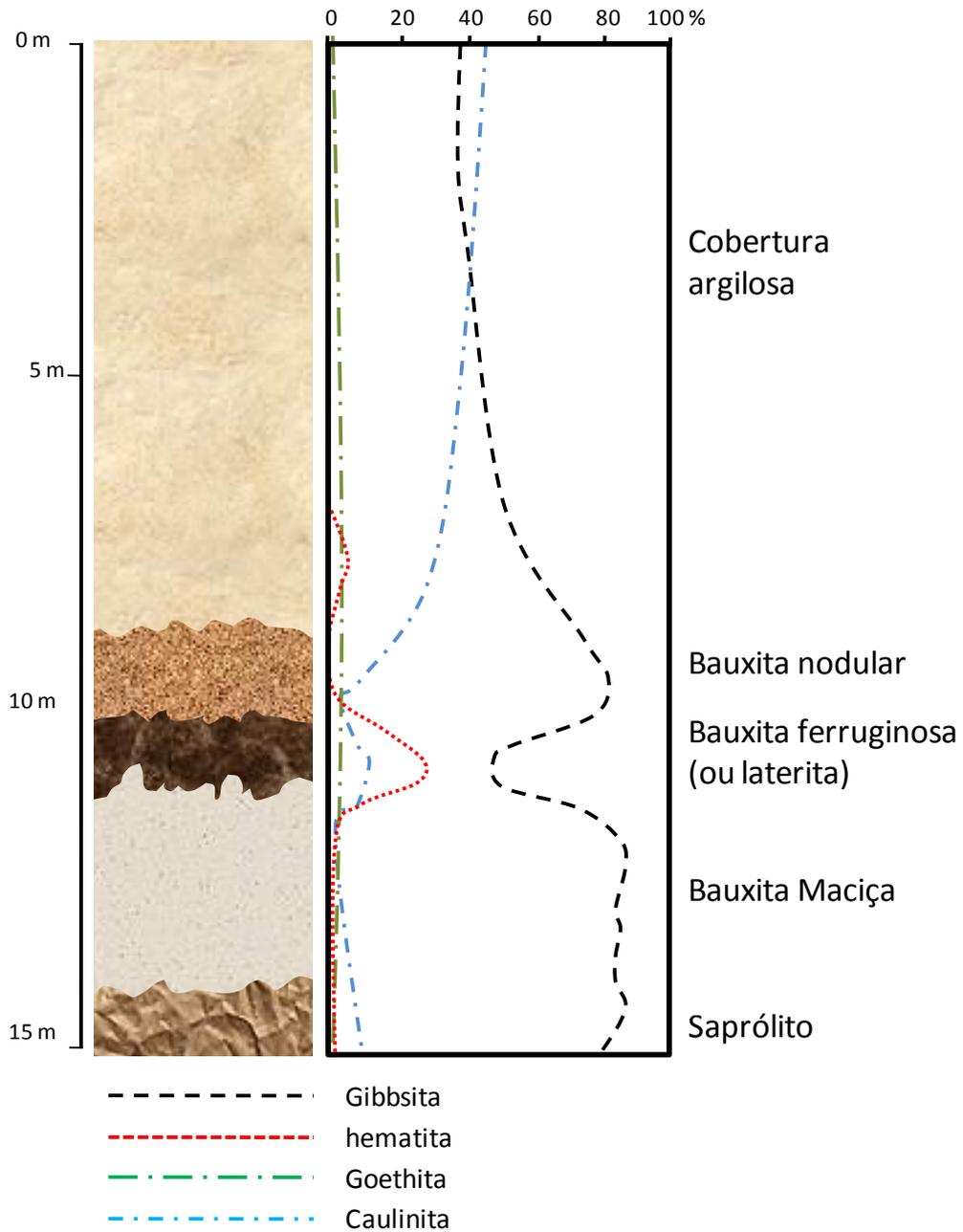


Figura 3.2: Horizontes em um perfil de alteração de um típico depósito de bauxita laterítica (Sugden -1984)



Figura 3.3: Bauxita nodular (<http://geology.com/minerals/bauxite.shtml>)

### 3.1.3 - Reservas

Geograficamente, a maior parte das reservas do mundo encontra-se localizada em regiões tropicais e subtropicais. De acordo com informações do *International Aluminium Institute* (IAI), a bauxita ocorre em três principais tipos de climas, que são apresentadas na figura 3.4: Tropical (57%), o Mediterrâneo (33%) e o Subtropical (10%).

As bauxitas do tipo laterítico se concentram principalmente em províncias minerais de países como Austrália, Caribe, Guianas, Brasil, Guiné e Camarões. As do tipo cárstico se concentram nos países europeus e na Jamaica (Meyer, 2004).

Em 2004, o mundo dispunha de 33,4 bilhões de toneladas (Bt) de reservas de bauxita. O Brasil possuía 2,7 Bilhões de toneladas dessas reservas, o equivalente a 8,3% do total. A distribuição mundial das reservas não é uniforme, apenas seis países detêm 79% dessas reservas. Esses dados são apresentados na Tabela 3.3 (Mártires, 2005). A Figura 3.4, extraída de Meyer (2004) mostra um mapa da distribuição das reservas mundiais no globo em termos de alumina recuperável segundo os dados de 2001.

Tabela 3.3: Distribuição mundial das reservas de bauxita

Países	Reservas ( $10^6$ t)		Produção ( $10^3$ t)		
	2004 (p)	%	2003 (r)	2004 (p)	%
Brasil	2.729	8,3	18.457	20.914	13,4
Austrália	8.700	26,3	55.600	56.000	35,9
China	2.300	7,0	12.500	15.000	9,6
Guiana	900	2,7	1.500	1.700	1,1
Guiné	8.600	26,1	15.500	15.500	9,9
Índia	1.400	4,2	10.000	10.000	6,4
Jamaica	2.500	7,6	13.400	13.500	8,6
Rússia	250	0,8	4.000	5.000	3,2
Suriname	600	1,8	4.220	4.200	2,7
Venezuela	350	1,1	5.200	5.500	3,5
Outros Países	4.671	14,1	5.623	8.686	5,7
<b>TOTAL</b>	<b>33.000</b>	<b>100</b>	<b>146.000</b>	<b>156.000</b>	<b>100</b>

(p) - Dados preliminares

(r) - Dados revisados

Segundo Mártires (2001), cinco estados brasileiros (São Paulo, Pará, Santa Catarina, Minas Gerais e Maranhão) são detentores de reservas de bauxita de grau metalúrgico. Essas reservas encontram-se altamente concentradas geograficamente. Somente no estado de Pará encontram-se 90,8% dessas reservas que, quando somadas às reservas de Minas Gerais, perfazem 98,3%. As reservas (medidas, indicadas e inferidas) desse tipo de bauxita são da ordem de 2,95 bilhões de t, sendo que 80% referem-se às reservas medidas e indicadas.

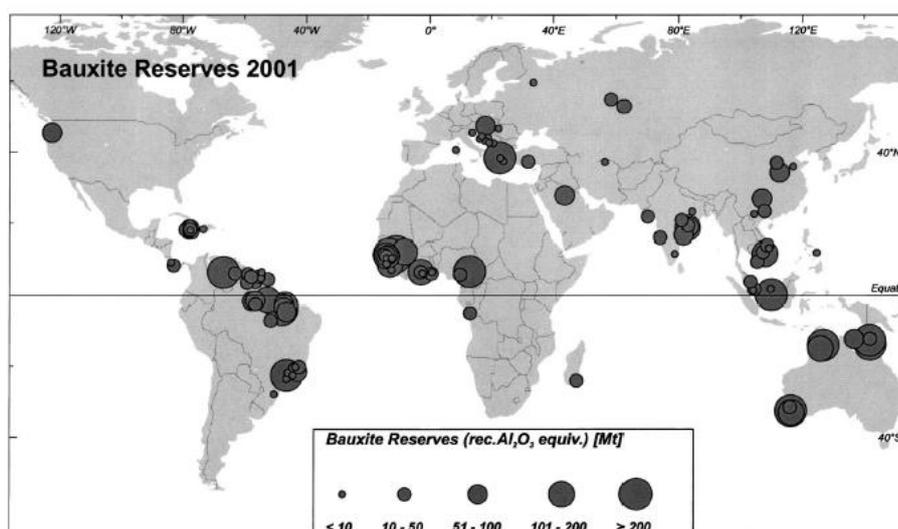


Figura 3.4: Distribuição geográfica das reservas de bauxita

A Figura 3.5 apresenta dados sobre o mercado produtor de bauxita no Brasil. A Mineração Rio do Norte (MRN), Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), Alcoa e Alcan são as empresas produtoras de bauxita de grau metalúrgico. O mercado produtor de bauxita metalúrgica no país é dominado pela MRN, a qual é responsável por 76,6% da produção, seguida pelas empresas CBA (12,6%), Alcoa (4,4%) e Alcan (3,5%), todas produtoras de bauxita para fins metalúrgicos. O restante da produção cabe à MSL Minerais S/A, Mineração Curimbaba S/A e Rio Pomba Mineração S/A, produtoras de bauxita refratária (Mártires, 2001).

Em 2004 o Brasil se consolidou como o 2º maior produtor mundial respondendo por 13,4 % tendo ultrapassado a Guiné já em 2003.

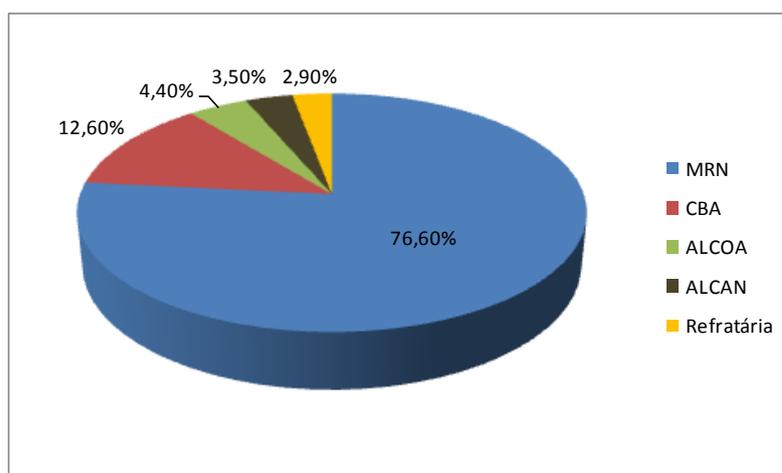


Figura 3.5: Distribuição da produção brasileira de bauxita

### 3.1.4 - Lavra

Em sua maior parte, a lavra de depósitos de bauxita é feita por métodos a céu aberto, em especial o método de lavra em tiras (*strip mining* ou *open cast mining*).

Esse método consiste na retirada da camada de estéril em faixas regulares e a sua deposição nas faixas adjacentes já mineradas. É bastante empregado em depósitos onde as mineralizações possuem forma tabular e disposição horizontal próxima à superfície, tais como carvão, bauxitas e depósitos de fosfato sedimentar (Hartman, 1987). O emprego deste método é favorável para empresas que buscam alta produtividade e por isso é o mais empregado pelas principais empresas produtoras de bauxita com operação no Brasil (MRN, Alcoa, Alcan, CBA).

A Figura 3.6 apresenta um esquema geral da seqüência operacional do método de lavra em tiras para um depósito de carvão.

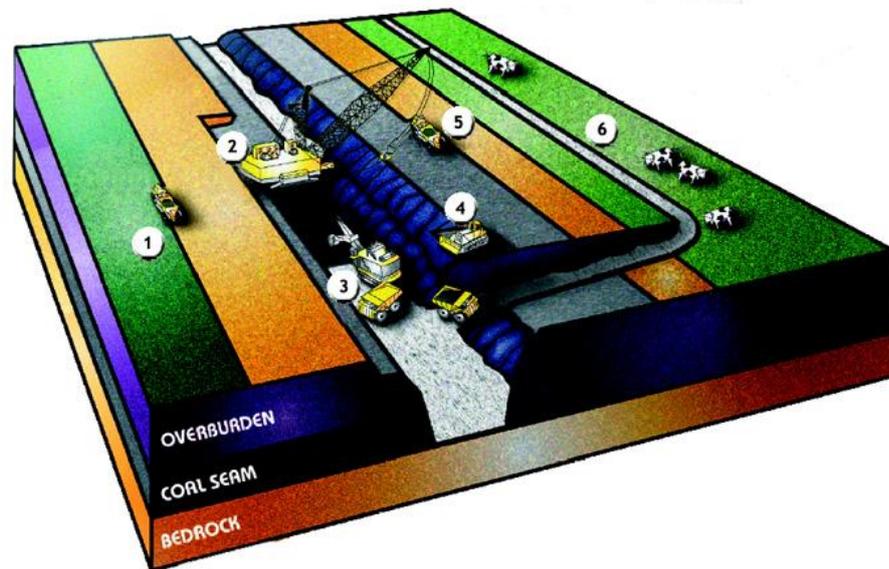


Figura 3.6: Esquema geral do método de lavra em tiras.

As etapas enumeradas consistem de:

- 1 - Retirada da cobertura vegetal e da camada superior do solo, para posterior revegetação;
- 2 - Retirada da camada de estéril, no caso, por uma dragline;
- 3 - Lavra do minério, sendo o desmonte feito por escavadeiras e o transporte por caminhões;
- 4 - Remodelamento topográfico das pilhas do estéril retirados na etapa 2;
- 5 - Deposição do solo, armazenado na etapa 1 e revegetação;
- 6 - Área recuperada.

### 3.1.5 - Beneficiamento mineral

As técnicas comuns para beneficiamento de minérios aplicam-se, parcialmente, aos minérios de bauxita com elevado teor de  $Al_2O_3$ , os quais não exigem processos de tratamento mais elaborados. Além disso, as impurezas de alguns tipos de bauxitas estão associadas aos minerais de alumínio, dificultando a purificação por meio mecânico, ou mesmo, inviabilizando economicamente o processo de remoção das

impurezas. Segundo Chaves et al. (2007), a prática de preparação de bauxitas para alimentar o processo Bayer (peneiramento e classificação) é realizada apenas no Brasil. Em outros países, os minérios mais ricos são diretamente alimentados nas plantas de refinamento.

Mesmo assim, os métodos de beneficiamento de minérios usados no processamento dos minérios de bauxita incluem: britagem, desagregação em lavadores rotativos, classificação em peneiras e hidrociclones e filtragem da fração mais fina. Para a maioria dos depósitos atualmente em lavra no Brasil, a remoção da fração abaixo de  $38\mu\text{m}$  é suficiente para a obtenção de um produto dentro das especificações requeridas pelo processo Bayer. É comum o processo de beneficiamento mineral da bauxita ser denominado apenas por lavagem.

A Figura 3.7 apresenta o circuito de beneficiamento realizado pela Mineração Rio do Norte (MRN) em Porto Trombetas, no estado do Pará. O Run of Mine passa por dois britadores de rolos que promovem a adequação do material para as etapas posteriores, formando uma pilha pulmão para alimentar o circuito de lavagem. O material segue para um "trommel" (peneira rotativa), que realiza a desagregação do mesmo. A fração mais fina segue para a classificação em peneiras vibratórias e a fração mais grossa é novamente cominuída em um britador de rolos e classificada em peneira vibratória. O material retido nas peneiras segue para a pilha de produto final, enquanto o material passante segue para a classificação em hidrociclones. A hidrociclonação é composta por quatro etapas, sendo duas de finos e duas de ultrafinos. O overflow das duas baterias de finos alimenta as baterias de ultrafinos, cujo overflow é o rejeito final, descartado com cerca de 10% de sólidos. O underflow das segundas baterias de hidrociclones tanto de finos quanto de ultrafinos seguem para um filtro de esteira para aumento de % de sólidos e são encaminhados para a pilha de produto final (Falcucci, 2007).

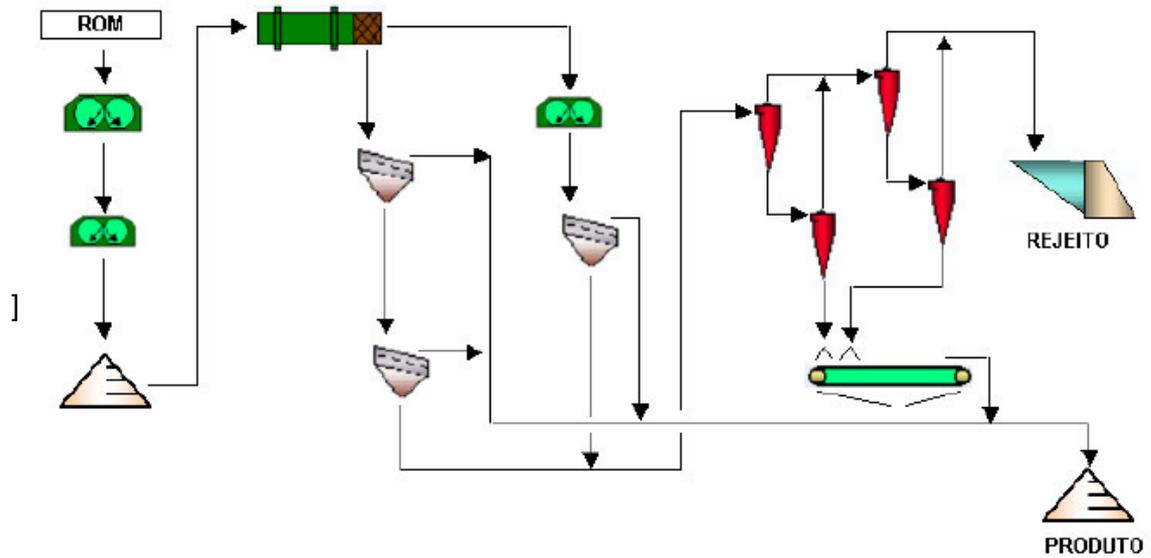


Figura 3.7: Fluxograma de processo de minério bauxítico da MRN, em Porto Trombetas

A Figura 3.8 apresenta o fluxograma de processo do minério de Juruti, projeto da Alcoa Inc. em fase de implantação no oeste do Pará. Observa-se que existem diferenças em relação ao fluxograma da MRN apenas quanto ao fluxo dos produtos do peneiramento.

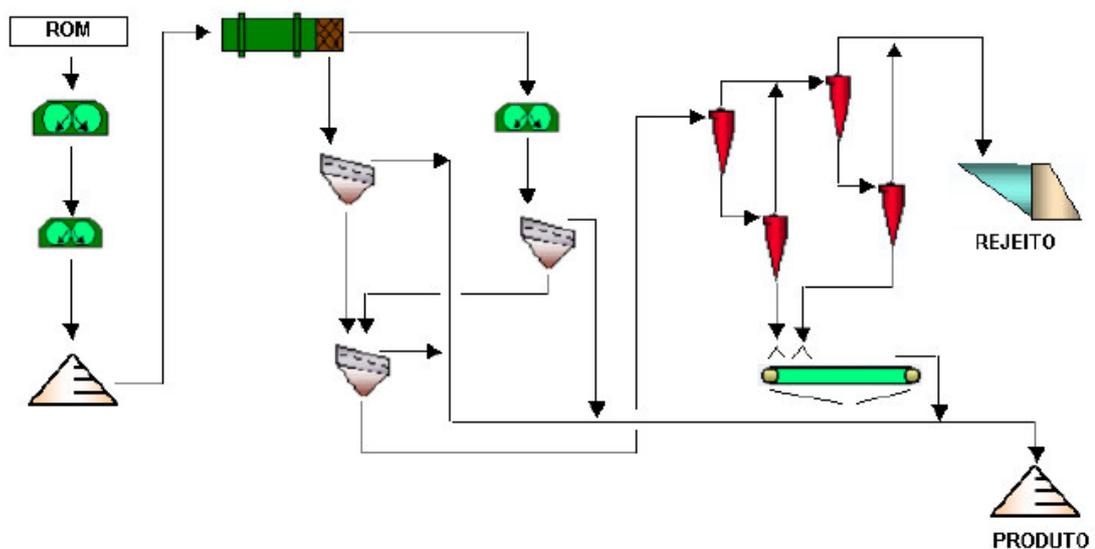


Figura 3.8: Fluxograma de processo de minério bauxítico de Juruti, Alcoa.

O trabalho de Greig (1978) apresenta um estudo relativo a bauxitas de Trombetas, na região amazônica. Dentre os resultados apresentados, destacam-se aqueles apresentados nas figuras 3-9 (a) e (b), os quais se referem às características de amostras coletadas nos horizontes de dois perfis de alteração tal qual *in natura* e após o processo de lavagem. A figura 3-9 (a) se refere a um perfil com um horizonte de bauxita nodular espesso e um horizonte de laterita pequeno, enquanto na figura 3-9 (b) o horizonte de bauxita nodular é menor, dando lugar a um horizonte de laterita mais espesso.

O processamento consistiu em britagem, lavagem em um tambor de escrubagem e peneiramento a úmido em 0,850mm. Os teores de corte para considerar o material como minérios explotável foram: <10% de SiO<sub>2</sub>; >50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e >30% de recuperação em massa da fração +0,850mm.

Observa-se que a bauxita nodular do perfil (a) alcançou o teor máximo para SiO<sub>2</sub> mas os teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não foram suficientes. Já o no perfil (b), os teores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se encontraram dentro das especificações do teor de corte para as porções mais inferiores do horizonte bauxita nodular. Em ambos os perfis, a bauxita maciça apresentou tanto teores de alumina como de sílica dentro das especificações após a lavagem. Em alguns pontos, mesmo *in natura* os teores são satisfatórios. O processo de lavagem mostrou uma pequena eficiência na redução do teor de ferro no perfil (a), onde a camada de laterita é menor. Já no perfil (b), ocorre uma redução do teor de ferro na bauxita mássica e um aumento do mesmo na laterita, indicando a impossibilidade de exploração deste horizonte como minério.

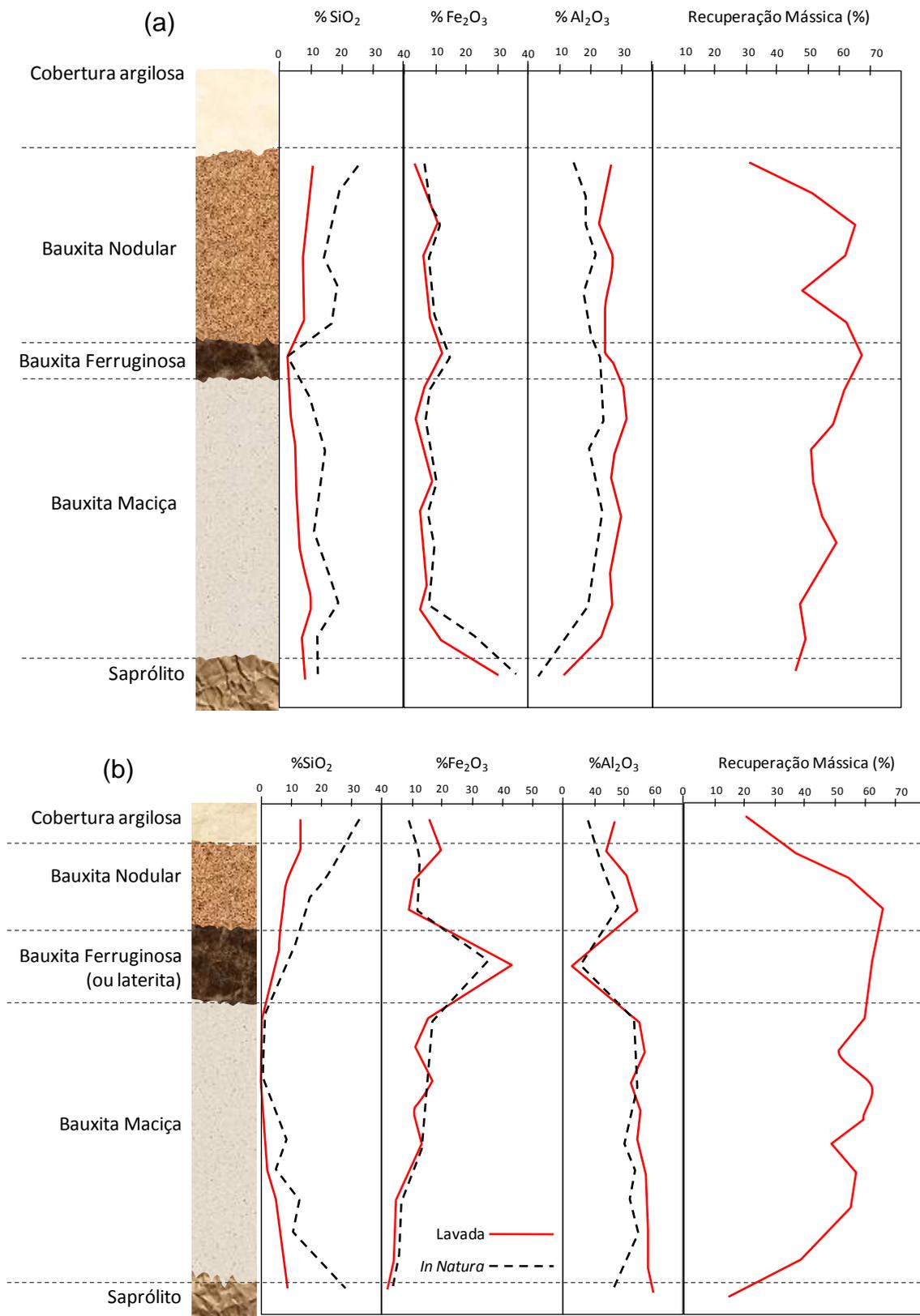


Figura 3.9: resultados de processamento de perfis de bauxitas com camada laterítica estreita (a) e com camada laterítica espessa (b) da região de Trombetas (Greig, 1978).

Além dos métodos descritos anteriormente, algumas empresas utilizam de métodos de concentração gravítica na recuperação da fração rica em gibbsita. Como exemplos, podem ser citados a Mineração Santa Lucrécia (MSL), em Monte Dourado (PA), que utiliza separadores de meio denso Dinawhirlpool (DWP) para a obtenção de bauxita de grau refratário, o qual promove a remoção de ferro e laterita dos minérios com granulometria acima de 1,0mm (Sampaio et all, 2005) ; a Mineração Rio Pomba, em Mercê (MG), que emprega jigues na separação de sílica grosseira em bauxitas de grau refratário; a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) em Itamarati de Minas (MG), que tem em seu processo atrição (“escrubagem”), peneiramento, deslamagem e utiliza espirais concentradoras e separação magnética na recuperação de bauxita nas frações mais finas (Chaves et all, 2007).

Sampaio et all. (2005) também cita referências do emprego de espirais de Humphereys e separadores magnéticos, com campos superiores a 1,5T, para a remoção dos minerais paramagnéticos em bauxitas de grau refratário, reduzindo os teores de  $Fe_2O_3$  e  $TiO_2$ , mas não identifica a empresa que utiliza tal processo. Segundo Chaves et. (2007) a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) em Itamarati de Minas (MG) Também faz uso de espirais concentradoras e separação Magnética na recuperação de bauxitas nas frações mais finas.

### **3.1.6 - Processo Bayer**

O processo para obtenção de alumina a partir do minério de bauxita foi desenvolvido e patenteado por Karl Josef Bayer em 1888, tendo por base a elevada solubilidade dos minerais portadores de alumínio em solução com soda cáustica. Apesar de ter sido desenvolvido há mais de um século, poucas mudanças foram incorporadas ao processo desde então. Atualmente existem outros três processos menos importantes capazes de produzir alumina a partir de bauxita, a saber: processo Alum, rota Al – Isopropóxido, processo Iwatani. No entanto, até hoje o método mais eficiente é o processo Bayer.

A Figura 3.10 mostra a seqüência de etapas que compõem o processo Bayer, bem como as transformações químicas em cada uma delas. O processo Bayer é cíclico e envolve diversas operações unitárias. De maneira bem resumida e geral, as etapas são: digestão, separação da lama vermelha, cristalização do hidróxido de alumínio e calcinação.

As reações básicas que ocorrem no processo de digestão são:

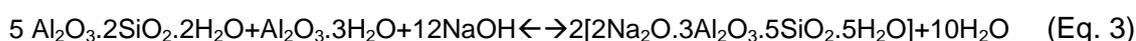
Para gibbsita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ):



Para a bohemita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ):



Para os argilominerais (caulinita) ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ):



A digestão ocorre por um período de lixiviação de 5h, cuja faixa operacional de pressão (43,0 – 8,0atm) depende da temperatura de digestão (100-250°C), a qual é função das concentrações de gibbsita e bohemita no minério.

A caulinita é prontamente atacada pela soda cáustica formando silicato de sódio que, por sua vez, reage com a solução de aluminato de sódio, para formar um composto insolúvel denominado sodalita ( $2\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), o qual é descartado no processo com a lama vermelha, resultando na perda de soda cáustica e de alumina. Devido a esta perda, um parâmetro muito importante nas bauxitas de grau metalúrgico é a relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ , que deve ser maior do que 10. O quartzo não se dissolve facilmente nos processos a baixa temperatura. Os minerais de ferro, hematita e goethita, são ambos inertes nas condições do processo.

A precipitação, ou cristalização, do hidróxido de alumínio é feita nas torres de resfriamento, onde a temperatura e a pressão são diminuídas. Esse processo é acelerado pela adição de sementes, que consiste em um material fino obtido numa etapa de classificação após a cristalização. O produto é então filtrado, lavado, secado e calcinado, obtendo-se então alumina na forma pura (Sampaio et ell 2005).

Authier-Martin (2001) apresenta os principais problemas causados no processo pelos minerais de ganga secundários. Os minerais portadores de titânio (anatásio e rutilo) são inertes no processo a baixas temperaturas. Se o processo for a altas temperaturas, o anatásio é atacado na digestão e reage com a bohemita, impedindo sua completa extração. O rutilo permanece inerte.

A presença de carbono orgânico também é bastante prejudicial na etapa de digestão. Ele reage com a soda formando oxalato de sódio ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ) e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). O oxalato de sódio é o único produto indesejável cujo limite de solubilidade pode ser atingido, levando à sua precipitação na etapa de precipitação do hidróxido de alumínio. Tal fato pode causar a formação de uma quantidade excedente de finos de hidróxido de sódio, que interferem na eficiência da etapa de filtragem. O carbonato de sódio diminui a taxa de precipitação do hidróxido de alumínio, diminuindo a produtividade.

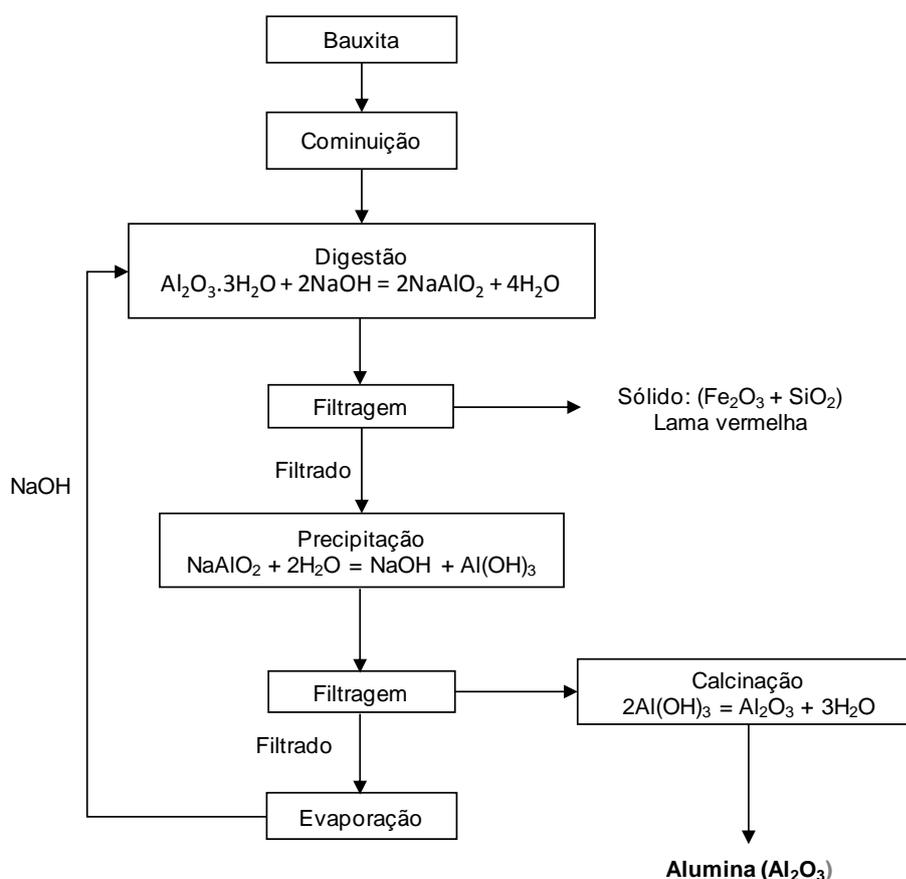


Figura 3.10: Fluxograma apresentando o ciclo do processo Bayer (Sampaio et al, 2005)

O vanádio contido em alguns minérios pode ser problemático quando em teores elevados, pois sais de vanádio tendem a se depositar nos pontos mais frios do circuito, causando obstrução de válvulas, tubos e tanques.

A solubilização de minerais portadores de fósforo é bastante considerável, podendo variar de 20 a 90%. Esse fosfato é acumulado na solução Bayer, que é recirculada. A

presença de fósforo em certas ligas de alumínio é altamente indesejada, causando problemas relativos à resistência mecânica. Para evitar a sua acumulação, a solução Bayer é tratada com leite de cal, que promove a formação de carbonato-apatita, altamente insolúvel.

### **3.1.7 - Situação atual das reservas e tendências futuras**

Atualmente, tem sido uma tendência geral na mineração o aproveitamento de jazidas minerais com baixo teor de espécie útil. Isso é devido à diminuição da disponibilidade de jazidas de alto teor e/ou aumento considerável nos preços no mercado internacional, principalmente dos metais. Um bom exemplo é o mercado produtor de minério de Ferro, no qual minérios itabiríticos marginais de baixo teor e materiais finos que não eram tidos como minério em outras épocas passou a ter aproveitamento econômico. Segundo Araújo (2003), a tendência é cada vez mais o aproveitamento de minério de teor mais baixo e a produção em maior quantidade.

No caso do alumínio, os depósitos atuais têm ainda permitido o aproveitamento das bauxitas com alto teor. No entanto, as empresas têm voltado sua atenção à possível escassez e, por isso, investido na busca de processos que permitam a utilização de minérios marginais, especialmente a bauxita nodular, que hoje são considerados estéril devido ao elevado conteúdo de aluminossilicatos e/ou ao alto teor de ferro contido.

## **3.2- Concentração Gravítica**

### **3.2.1 - Introdução geral sobre métodos de concentração**

Segundo o Professor Alberto Teixeira da Silva (Silva, 1973) “o processo de concentração consiste na separação de partículas minerais em função de sua espécie, sem alterar substancialmente a sua natureza mineralógica”. Para que uma concentração seja efetuada com sucesso, três premissas básicas são necessárias, a saber:

**1 – Liberabilidade:** Situação em que as partículas minerais úteis e os minerais de ganga estão mutuamente liberados.

**2 – Diferenciabilidade:** Devem existir diferenças de propriedades, naturais ou induzidas, entre as espécies que se deseja separar.

Dentre as propriedades diferenciadoras, pode-se citar: densidade, susceptibilidade magnética, condutividade elétrica e propriedades interfaciais.

**3 – Separabilidade Dinâmica.** É preciso que haja um jogo de forças atuante no equipamento de modo a promover a separação dos dois produtos (concentrado e rejeito) em fluxos distintos. Para tal, os processos de concentração são sempre feitos em meio fluido (água ou ar).

A partir das propriedades diferenciadoras citadas no item 2, os métodos de concentração podem ser divididos em métodos gravíticos ou densitários, métodos magnéticos, métodos elétricos e flotação. A Tabela 3.4, adaptada de Peres e Araújo (2006) apresenta os principais equipamentos relativos a cada um dos métodos citados. A aplicabilidade desses métodos de concentração depende de vários fatores, sendo a granulometria do material um dos mais preponderantes. A Tabela 3.5 apresenta a faixa de tamanho de aplicação de diferentes métodos. De maneira geral, a eficiência dos métodos de concentração é menor para partículas muito finas.

Tabela 3.4: Métodos de concentração e seus principais equipamentos (Peres e Araujo, 2003).

<b>Métodos</b>	<b>Equipamentos</b>
Gravíticos	Líquido denso, Meio denso, Espirais concentradoras, Jigues, Mesas vibratórias, Cones, Ciclones de meio denso, DWP, Calhas, Calhas estranguladoras, Classificadores, Hidrosseparadores, Concentradores centrífugos
Magnéticos	Separação magnética de alta intensidade (separador Jones) e baixa intensidade (Separadores de Tambor)
Elétricos	Separador eletrostático de tambor
Flotação	Células mecânicas ou Coluna

Tabela 3.5: Métodos de concentração e suas faixas granulométricas de aplicação

Método	Faixa de aplicação ( $\mu\text{m}$ )
Cilindros de meio denso (*)	200 - 3000
Ciclones de meio denso (*)	200 - 3000
Jigue pneumático (*)	30 - 50000
Jigue de diafragma (*)	80 - 8000
Jigue centrífugo (*)	3 - 600
Mesa Vibratória (*)	80 - 1000
Espiral (*)	70 - 3000
Cones (*)	40 - 2000
Calha estrangulada (*)	20 - 2000
Flotação (*)	5 - 500
Separação Magnética de alta intensidade a seco (^)	70 - 600
Separação Magnética de baixa intensidade a seco (^)	100 - 1000
Separação Magnética de alta intensidade a úmido (^)	20 - 600
Separação Magnética de baixa intensidade a úmido (^)	50 - 1000
Separação eletrostática (^)	100 - 1000

(\*) Sampaio, Tavares (2005)  
 (^) Wills (1992)

### 3.2.2 - Concentração gravítica

A separação das espécies minerais nos métodos gravíticos é dada pela diferença entre a densidade das espécies, onde a resposta à força gravitacional de cada mineral em um fluido é diferente, permitindo a separação.

Uma das formas de se medir a possibilidade de separação é através do critério de concentração ( $C_c$ ):

$$C_c = (D_h - D_f) / (D_l - D_f) \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$D_h$ : densidade da espécie mais densa

$D_f$ : densidade do fluido

$D_l$ : densidade da espécie menos densa

Por exemplo, se tomarmos a hematita (densidade 5,25) e a gibbsita (densidade 2,4), e considerando a densidade da água igual a 1, tem-se:

$$C_c = (5,25 - 1) / (2,4 - 1) = 3,0$$

De um modo geral, quando o resultado é maior que 2,5 (positivo ou negativo), a separação é possível. À medida que o valor do coeficiente diminui a eficiência de separação também diminui (Wills, 1992). Entretanto, quanto menor o tamanho das espécies a serem separadas, maior será a dificuldade de se alcançar a separação, mesmo para critérios próximos de 2,5. A Figura 3.11 mostra o limite em que a concentração é possível em função do tamanho.

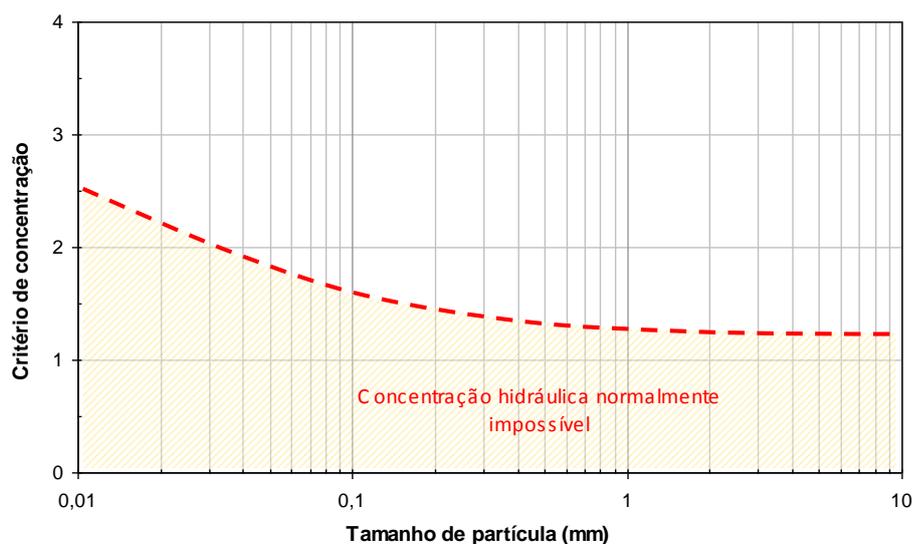


Figura 3.11: Limite de aplicabilidade para os métodos de concentração gravítica

O critério de concentração para a separação da gibbsita ( $d=2,40$ ) e da hematita ( $d=5,26$ ) apresenta um valor de 3,04, o qual, segundo a Figura 3.11, garante a separação por métodos gravíticos. Já o critério de separação da gibbsita e da caulinita ( $d = 2,65$ ) apresenta um valor de 1,17, o qual está abaixo do limite de separação. Desse modo, a separação da caulinita da gibbsita pode ocorrer na espiral concentradora de duas formas: A primeira é a possível associação da caulinita em partículas mistas com a hematita, fazendo com que essa seja encaminhada para o rejeito denso. A segunda é a possível separação em função da forma, pois a forma lamelar da caulinita faria com que esta se posicionasse na zona de maior velocidade da espiral, junto ao produto leve.

Sampaio e Tavares (2005) distinguem os métodos de concentração gravítica em três grupos, segundo o mecanismo dominante:

**Densidade:** Processos em que as partículas são imersas em um meio fluido de densidade intermediária entre as espécies que se deseja separar. Nesse grupo são

incluídos os separadores em meio denso, além dos separadores Knelson e o hidrosseparador, nos quais a separação ocorre em um leito fluidizado.

Estratificação: Esse grupo é formado por todos os diferentes tipos de jigues existentes, onde a separação dos estratos é resultado do movimento de pulsação do fluido na direção da força de campo.

Escoamento em lâmina d'água: É aquele em que a concentração é resultado do movimento diferencial das partículas em um fluido em escoamento laminar. Desse grupo fazem parte as mesas concentradoras, as espirais, as calhas e o cone Reichert.

### **3.2.3 – Jigue**

O processo de jigagem constitui na passagem de correntes verticais com movimentos de pulsação em um leito de partículas. As partículas maiores e mais densas tendem a passar pelo leito de esferas por sobre o crivo e seguem para o fundo do equipamento, enquanto as menores e menos densas tendem a seguir pelo overflow. Os mecanismos de pulsação são diversos, destacando-se os mecanismos por pistão e por diafragma. A figura 3-12 apresenta um esquema geral da separação nos jigues.

As principais variáveis são: a taxa de pulsação; a distância do curso; a água adicionada à arca, pois esta mantém o leito uniformemente fluidizado; o tipo de esferas usadas no leito, densidade, tamanho e forma; a espessura do leito e a abertura do crivo.

Algumas modificações foram feitas nos jigues convencionais no intuito de aumentar a sua faixa de aplicação em termos de tamanho. Dentre elas, destacam-se os jigues pressurizados, que objetivam maior recuperação de partículas grossas, e os jigues centrífugos, que aumentam a recuperação das partículas finas (até 38 $\mu$ m) (Falconer, 2003).

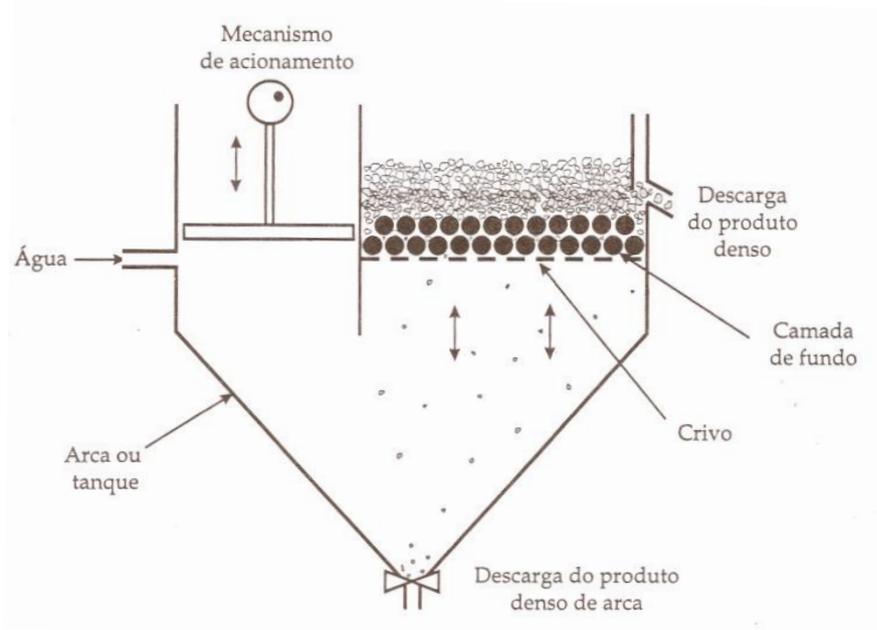


Figura 3.12: Esquema de separação em um jig (Sampaio e Tavares, 2005)

### 3.2.4 - Espirais concentradoras

A espiral possui o mecanismo de escoamento mais complexo dentre todos os aparelhos de separação gravimétrica. Os principais mecanismos efetivamente envolvidos na separação de partículas na espiral concentradora são: a sedimentação retardada, consolidação intersticial, as forças de Bagnold, além da força centrífuga (Lins, 2004).

Segundo Holland-Batt (1995), Um fluido movimentando-se na calha de uma espiral é composto basicamente por dois fluxos: Um fluxo primário no sentido descendente e devido à ação da força gravitacional, e um fluxo secundário no sentido transversal à calha e devido à ação da força centrífuga. Existem proposições de que o fluxo secundário ocorre devido ao encontro do fluxo primário com a parede externa da calha, levando-o a ser refletido, ou de que é devido ao atrito que existe entre o fundo da calha e a polpa e a falta de atrito existente na superfície livre da polpa (Atasoy e Spottiswood, 1995).

Tomando-se uma seção transversal da calha, verifica-se, em termos simplistas, a existência de duas zonas principais, separadas por uma zona de transição intermediária (Figura 3-13).

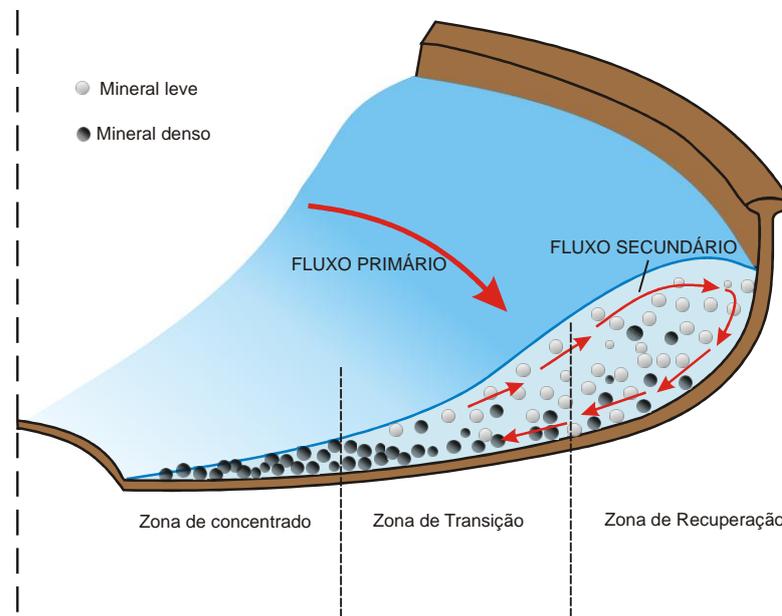


Figura 3.13: Mecanismo de separação em uma espiral.

Na zona próxima à coluna central, ou zona de densos, o comportamento da polpa é ditado pela criação de um leito de partículas que se movimentam lentamente. Logo acima, existe uma região onde as partículas se movimentam livremente. O movimento ascendente do fluido nessa região de recirculação da polpa faz com que haja um tamanho de corte, onde as mais finas são suspensas e levadas para os níveis superiores da polpa, sendo recirculadas na região intermediária. Para um dado tamanho, partículas de densidades menores tendem a ser suspensas.

A zona mais afastada da coluna central é denominada zona de recuperação, pois as partículas devem sedimentar no fundo da calha para serem direcionadas à zona de densos. A deposição é função do tamanho e da densidade. O comportamento nesta zona é ditado pela velocidade do fluxo primário, e controla a composição inicial do material que será processado na zona de concentrado.

A zona de transição exerce uma influência na separação que é proporcional à profundidade do leito. Em condições normais, onde a profundidade não é excessiva, a maioria do material presente nessa região se move com o fluxo secundário e estará presente nele. Se a profundidade do leito for excessiva, ocupando grande parte da

região central da calha, a natureza do fluxo muda, e o fluxo secundário diminui, diminuindo a separação e levando o fluxo a condições muito mais semelhantes a uma calha concentradora do que a uma espiral.

A separação é resultado de correntes ascendentes que suspendem as partículas de menor densidade e mais grossas da região interna e correntes descendentes que dão condições para a sedimentação de partículas na região mais externa.

Analisando o fluxo primário, verifica-se que existem três regimes de escoamento ao longo da seção transversal da calha. Nas proximidades da coluna central, o regime de escoamento é laminar, e o número de Reynolds aumenta progressivamente até alcançar um regime turbulento na extremidade da seção. Na região de transição, o regime é intermediário, sendo o número de Reynolds entre 400 e 2000.

Com relação ao transporte das partículas, ele pode ocorrer de duas formas: suspensão (interrompida ou ininterrupta), onde a interação entre as partículas não é tão significativa; e em leito, onde esta interação é bastante expressiva. O movimento em leito pode ser por rolamento ou escorregamento. As partículas próximas à coluna central se movimentam em leito, enquanto aquelas nas regiões mais afastadas do centro são movimentadas em suspensão. Na espiral não é interessante que o leito de partículas formado ocupe áreas abaixo de regiões onde ocorre a suspensão, pois forças adicionais entram em jogo, levando a distúrbios no mecanismo de separação (Atasoy e Spottiswood, 1995).

Quando há diferenças acentuadas na forma dos minerais a serem separados, a espiral é capaz de realizar a separação mesmo quando o critério de separação é próximo de 1,0. Um exemplo clássico desta aplicação é na separação da mica do quartzo e/ou feldspato. As placas de mica são arrastadas pelo fluxo secundário até a região periférica de maior velocidade, enquanto o quartzo e o feldspato seguem para a região interna da espiral (Burt, 1984).

### 3.3 - Histórico dos Estudos de Concentração de Bauxitas

A busca de métodos que permitam o aproveitamento de depósitos de minérios bauxíticos marginais não é algo atual. O trabalho de Gandrud e De Vaney (1929), já mostrava certa preocupação com essa questão, num período onde o alumínio começava a despontar no mercado de metais básicos. A exaustão de depósitos de

alto teor de diversos bem minerais e a necessidade do aproveitamento de minérios de baixo teor era uma realidade já naquela época, o que levou ao desenvolvimento de novas tecnologias e processos, atualmente empregados em larga escala, como a flotação e alguns métodos gravíticos. Em seu trabalho são apresentados resultados de testes de concentração por métodos gravíticos e flotação para bauxitas provenientes de diferentes estados americanos.

Segundo Gandrud e De Vaney (1929), não é de se esperar que a aplicação de métodos de concentração gravítica em minérios bauxíticos com alto teor de silicatos obtenha sucesso, uma vez que as densidades dos minerais a serem separados são muito próximas (gibbsita 2,40, caulinita 2,60, quartzo 2,65). No entanto, uma vez que os métodos gravíticos não dependem unicamente da densidade, mas de fatores como forma, tamanho e densidade aparente, esperavam obter resultados favoráveis. Testes feitos com classificador Monroe e mesa concentradora em minérios com alto teor de sílica mostraram que o efeito dos métodos na retirada da sílica não é considerável, o que se observa no pequeno aumento na relação  $Al_2O_3/SiO_2$  do concentrado em relação à alimentação, como pode ser observado na Tabela 3.7. Não foram encontradas na literatura referências específicas acerca de como era e como funcionava o classificador Monroe. Textos mais antigos, como o Handbook of Mineral Dressing do Taggart não apresentam este equipamento. A única possível referência é uma ata do 85º Encontro da AIME, em 1904, na cidade de Nova Iorque, no qual há um trabalho apresentado sob o título "A laboratory classifier", de Henry S. Munroe. (AIME, 1904). No entanto, somente o título do artigo é citado.

Tabela 3.6: Resultados dos testes de concentração gravítica de Gandrud e De Vaney (1929)

Descrição do teste	Produto	% Massa	Perda ao fogo	% SiO <sub>2</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% Ti <sub>2</sub> O	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rec. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>
Classificador Monroe	Spigot (Grossos)	54,14	25,5	17,5	3,5	2,2	51,3	55,4	2,93
	Over Flow	45,86	21,3	23,8	4,1	2,2	48,6	44,5	2,04
	Alimentação	100,00	23,6	20,4	3,8	2,2	50,1	100,0	2,46
Mesa Wilfley	Concentrado (+ denso)	21,73	25,2	14,5	7,1	2,6	50,6	21,4	3,49
	Misto	50,20	25,6	17,5	2,8	2,2	51,9	50,6	2,97
	Rejeito (- denso)	28,07	24,7	18,9	2,5	2,4	51,5	28,1	2,72
	Alimentação	100,00	25,3	17,2	3,6	2,3	51,5	100,0	2,99

Os testes de flotação em escala de bancada foram realizados em várias condições e com diversos reagentes usados na flotação de outros minerais naquela época, tais como óleos vegetais, óleo diesel e oleato de sódio. Sulfeto de sódio foi usado como dispersante. Nenhum deles apresentou efeito considerável na redução do teor de SiO<sub>2</sub> no concentrado.

A Tabela 3.7 mostra alguns dos resultados obtidos na flotação direta da bauxita com oleato de sódio como coletor para diferentes distribuições granulométricas de alimentação. Uma redução no teor de SiO<sub>2</sub> de 17,1% para 6,5% e um aumento na relação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> de 3,15 para 9,11 foi alcançada para a fração maior que 0,053mm.

Tabela 3.7: Resultados de flotação direta com oleato de sódio, óleo de máquina e sulfeto de sódio.

Descrição do teste	Produto	% Massa	%SiO <sub>2</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Ti <sub>2</sub> O	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rec. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>
Análise granulométrica	>0,053mm	40,05	17,1	0,9	2,5	54	42,7	3,16
	<0,053mm	59,95	27,7	0,6	2,4	48,3	57,2	1,74
	Alimentação	100	23,5	0,7	2,4	50,6	100,0	2,15
Flotação do material +270#	Concentrado	60,18	6,5	0,6	2,7	59,2	66,2	9,11
	Rejeito	39,82	33,2	1	2	45,6	33,8	1,37
	Alimentação	100	17,1	0,7	2,4	53,8	100,0	3,15
75% do minério	Concentrado	47,27	12,7	1,2	2,7	56,6	52,0	4,46
	Rejeito	52,73	30,2	0,9	2,1	47	48,1	1,56
	Alimentação	100	21,9	1,1	2,4	51,5	100,0	2,35

A necessidade do aproveitamento de bauxitas de baixo teor também é relatada por autores da Europa Oriental. Testes para rotas de processamento de bauxitas cársicas da Hungria e da antiga Iugoslávia são descritos por Csillag et al (1984). Dentre as etapas realizadas estão a cominuição seletiva a úmido, seguida de classificação; floculação seletiva e a flotação da caulinita ou do carbonato para as frações finas; separação magnética a úmido de alta intensidade para as frações grosseiras.

Para bauxitas de Poljana (ex Iugoslávia) ricas em carbonato, os autores sugeriram separação em meio denso para frações entre 20 e 1mm e separação magnética de alta intensidade para as frações inferiores a 1mm. Os resultados da concentração por meio denso apresentaram uma recuperação mássica de 72,68%, um aumento no teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 51,57% para 59,11% e uma redução no teor de CaCO<sub>3</sub> de 13,53% para 0,11%. Já a separação Magnética apresentou uma recuperação mássica de 7,69%, um aumento no teor de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de 51,57% para 53,36% e uma redução no teor de CaCO<sub>3</sub> de 13,53% para 1,80%. A Tabela 3.9 Apresenta os resultados obtidos. A recuperação de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na fração magnética se deve à associação da bohemita e da hematita nos oolitos.

Tabela 3.8: Resultados de concentração de bauxitas cársticas por meio denso e separação magnética.

Nome da amostra	Recuperação Mássica (%)	Composição Química		Distribuição dos constituintes da alimentação	
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaCO <sub>3</sub> (%)
Alimentação	100	51,57	13,53	100	100
Concentrado denso de Bauxita (+2,75g/cm <sup>3</sup> )	72,68	59,11	0,11	83,3	0,6
Concentrado Magnético de Bauxita	7,69	53,36	1,8	7,99	1,02
Total de concentrado	80,37	58,58	0,27	91,29	1,62
Rejeito não magnético	3	51,98	31,63	3,02	7,01
Rejeito leve (-2,75g/cm <sup>3</sup> )	16,63	17,65	74,36	5,69	91,37
Total do Rejeito	19,63	22,89	67,83	8,71	98,38

Estudos em concentração de bauxita por flotação vêm sendo intensivamente realizados por pesquisadores chineses. A China possui uma reserva da ordem de 2,3 bilhões de toneladas de bauxita (Mártires, 2005), sendo a grande totalidade de grau não metalúrgico, ou seja, tendo como mineral portador de Al o diásporo. O grande problema das bauxitas chinesas é a baixa relação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiO<sub>2</sub>, normalmente variando entre 4 e 6, sendo o requerido >10. Isso ocorre pela grande quantidade de aluminossilicatos contidos no minério, destacando-se a caulinita, a pirofilita e a ilita. A alta relação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / SiO<sub>2</sub> leva a um aumento significativo no consumo energético demandado pelo processo Bayer. Por isso a necessidade de se buscar métodos que permitam o aumento dessa relação, mediante a separação entre o diásporo e os aluminossilicatos. Um resumo dos principais avanços nessa área pode ser visto no trabalho de Xu et all. (2004).

A flotação de diásporo com coletores aniônicos, tal como o oleato de sódio, é uma prática possível e apresenta recuperação e produtos com teores aceitáveis para o processo Bayer. No entanto, o consumo de reagentes é muito elevado, pelo fato de a quantidade de diásporo no minério ser da ordem de 70%, acarretando assim em custos elevados de processo. Além disso, acredita-se que a presença do oleato

adsorvido na superfície do mineral possa reduzir a eficiência do processo Bayer. Por isso, a flotação reversa do diásporo com a aplicação de amina tem sido o grande alvo dos estudos de concentração de bauxita na China.

Dentre os principais trabalhos neste campo de estudo, podem-se citar os trabalhos de caráter fundamental de Hu et al (2003), onde os autores apresentam resultados de testes de microflotação e medidas de potencial zeta a fim de buscar um embasamento teórico para a flotação e depressão dos minerais contidos nas bauxitas chinesas, e de Hu et al (2004), que apresenta o papel de macromoléculas na flotabilidade da caulinita.

Wang et al (2004) apresentam resultados de testes de flotação reversa de diásporo em escala de bancada. Foram testados três diferentes coletores nos testes: dodecilamina (DDA), brometo de cetil trimetilamônio (CTAB) e um sal quaternário de amônio, denominado DTAL como coletores. Um reagente inorgânico denominado SF foi empregado como depressor e dispersante do diásporo e MIBC usado como espumante. Os testes foram realizados em pH na faixa de 6-7 com duas amostras diferentes. A Tabela 3.9 apresenta os resultados obtidos para ambas as amostras com DTAL, o coletor que apresentou os melhores resultados. Observa-se, para amostra I, que foi obtido um aumento na relação  $Al_2O_3/SiO_2$  de 5,69 na alimentação, para 10,83 no concentrado. Entretanto, é importante ressaltar que as amostras são de bauxitas com baixo teor de silício.

Tabela 3.9: Testes de flotação reversa de bauxitas chinesas, Wang et al (2004)

Condições	Amostras	Produto	% massa	Teores (%)		Recuperação (%)		$Al_2O_3/SiO_2$
				$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$SiO_2$	
Deslamagem, pH 6-7, SFL 360g/t, DTAL 450g/t, MIBC 70g/t.	I	Concentrado	80,46	58,55	6,33	86,63	45,56	10,83
		Lama	12,59	45,15	28,46	8,93	32,05	1,59
		Rejeito	6,95	40,68	36,02	4,44	22,39	1,13
		Alimentação	100,00	63,67	11,18	100,00	100,00	5,69
	II	Concentrado	79,59	68,03	6,88	84,81	48,37	9,89
		Lama	11,21	45,57	30,62	8,00	30,32	1,49
		Rejeito	9,20	49,80	26,22	7,19	21,31	1,90
		Alimentação	100,00	63,48	11,32	100,00	100,00	5,64

No Brasil, estudos de flotação de bauxitas foram realizados pela CBA, em parceria com a Escola Politécnica da USP (EPUSP). Para tal, testes de flotação reversa da bauxita em escala piloto, seguido de separação magnética, foram realizados em amostras da mina de Itamarati de Minas e de Descoberto, ambas em Minas Gerais. O coletor empregado foi o Flotigam EDA (500g/t) e amido de milho (200g/t) como depressor da gibbsita. Os resultados são apresentados na Tabela 3.11 Como se observa, foi possível a obtenção de um concentrado final com teor de 42,3% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 1,33% de sílica reativa. Uma recuperação mássica de 23,4% e recuperação de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de 72,3% (Massola, 2007).

Tabela 3.10: Testes de flotação reversa com minério da CBA – Zona da Mata Mineira

Produto	Recuperação Mássica	Teores (%)				Recuperação (%)	
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$ Reativa	$\text{SiO}_2$ insolúvel	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$ Reativa
Alimentação	100	13	2,9	50,8	19,6	100	100
Concentrado da flotação	48,6	24,2	5,1	12,5	32,2	89,9	11,9
Concentrado final não magnético	23,4	42,3	1,3	22,2	10,5	72,3	8,2

## Capítulo 4 : Metodologia

O trabalho consistirá na caracterização das amostras de Bauxitas, através de análise granulométrica, mineralógica e química, testes afunda-flutua em liquido denso e ensaios em espiral concentradora em escala piloto.

### 4.1 - Amostras estudadas

As amostras a serem estudadas são provenientes do depósito de bauxita de Juruti, PA, pertencentes à Alcoa Inc. Serão três tipos de bauxitas:

1. Bauxita nodular
2. Laterita
3. Bauxita Maciça *in Natura*

### 4.2 - Caracterização tecnológica

#### 4.2.1 – Análise Granulométrica

As amostras foram submetidas à análise granulométrica por peneiramento combinado, devido à grande quantidade de material fino presente nas bauxitas. Alíquotas foram enviadas para análise química para se conhecer a distribuição química por faixa de tamanho. O tempo de peneiramento a seco foi de 15 minutos.

As amostras de concentrados obtidos nos testes também foram submetidas à análise granulométrica, com um número menor de malhas, para se verificar como se deu a distribuição de tamanho nos fluxos da espiral. Por ser uma faixa de tamanho mais grosseiro do que a das amostras cabeça, o tempo de peneiramento dessas amostras foi de 10 minutos.

#### 4.2.2 – Espectrometria de Fluorescência de raios-x

A Fluorescência de raios-x foi feita para as amostras cabeça, com o intuito de conhecer, qualitativamente, os principais elementos químicos presentes na mesma, a

fim de que esses sejam quantitativamente analisados nas análises químicas quantitativas.

#### **4.2.3 - Difractometria de raios-x**

A difratometria de raios-x foi realizada nas amostras globais e nas amostras obtidas pela separação magnética com o intuito de identificar os principais minerais presentes nas amostras.

#### **4.2.4 – Análise química semi-quantitativa por EDS**

As análises químicas foram realizadas por Espectrômetro de raios-x dispersivo em Energia (EDS) nos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Engenharia de Minas da UFMG. É importante lembrar o caráter semi-quantitativo, uma vez que o EDS não analisa elementos leves, como o Hidrogênio, e possui um erro bastante expressivo na análise do oxigênio. Isso fará com que o erro na determinação da alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) seja expressivo, uma vez que ele recalcula o óxido a partir do elemento metálico, não levando em conta a hidroxila presente na estrutura química da gibbsita (34,6%) e da caulinita (14%), por exemplo. Assim, pode-se encontrar em partículas de gibbsita teores acima de 90% de alumina, sendo que o máximo encontrado no mineral é 65,4%.

#### **4.2.5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS)**

A análise da imagem de diferentes alíquotas das amostras no microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um espectrômetro de raios-x dispersivo em energia (EDS) permitiu obter uma descrição das seguintes características do minério:

- Identificação visual dos minerais presentes;
- Formas das partículas;
- Liberação entre os minerais de interesse nas partículas;
- Composição química.

Foram analisadas as duas amostras de cada tipologia que seriam faixas granulométricas aplicáveis em concentração em espiral (-0,815 +0,212mm e -0,425 +0,075mm) e amostras das frações granulométricas para análise da liberação.

#### **4.2.6 – Microscopia Óptica de Luz Refletida**

Amostras obtidas na análise granulométrica foram embutidas em resina, polidas, e analisadas em microscópio óptico de luz refletida, com o objetivo de observar a liberação dos minerais portadores de ferro de maneira mais precisa, e observar feições como estruturas, porosidade e incrustações. As imagens foram feitas para seis faixas granulométricas diferentes, sendo elas: +0,815mm; -0,815 +0,600mm; -0,600 +0,425mm; -0,425 +0,212mm; -0,212 +0,150mm; -0,150 +0,075mm.

#### **4.2.7 – Porosimetria de Condensação Gasosa, Densidade e Área Superficial Específica Por Isotherma de Adsorção do Tipo BET.**

As amostras de cada tipologia e das duas frações granulométricas que alimentaram a espiral foram separadas em separador magnético de terras raras (tal qual apresentado no item 4.5) e tiveram suas densidades e área específica determinadas, a fim de se avaliar a concentrabilidade por métodos gravíticos. A densidade foi determinada tanto por picnometria a gás como por picnometria a água, a fim de comparar os resultados. A porosimetria de condensação gasosa foi realizada com o intuito de verificar se as frações de partículas densas (goethitas, hematitas e magnetitas) possuem porosidade elevada, diminuindo assim a sua densidade aparente, e conseqüentemente, dificultando a separação gravítica.

Foram utilizados os equipamentos da marca Quantachrome modelo Nova-1000 para determinação da porosidade e do programa High speed Gás Sorption Analyser versão 2.11 e modelo Stereo Pycnometer para determinação da densidade e área superficial.

#### **4.2.8 – Análise de Imagens pelo programa LibMim®**

Imagens geradas pelo MEV foram analisadas pelo programa Lib Min, com o objetivo de visualizar e quantificar as fases minerais presentes nas amostras de acordo com a

tonalidade de cinza que as mesmas apresentam segundo a presença de elementos de maior número atômico em sua composição.

LibMin® é um programa de análise digital de imagens que integra sistemas de caracterização mineralógica como o MEV e o MOLR possibilitando a realização de análises modais e estudos de liberação dentre outros. O programa foi desenvolvido em linguagem de programação C++, pela sua robustez em operações matemáticas e gráficas. (Delbem; Galery, 2009)

### 4.3 - Ensaio de concentração

#### 4.3.1 – Jigue

Foi realizado um teste exploratório para cada uma das três tipologias. Foi utilizado o jigue do Laboratório de Tratamento de Minérios do DEMin, do fabricante DECO, modelo H469A, com abertura do crivo de: 2,2 x 2,2 mm (figura 4-1)

As condições dos testes foram:

- Vazão de água: 1800mL/minuto
- Vazão de sólidos: 145g/min (Bauxita nodular); 180g/min (laterita); 190g/min (bauxita maciça in natura).
- Altura do leito: 3cm



Figura 4.1: Jigue utilizado nos testes.

### 4.3.2 – Espiral

Os testes foram realizados em uma espiral de seis voltas, modelo WW6E, da Roche Mining (Figura 4-2). Os parâmetros geométricos são apresentados abaixo:

- Diâmetro: 56cm
- Passo: 36cm
- Número de voltas: 6
- Vazão:
  - 0,42t/h para Bauxita Nodular
  - 0,56t/h para Laterita
  - 0,61t/h para Bauxita in Natura



Figura 4.2: Espiral Modelo WW6E da Roche Mining utilizada nos testes.

Uma vez que o modelo de espiral usado possui nove pontos de coleta de produto denso ao longo da calha, em cada teste, as amostras foram coletadas nos nove pontos mais o produto denso. Para tal, foram acopladas mangueiras nos pontos de coleta, de modo que todas as amostras pudessem ser coletadas no mesmo nível. Desse modo, pode-se analisar o efeito do número de voltas nos principais parâmetros de processo (recuperação mássica e metálica, teor no concentrado e rejeito, razão de enriquecimento, etc.). A figura 4-3 mostra um esquema da montagem. Como se pode observar, os testes foram realizados com a recirculação da polpa na espiral.

A medida da vazão foi feita coletando-se uma amostra por um tempo e medindo-se a sua massa para cada frequência de rotação da bomba utilizada nos testes. A fim de se evitar a geração excessiva de finos, amostras separadas foram usadas somente para esse fim.

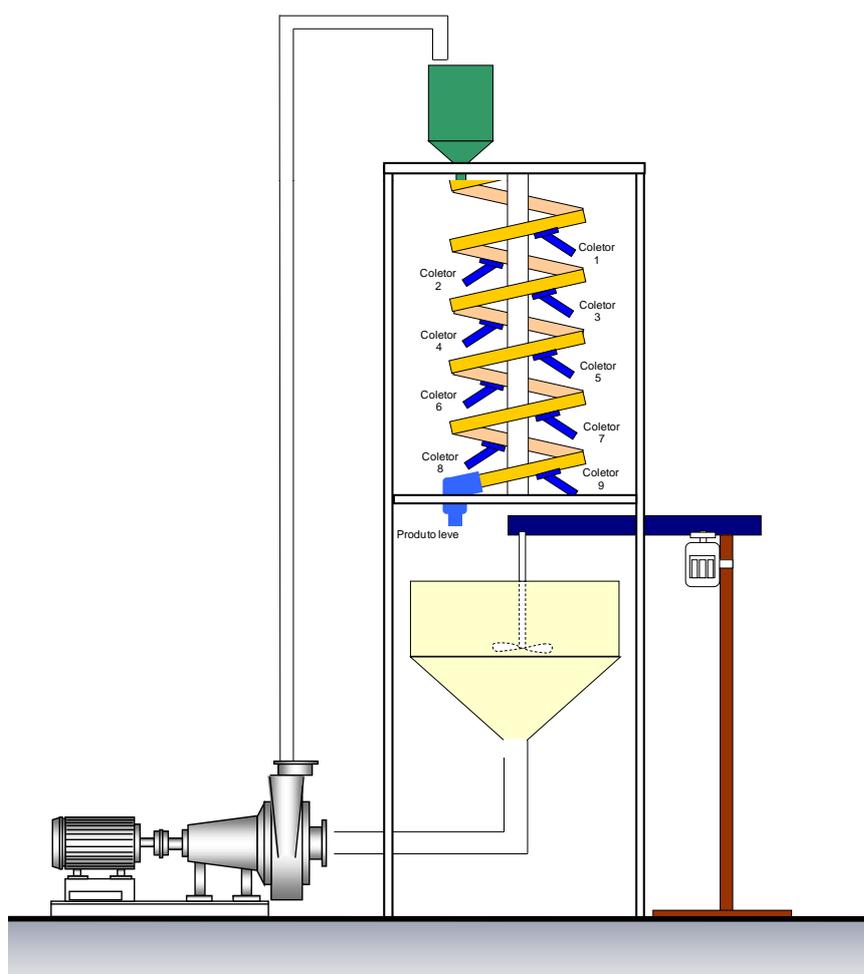


Figura 4.3: Esquema da montagem utilizada na realização dos testes de concentração.

A posição de corte dos desviadores foi mantida fixa, e foi definida a partir de testes preliminares, onde visualmente podia-se observar a separação entre duas bandas de minerais, uma mais clara e outra mais escura. As posições são apresentadas na tabela 4-1.

Tabela 4.1: Posição dos desviadores

Nº do desviador	Distância da coluna central (cm)
1	7
2	7
3	7,5
4	7
5	6
6	5
7	5
8	5
9	7

O procedimento de realização dos testes foi tal como apresentado a seguir:

- Pesas as amostras;
- Pesas a massa de água necessária para se obter a % de sólidos desejada;
- Adicionar a água na caixa de alimentação da bomba;
- Ligar a bomba e o agitador mecânico;
- Adicionar gradualmente a amostra, a fim de se evitar o aterramento da bomba;
- Ajustar a frequência da bomba;
- Aguardar aproximadamente 1 minuto para que o equipamento entre em regime;
- Coletar as amostras.

A fração granulométrica  $-0,815 +0,212$  não foi testada por problema de capacidade na bomba.

## 4.4 – Preparação das amostras

A fim de adequar a faixa granulométrica, e torná-la de manuseio mais fácil, uma vez que as amostras continham partículas maiores que 2", as mesmas passaram por um processo de cominuição e classificação por tamanho, processo que incluiu britadores de mandíbulas e peneiramento a seco e a úmido. O circuito de britagem foi do tipo direto, como apresentado na figura 4-4, com corte granulométrico em 1,19mm.

Após a britagem as amostras foram devidamente homogeneizadas e separadas em alíquotas de aproximadamente 50kg cada. Essas alíquotas foram então submetidas a peneiramento a úmido, a fim de separar as alíquotas para realização dos testes de concentração em espiral. Três faixas granulométricas foram separadas:  $-1,19 +0,816\text{mm}$  para testes de jigagem,  $-0,425 +0,075\text{mm}$  e  $-0,815 +0,212\text{mm}$  para caracterização e teste em espiral para a primeira. As frações  $-0,075$  e  $-0,212$  foram descartadas, uma vez que essas faixas de tamanho não são aplicáveis a processamento em espiral. As figuras 4-5(a) e (b) esquematizam o peneiramento das amostras.

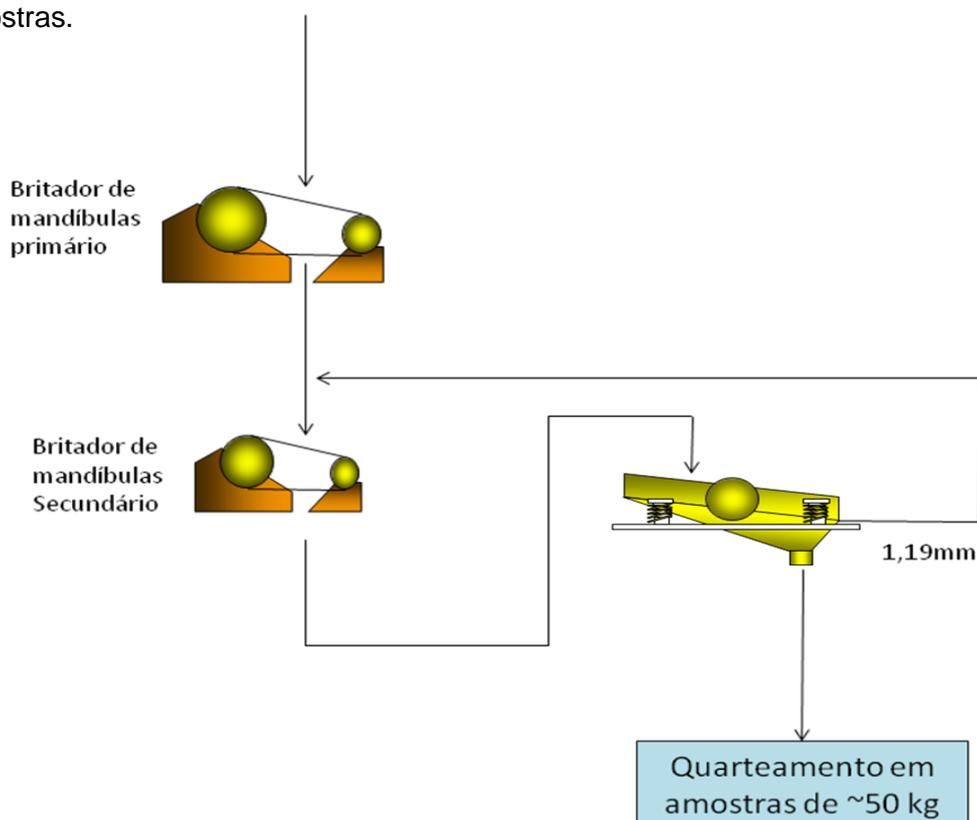


Figura 4.4: Britagem primária e secundária.

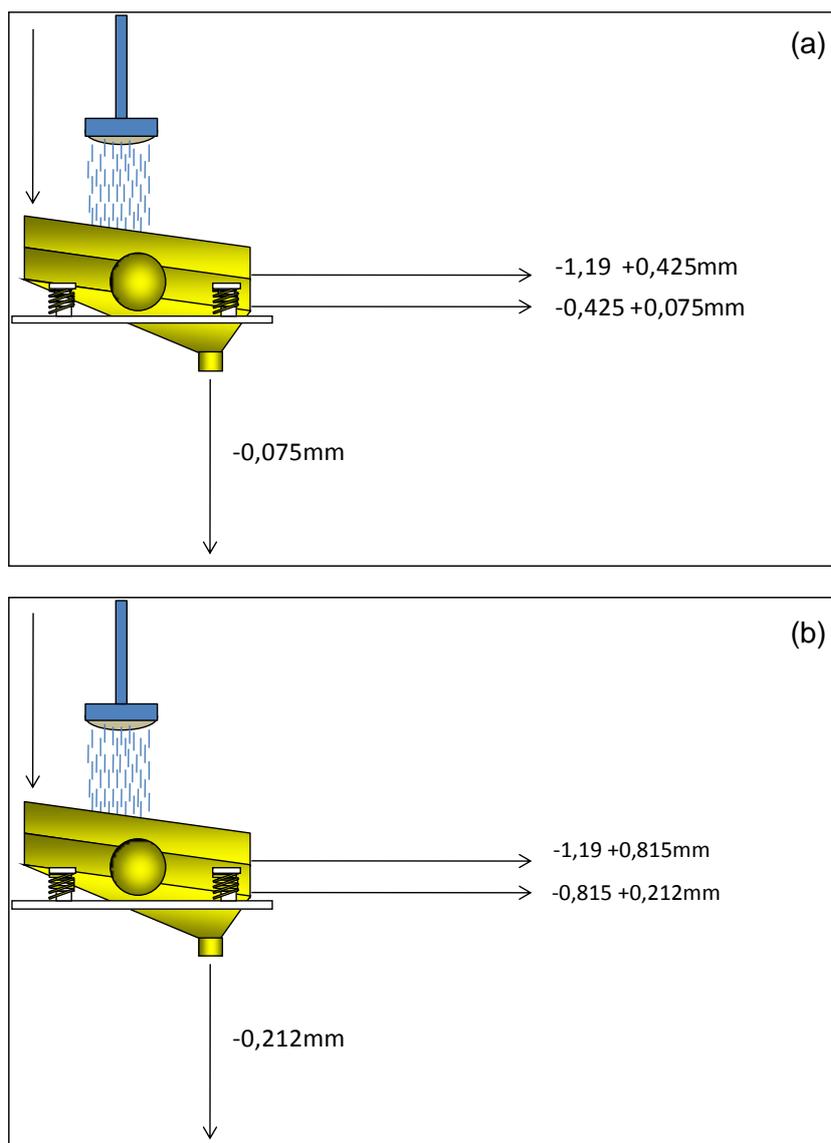


Figura 4.5: Separação por tamanho das alíquotas para realização dos testes de concentração: (a) corte em  $-0,425 +0,075\text{mm}$ ; (b) corte em  $-0,815 +0,212\text{mm}$

De cada uma das amostras (Bauxita nodular, laterita e bauxita maciça *in natura*), foram separadas alíquotas para realização dos ensaios de caracterização, como esquematizado na figura 4-6.

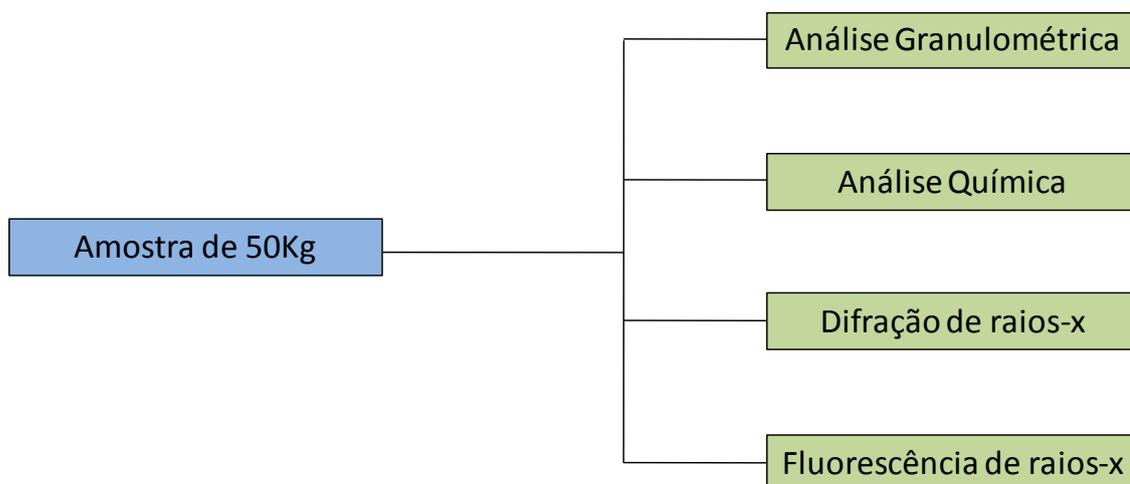


Figura 4.6: Separação de amostras para caracterização

Foi realizada separação magnética por separador de tambor de terras raras a seco (figura 4-7 e 4-8), com a finalidade de separar os possíveis minerais aluminosos (gibbsita, caulinita, quartzo e outros) dos possíveis minerais ferrosos (goethita, hematita, magnetita). Isso foi feito com dois propósitos: O primeiro seria a facilidade de identificar os minerais pela difratometria de raios-x, pois a separação entre minerais magnéticos e não magnéticos (ou porque não densos e leves) diminuiria a interferência entre os picos principais de cada mineral; o segundo seria o conhecimento da porosidade através de porosimetria de condensação gasosa e a densidade por picnometria a gás de cada fração. A densidade também foi determinada por picnometria a água.



Figura 4.7: Separador magnético de tambor de terras raras com campo de 7500Gauss, da Inbras.

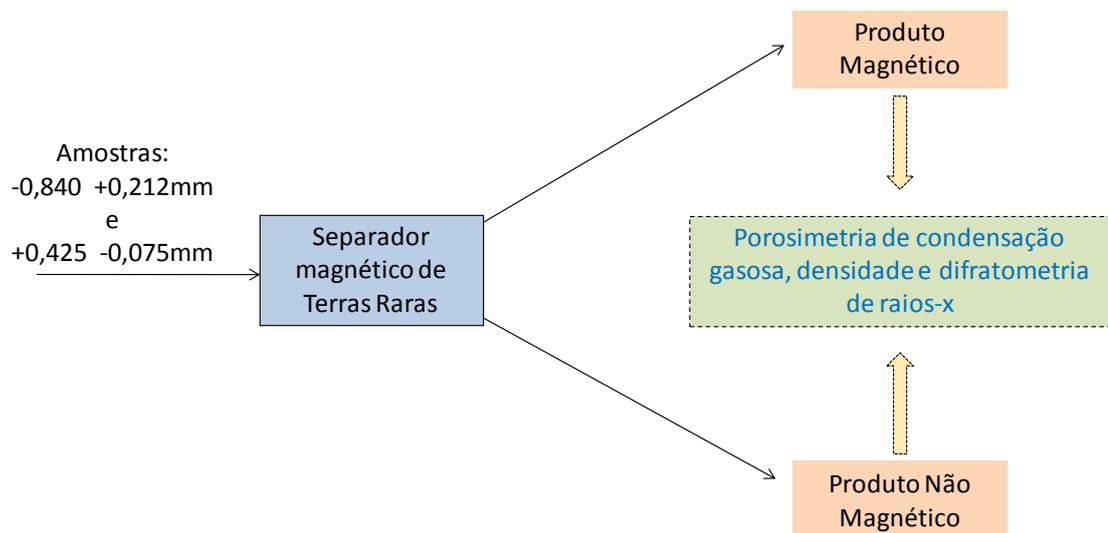


Figura 4.8: Esquema da separação magnética

## Capítulo 5 : Resultados e Discussão

### 5.1 – Análise granulométrica e análise química

A figura 5-1 apresenta a distribuição granulométrica das três amostras após passarem pelo processo de britagem. Observa-se que a Bauxita Nodular é a que possui distribuição de tamanhos mais fina, com cerca de 45% menor do que 0,045mm. A Laterita é a que apresenta distribuição mais grosseira, com cerca de 10% de material menor que 0,045mm. A Bauxita Maciça tem distribuição intermediária entre as duas anteriores, com cerca de 30% menor que 0,045mm.

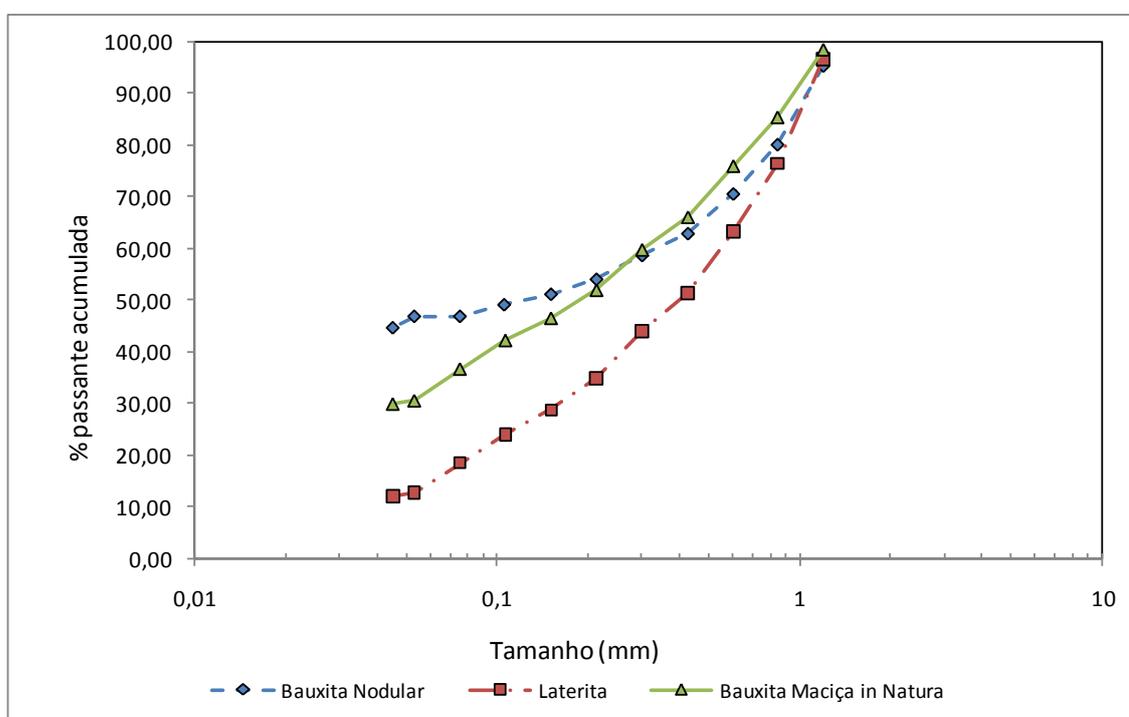


Figura 5.1: Distribuição Granulométrica

Na Tabela 5-1 estão apresentados os resultados obtidos na espectrometria de fluorescência de raios-x. A amostra da tipologia Bauxita Nodular apresenta altos teores de Al e Fe, diferentemente da Laterita e da Bauxita Maciça in Natura, onde o teor de Fe é predominante sobre o alumínio. Isso pode ser percebido pela própria coloração avermelhada dessas duas últimas amostras.

Tabela 5.1: Resultados da Espectrometria de Fluorescência de raios-x

<b>Presença dos elementos</b>	<b>Bauxita Nodular</b>	<b>Laterita</b>	<b>Bauxita Maciça in Natura</b>
Alto	Fe, Al, O	Fe, O	Fe, O
Médio	Si	Al	Al
Baixo	Ti	Si	Si, Ti
Traço	Cr, K, Cl, S, P, Na	Ti, Cr, Cl, S, P, Na	Na, Cl, S, P, Cr

A composição química por faixa é apresentada na tabela 5-2. O teor de alumina encontrado é maior para a bauxita maciça, seguido pela bauxita nodular e pela laterita, tal como se esperava pelos perfis de alteração apresentados na figura 3-2. O teor de sílica é maior para a bauxita nodular, seguido pelas bauxitas nodular e laterita, com valores muito parecidos. O teor de óxido de ferro é maior na laterita, seguido pela bauxita maciça e pela bauxita nodular. O óxido de titânio se apresentou com valores muito próximos nas três tipologias. É interessante observar que, apesar do alto teor de alumínio apresentado na análise por EDS, o resultado da fluorescência apresenta o nível de alumínio como menor do que o de ferro.

A distribuição de óxidos por faixa de tamanho para a bauxita nodular mostra um aumento no teor de sílica nas frações mais finas e um aumento do teor de óxido de ferro nas frações mais grosseiras. Isso fica claro no gráfico equivalente da figura 5-2, onde a distribuição do óxido de ferro se encontra nas frações mais grosseiras. Já na laterita, observa-se uma distribuição maior dos óxidos de ferro nas frações mais finas, juntamente com a sílica e o óxido de titânio. Na bauxita maciça não se observa uma distribuição preferencial dos elementos em nenhuma faixa de tamanho.

Tabela 5.2: Resultados da análise química por EDS para as diferentes faixas de tamanho.

Tipologia	Fração granulométrica	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Bauxita Nodular	+0,815mm	58	8	33	1
	-0,815 +0,600mm	74	12	12	1
	-0,600 +0,425mm	74	16	8	2
	-0,425 +0,212mm	66	20	12	2
	-0,212 +0,150mm	62	25	11	2
	-0,150 +0,075mm	63	22	13	2
	Global	65	14	19	2
Laterita	+0,815mm	58	8	33	1
	-0,815 +0,600mm	53	8	38	1
	-0,600 +0,425mm	30	7	61	2
	-0,425 +0,212mm	39	9	50	1
	-0,212 +0,150mm	38	12	49	1
	-0,150 +0,075mm	29	9	61	2
	Global	44	8	46	1
Bauxita Maciça in Natura	+0,815mm	77	8	12	2
	-0,815 +0,600mm	58	7	16	2
	-0,600 +0,425mm	73	11	15	1
	-0,425 +0,212mm	71	8	20	1
	-0,212 +0,150mm	74	9	17	1
	-0,150 +0,075mm	77	8	13	1
	Global	72	8	16	2

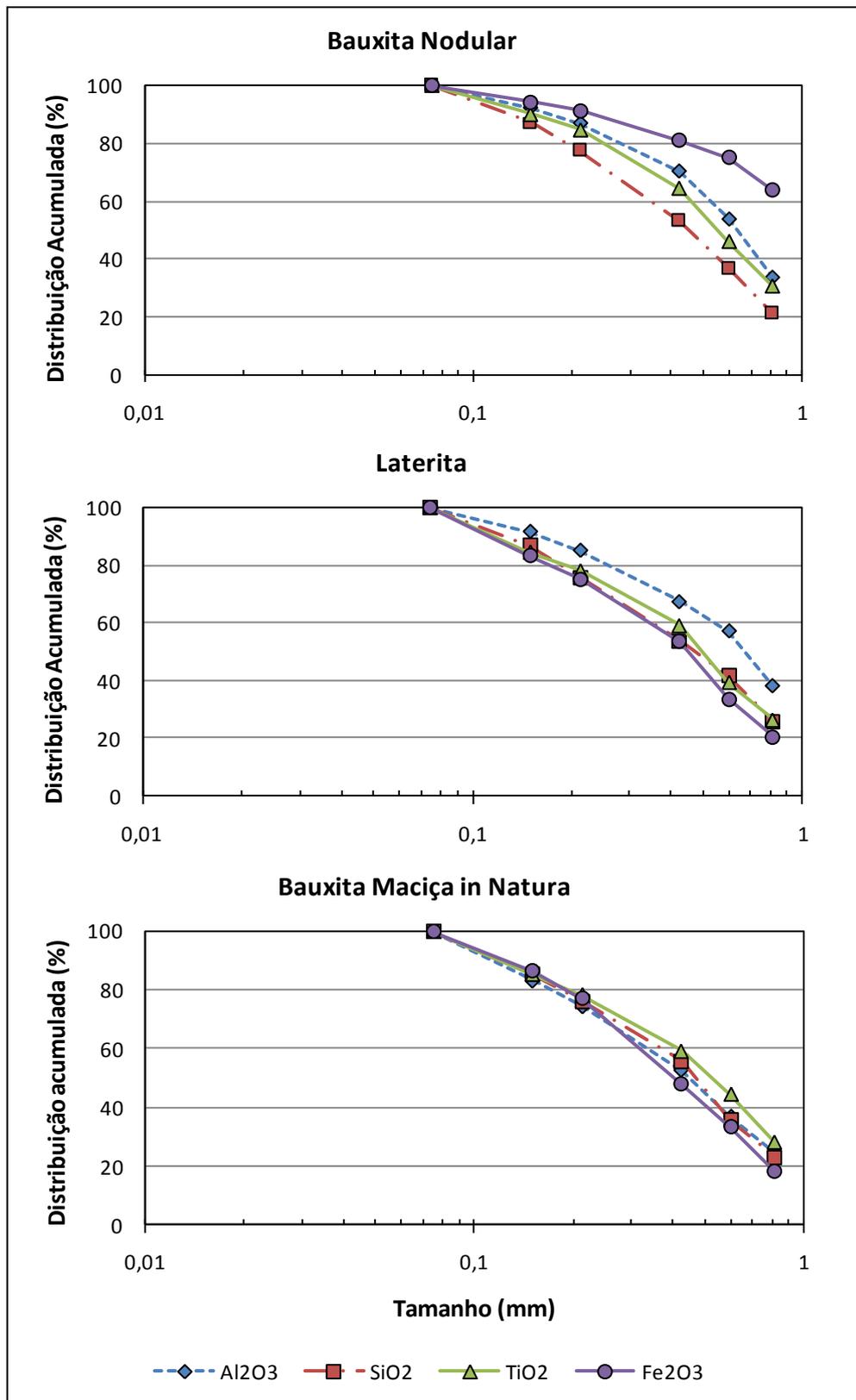


Figura 5.2: Distribuição acumulada dos óxidos de alumínio, silício, titânio e ferro.

## 5.2 – Difração de Raios-x

As tabelas 5-3, 5-4 e 5-5 apresentam uma análise qualitativa das distribuições das principais fases minerais encontradas pela difratometria de raios-x. As seguintes fases minerais foram identificadas nas amostras: gibbsita, caulinita, hematita, goethita, magnetita, anatásio e bohemita, sendo que estes dois últimos não foram identificados em todas as amostras. A gibbsita se encontra como fase majoritária em praticamente todas as três tipologias e em todas as amostras analisadas, mesmo nos concentrados magnéticos, onde se esperava a hematita como fase majoritária. Isso é uma evidência da presença de partículas mistas de gibbsita e minerais de ferro.

A presença de caulinita é maior na bauxita nodular do que nas outras duas tipologias. O produto não magnético da fração  $-0,425 +0,075\text{mm}$  não apresentou indícios da presença de hematita, indicando uma possível concentração, apesar da gibbsita majoritária no produto magnético de mesma granulometria. De forma similar, o produto não magnético da fração  $-0,425 +0,075\text{mm}$  da laterita também apresentou baixa presença de minerais de ferro e caulinita na sua composição.

Tabela 5.3: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de bauxita nodular

Bauxita Nodular						
Quantificação	Global	-0,075mm	Produto não Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto não Magnético (-1,19+0,425 mm)	Produto Magnético (-1,19+0,425 mm)
Fase Majoritária	Gibbsita	Gibbsita Caulinita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita Hematita
Fase Mediana	Caulinita Hematita Goethita	Hematita Goethita	Caulinita	Hematita Caulinita Goethita Magnetita	Caulinita hematita	Goethita Caulinita
Fase Minoritária	Magnetita Anatásio	Magnetita Anatásio	Goethita Anatásio	–	Goethita Magnetita Anatásio	Magnetita Anatásio

Tabela 5.4: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de laterita

Laterita						
Quantificação	Global	-0,075mm	Produto não Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto não Magnético (-1,19+0,425 mm)	Produto Magnético (-1,19+0,425 mm)
Fase Majoritária	Gibbsita Hematita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita Hematita	Gibbsita	Gibbsita Hematita
Fase Mediana	Goethita Caulinita Magnetita	Hematita Goethita Magnetita	-	Goethita Magnetita	Hematita	Goethita Magnetita Caulinita
Fase Minoritária	Anatásio	Caulinita	Goethita Caulinita Hematita Magnetita Boehmita Anatásio	Caulinita	Caulinita Goethita Magnetita Anatásio	-

Tabela 5.5: Distribuição qualitativa dos minerais na amostra de bauxita maciça in natura.

Bauxita Maciça <i>in Natura</i>						
Quantificação	Global	-0,075mm	Produto não Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto Magnético (-0,425+0,075mm)	Produto não Magnético (-1,19+0,425 mm)	Produto Magnético (-1,19+0,425 mm)
Fase Majoritária	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita	Gibbsita
Fase Mediana	Hematita Caulinita Goethita Magnetita	Hematita Caulinita Goethita Magnetita	Hematita Caulinita Magnetita	Hematita Magnetita	Hematita Boehmita	Hematita Goethita Magnetita
Fase Minoritária	Anatásio	Anatásio	Goethita Anatásio	Goethita	Goethita Caulinita Anatásio	Caulinita Boehmita Anatásio

### 5.3 – Separação Magnética

A tabela 5-6 apresenta os resultados da separação magnética, com o balanço de massas a partir das micro-análises. Observa-se pelos teores que ainda existe um teor de alumina considerável na fase magnética, mostrando que não houve liberação. Isso ocorre tanto na fração mais grosseira como na fração mais fina. No caso da bauxita nodular, observou-se um pequeno aumento no teor de sílica do produto magnético.

Entretanto, 76% da sílica está presente no produto não magnético da fração  $-0,815 + 0,212\text{mm}$  e 90% na fração  $-0,425 + 0,075\text{mm}$ . A distribuição do ferro foi maior no produto não magnético da distribuição granulométrica  $-0,425 + 0,075$  (63%), e foi de 50% para o produto não magnético da distribuição granulométrica  $-0,815 + 0,212$ .

Na amostra laterita e bauxita maciça in natura, o ferro está maior distribuído nas frações magnéticas, sendo que na laterita essa distribuição é mais expressiva.

Tabela 5.6: Resultados da separação magnética em tambor de terras raras.

Amostra	Tamanho	Produto	Massa (g)	Recuperação Mássica (%)	Teores				Distribuição			
					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>
Bauxita Nodular	-0,815+0,212	Magnético	9,9	18,50	32	19	48	2	9	24	50	13
		Não Magnético	43,6	81,50	73	14	11	3	91	76	50	87
		Alim. recalculada	53,5	100	65	15	18	3	100	100	100	100
	-0,425 +0,075	Magnético	7,7	18,92	35	30	32	3	13	20	37	16
		Não Magnético	33	81,08	56	28	13	3	87	80	63	84
		Alim. recalculada	40,7	100	52	28	16	3	100	100	100	100
Laterita	-0,815+0,212	Magnético	67,8	72,98	16	6	77	1	42	71	90	51
		Não Magnético	25,1	27,02	58	7	22	3	58	29	10	49
		Alim. recalculada	92,9	100	27	6	62	2	100	100	100	100
	-0,425 +0,075	Magnético	49,8	68,60	15	7	76	1	36	50	88	50
		Não Magnético	22,8	31,40	60	15	22	3	64	50	12	50
		Alim. recalculada	72,6	100	29	10	59	2	100	100	100	100
Bauxita Maciça in Natura	-0,815+0,212	Magnético	21,1	29,26	30	2	66	2	15	17	57	20
		Não Magnético	51	70,74	71	5	20	4	85	83	43	80
		Alim. recalculada	72,1	100	59	4	34	3	100	100	100	100
	-0,425 +0,075	Magnético	20,4	26,56	25	5	67	2	11	23	55	16
		Não Magnético	56,4	73,44	71	6	20	4	89	77	45	84
		Alim. recalculada	76,8	100	59	6	32	3	100	100	100	100

#### 5.4 – Porosimetria de condensação gasosa, densidade e área superficial específica por Isotherma de Adsorção do Tipo BET

Os resultados apresentados na tabela 5-7 mostram que os produtos magnéticos são aqueles que apresentam maior porosidade e maior superfície específica, excetuando-se o produto não magnético da fração -0,815 +0,212mm da laterita, que obteve o maior valor entre todos para a superfície específica. É importante ressaltar que o que é considerado poro neste método são orifícios com diâmetro inferior a 100nm. Poros com diâmetros maiores do que esse valor são considerados pelo método como superfície.

Tabela 5.7: Porosidade e superfície específica das amostras obtidas na separação magnética.

Amostra	Faixa Granulométrica (mm)	Produto	Porosidade		Superfície específica (m <sup>2</sup> /g)
			(cm <sup>3</sup> /g)	% vazios	
Bauxita Nodular	-0,815+0,212	Magnético	0,040	12,26	12,078
		Não Magnético	0,019	4,90	3,557
	-0,425+0,075	Magnético	0,037	12,24	10,122
		Não Magnético	0,022	5,85	3,036
Laterita	-0,815+0,212	Magnético	0,069	20,08	23,936
		Não Magnético	0,024	6,55	45,481
	-0,425+0,075	Magnético	0,055	20,90	14,826
		Não Magnético	0,010	2,57	3,453
Bauxita Maciça in Natura	-0,815+0,212	Magnético	0,051	16,37	11,356
		Não Magnético	0,011	2,87	3,162
	-0,425+0,075	Magnético	0,044	13,68	9,681
		Não Magnético	0,005	1,28	1,277

A tabela 5-8 mostra a comparação entre a densidade obtida pela picnometria a gás e a densidade obtida pela picnometria a água. Observa-se os valores obtidos no segundo método são menores do que o obtido no primeiro, sobretudo para os produtos magnéticos, onde a porosidade encontrada foi maior. A única amostra que não segue esta tendência é a fração magnética da laterita -0,815 +0,212mm.

Os valores do critério de concentração foram calculados para os dois resultados, sendo o produto magnético considerado espécie densa e o produto não magnético considerado espécie leve. Percebe-se que os valores estão abaixo do valor geral de 2,5 sugerido por Wills (1992). Entretanto, segundo a figura 3-11, os resultados encontram-se no limite de aplicação de métodos gravíticos para as faixas de tamanho acima de 0,200mm.

É importante lembrar que sendo a propriedade diferenciadora empregada no fracionamento a susceptibilidade magnética, pode haver uma diferença entre o que foi chamado espécie densa e espécie leve e o que de fato o é, pois a quantidade de ferro presente na partícula pode ser suficiente para classificá-la como magnética, mas insuficiente para considerá-la como densa.

Tabela 5.8: Densidades obtidas pela picnometria a gás, picnometria a água e critério de concentração para as faixas granulométricas.

Amostra	Tamanho (mm)	Produto	Densidade (picnometria a gás)	Critério de concentração	Densidade (picnometria a água)	Critério de concentração
Bauxita Nodular	-815+212	Magnético	3,06	1,31	2,99	1,39
		Não Magnético	2,58		2,43	
	-425 +75	Magnético	3,31	1,39	2,98	1,37
		Não Magnético	2,66		2,44	
Laterita	-815+212	Magnético	2,91	1,10	3,31	1,52
		Não Magnético	2,73		2,52	
	-425 +75	Magnético	3,80	1,78	3,40	1,64
		Não Magnético	2,57		2,46	
Bauxita Maciça in Natura	-815+212	Magnético	3,21	1,37	2,87	1,31
		Não Magnético	2,61		2,43	
	-425 +75	Magnético	3,11	1,35	2,82	1,25
		Não Magnético	2,56		2,46	

## 5.5 – MEV/EDS e Microscopia Óptica

### 5.5.1- Bauxita Nodular

A figura 5-3 é uma imagem geral da fração granulométrica  $-0,815+0,212\text{mm}$ . Nela é possível observar três aspectos de relação entre os minerais. O primeiro é que há uma maior quantidade de partículas mistas, sobretudo no que diz respeito aos minerais de ferro, que são facilmente identificados (tons mais claros). A partícula 1 é um exemplo do tipo de associação que aparece nesta granulometria, onde três fases minerais podem ser observadas: Hematita (ou goethita), gibbsita e caulinita. A caulinita aparece na massa agregada com tom cinza mais claro, que pode ser vista com maior detalhe na figura 5-4. A partícula 2 é uma partícula com alto teor de alumínio e baixo teor de silício e ferro, sendo identificada como uma partícula de gibbsita. Na partícula 3 percebe-se a existência de duas tonalidades: uma cinza mais escura, que corresponde à gibbsita e outra cinza mais clara, que seria uma associação de caulinita e minerais de ferro como a goethita ou óxidos hidratados amorfos de ferro (“limonita”). Na figura 5-5 é apresentada uma partícula com quatro fases minerais: gibbsita, goethita, quartzo e caulinita. Mesmo apesar de não ser identificado nos difratogramas de raios-x, o quartzo pode ser visualizado em algumas imagens do MEV.

Uma partícula interessante é a mostrada na figura 5-6 onde se observa um cristal euédrico de hematita no centro de uma gibbsita recoberta por uma “casca” de goethita e caulinita. O contorno claro do cristal sugere que a hematita se precipitou, ocupando o espaço ocupado antes pelo cristal de outro mineral.

Mapeamento de raios-x característico através do programa *Image Plus* mostrou que é grande a associação entre os teores de Ferro e Silício nas partículas onde o tom mais claro é identificado (Figura 5-7). Há também certa disseminação de silício em partículas com teor de alumínio preponderante. Entretanto, a correlação do silício com o ferro se mostrou mais intensa do que a com o alumínio, mostrando a associação da caulinita com os minerais de ferro.

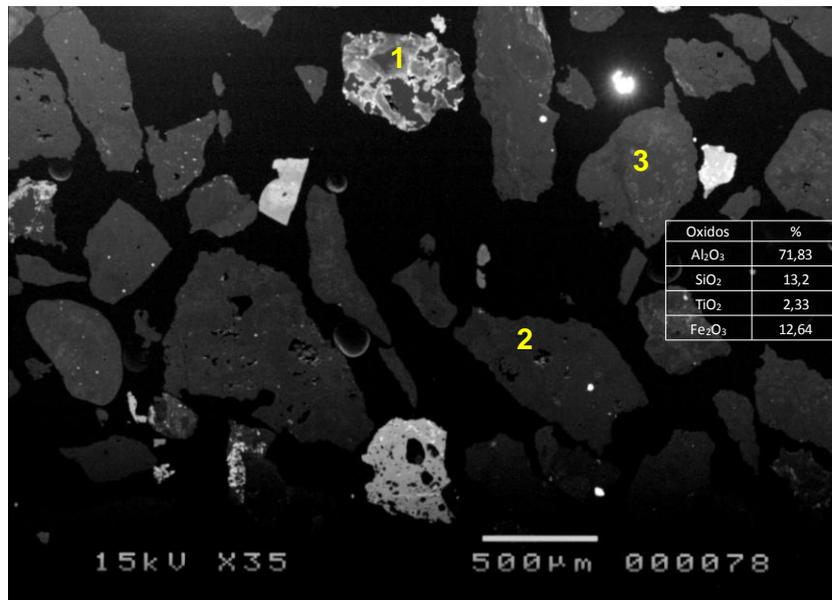


Figura 5.3: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – Geral

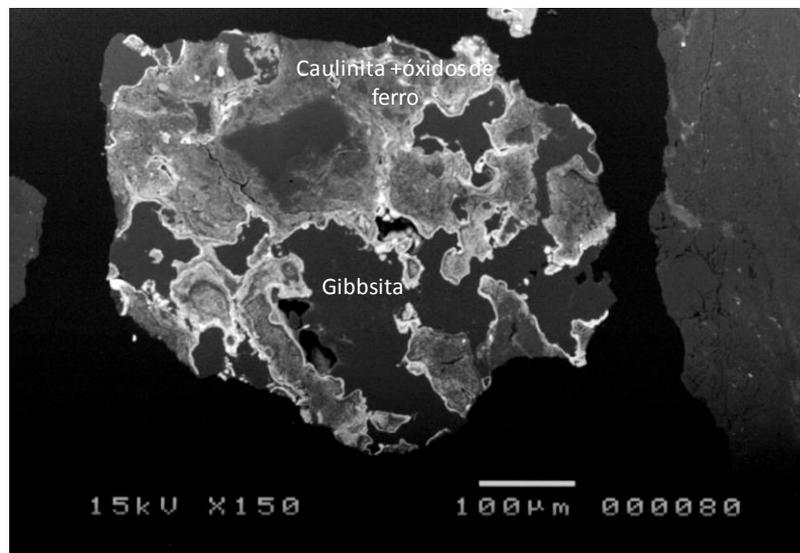


Figura 5.4: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – detalhe da partícula 1

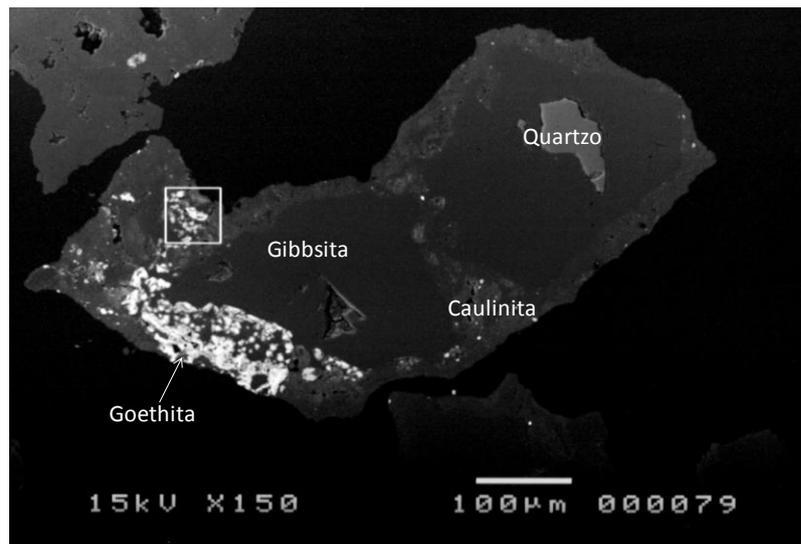


Figura 5.5: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) – partícula mista contendo quatro fases

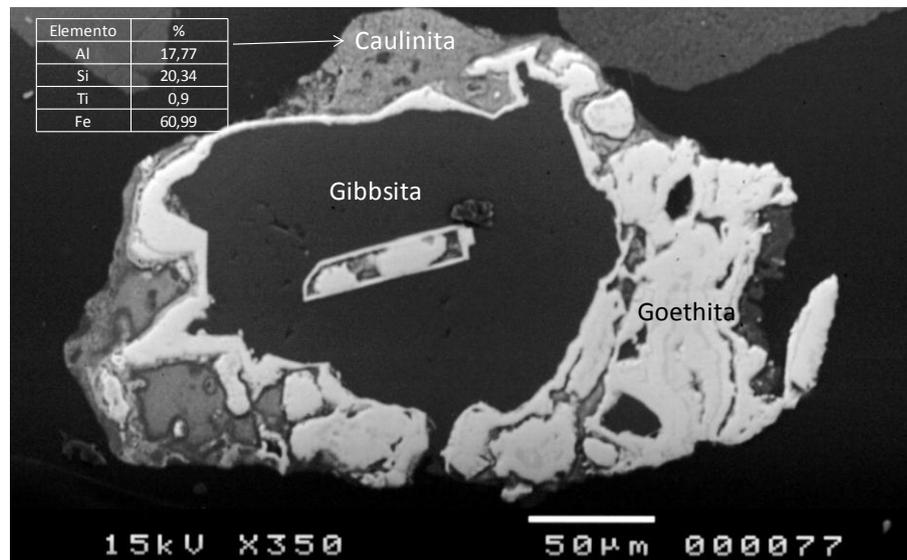


Figura 5.6: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,2125mm) – Partícula contendo cristal euédrico de hematita.

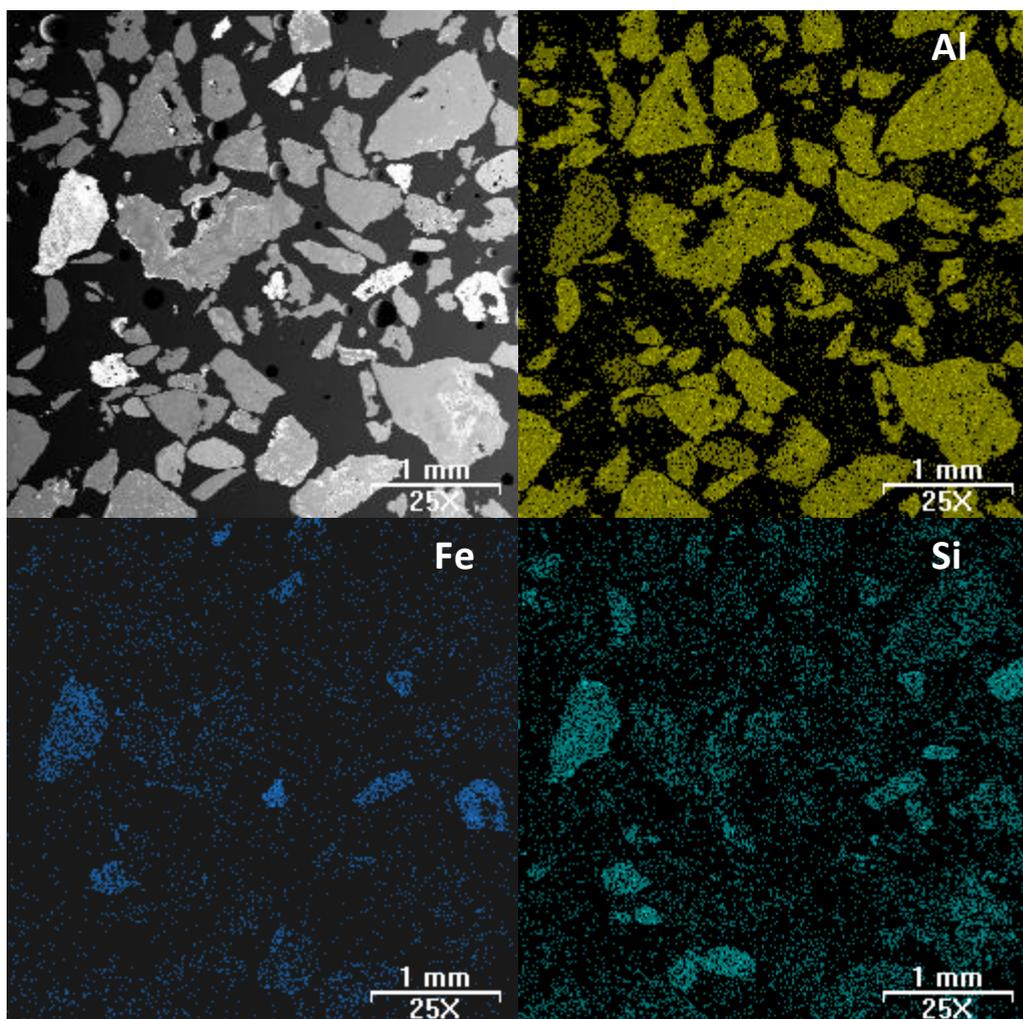


Figura 5.7: Bauxita Nodular (-0,815 + 0,212mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício

O exame das imagens e as micro análises obtidas para a fração granulométrica -0,425 +0,075mm (figura 5-8) mostra que os minerais de ferro parecem mais liberados nas partículas de menor tamanho, mas ainda se percebe uma grande quantidade de partículas escuras, identificadas como gibbsita, agregadas possivelmente à caulinita (tons mais claros, como na partícula 1). A partícula 2, que pode ser vista com maior detalhe na figura 5-9, é uma partícula que contém gibbsita recoberta por uma massa de agregados de cristais (ou partículas) de minerais de ferro e caulinita, como mostra a microanálise da região. A partícula 3 (figura 5-10) mostra uma gibbsita recoberta por uma “casca” dessa massa de agregados de minerais de ferro e caulinita.

Na figura 5-11 pode ser vista com maior detalhe a complexidade da relação entre a gibbsita e a caulinita, onde não se percebe uma separação nítida entre as duas fases,

mas sim uma certa dissolução da caulinita na gibbsita. A figura 5-12 mostra uma partícula com alto teor de óxidos de ferro, mas mesmo assim com uma quantidade razoável de silício e alumínio em sua composição, provenientes da caulinita. Pequenas faixas botroidais típicas da goethita podem ser vistas no canto superior esquerdo da figura.

O Mapeamento de raios-x característico apresentado para esta fração da bauxita nodular (figura 5-13) mostra novamente que a associação entre os minerais de ferro e a caulinita também é intensa, mas há uma correlação considerável entre a gibbsita e a caulinita, a qual apesar de menos intensa do que a associação com o ferro, ocorre em maior quantidade por causa do número de partículas.

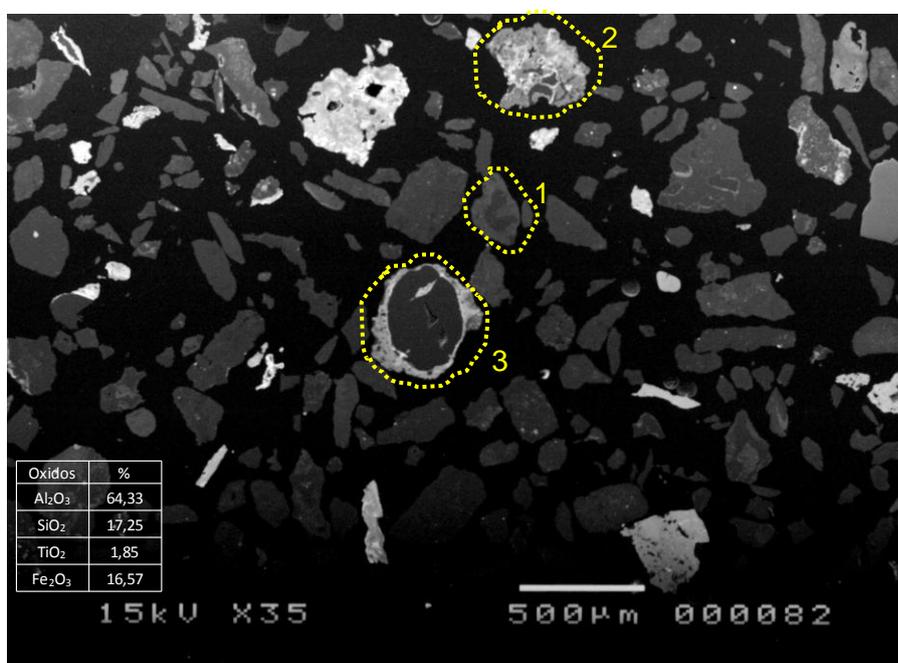


Figura 5.8: Bauxita Nodular - (-0,425 + 0,075mm) – Geral

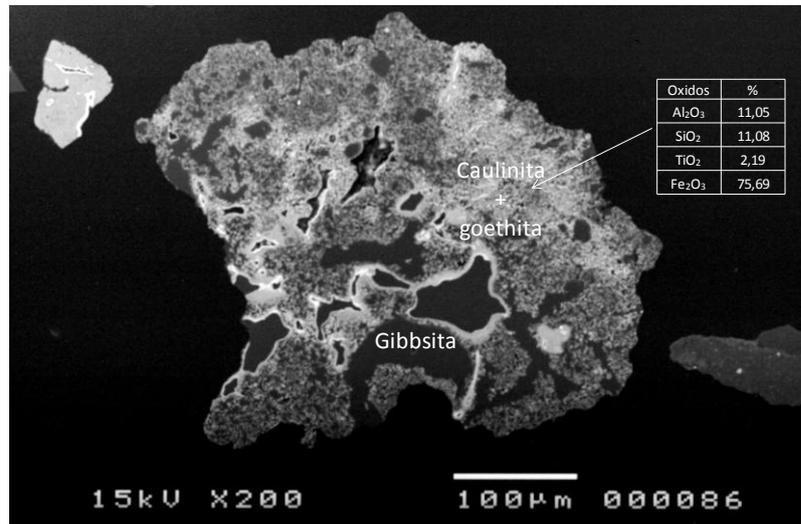


Figura 5.9: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) – Detalhe da partícula 2

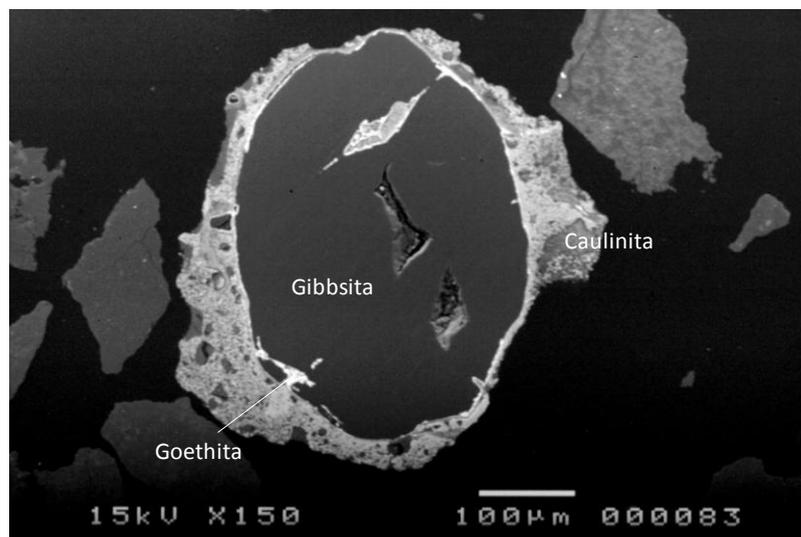


Figura 5.10: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) – Detalhe da partícula 3

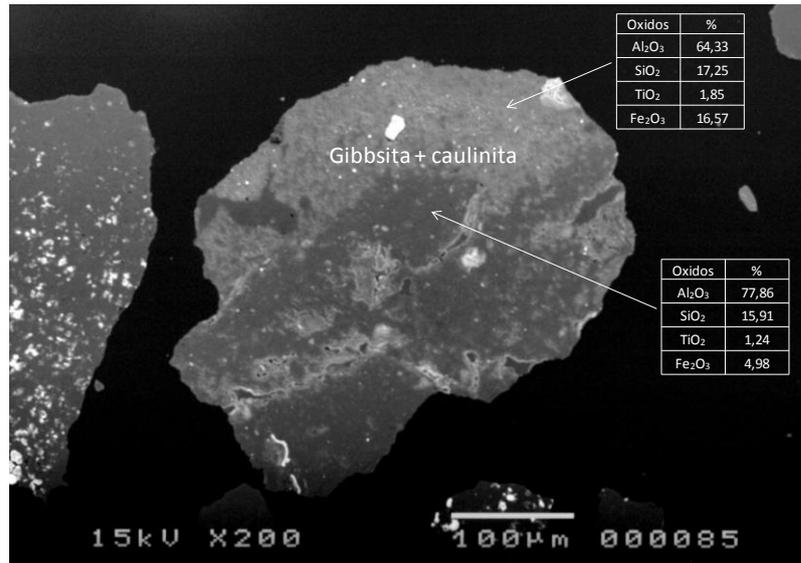


Figura 5.11: Bauxita Nodular (-0,425 + 0,075mm) - Partícula mista

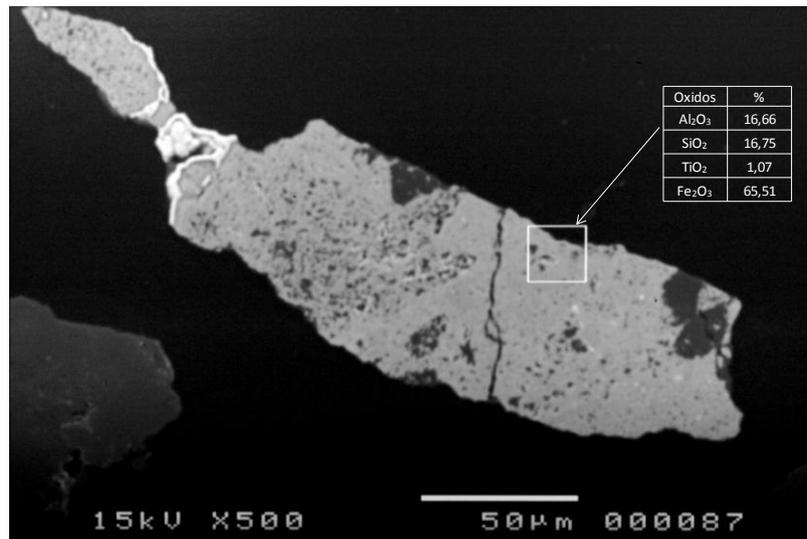


Figura 5.12: Bauxita Nodular : (-0,425 + 0,075mm) - Partícula com alto teor de ferro

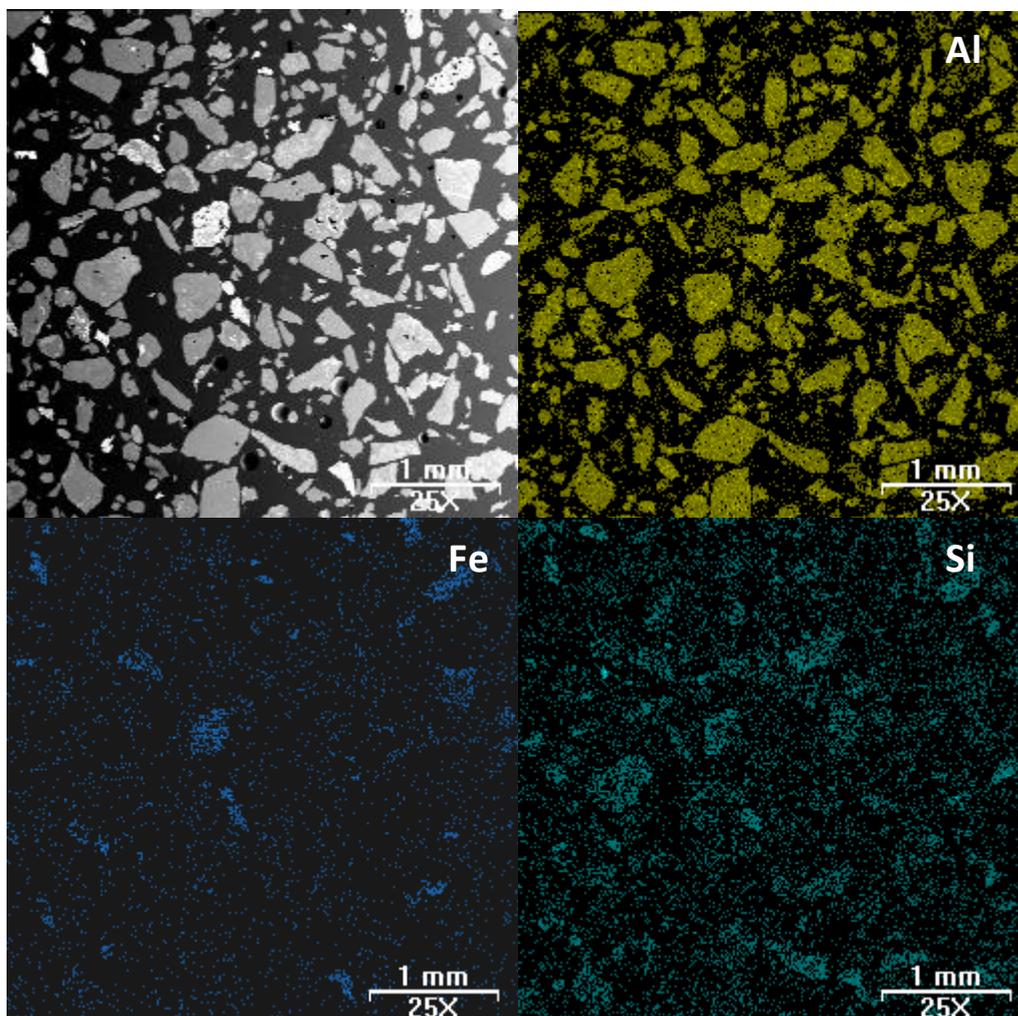


Figura 5.13: Bauxita Nodular: (-0,425 + 0,075mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício

As imagens na figura 5-14 mostram a análise das fases obtida pelo programa LibMin® para a fração -0,815 +0,212mm, onde obteve-se 94% da área como gibbsita (cor vermelho) e 1,78% de hematita e/ou goethita (cor verde). Os tons de cinza mais claro, que correspondem a caulinitas não foi identificado com precisão. Atribuiu-se assim também a cor vermelha da gibbsita neste caso. Esses valores foram recalculados a partir dos valores apresentados abaixo da figura, desconsiderando a cor preta como fase, uma vez que esta corresponde à resina. A imagem da fração -0,425 +0,075mm não foi analisada por não apresentar contraste satisfatório entre os tons de cinza.

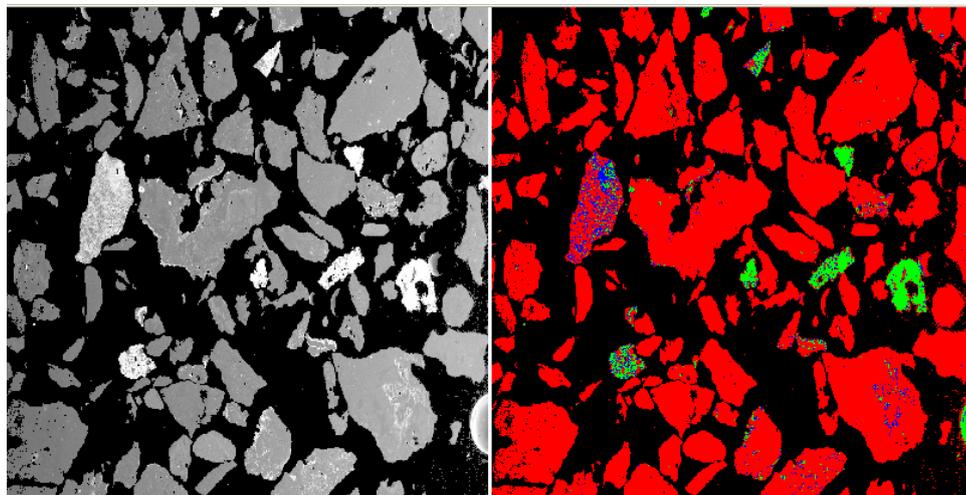


Figura 5.14: Análise de imagem da fração  $-0,815 +0,212\text{mm}$  da Bauxita nodular.

Imagens obtidas por microscópio óptico de luz refletida são mostradas nas figuras 5-15 e 5-16 que seguem. À esquerda têm-se imagens de luz refletida, enquanto à direita são imagens de luz polarizada. Nas imagens de luz refletida, as partículas com tonalidade mais próxima à da resina foram identificadas como sendo gibbíta; partículas com tonalidade clara, onde se percebe melhor reflexão da luz, puderam ser identificadas tanto como hematita como goethita; partículas com coloração mais escura do que a matriz de resina, e com uma textura terrosa foram identificadas como sendo caulinitas ou outras espécies argilosas, como a “limonita”.

A distinção entre hematita e goethita não se mostrou fácil, uma vez que a maioria das partículas possui estrutura morfológica típica da goethita. Entretanto, é a hematita que mostrou como principal mineral portador de ferro na difração de raios-x.

Uma vez que a associação entre esses minerais é bastante complexa nas tipologias estudadas, apenas uma análise qualitativa da liberação pode ser feita, sendo que recursos mais avançados de análise de imagem poderiam fornecer um grau de liberação mais preciso especialmente nas frações grosseiras.

Na figura 5-17 são apresentadas imagens de MEV das mesmas pastilhas observadas no microscópio óptico.

A figura 5-18 mostra um vestígio de estrutura nodular típica desta tipologia, onde podem ser vistos pequenos nódulos de gibbsita (Gb) envoltos em uma massa argilosa de cor marrom clara ou encobertos por camadas de hematita (cor branca).

Abaixo de 0,600mm é possível observar uma maior liberação das partículas identificadas como gibbsita. Entretanto, ainda existem muitas partículas mistas de goethita e/ou hematita tanto com a caulinita quanto com a gibbsita, mas essa em menor quantidade, além de partículas mistas de caulinita e gibbsita. Abaixo de 0,425mm já se pode observar partículas de caulinita liberadas, de forma mais arredondada.

De maneira geral, a cominuição em frações finas, abaixo de 0,150mm, levaria a uma maior quantidade de partículas livres de caulinita, a qual em um processo de separação gravítica se direcionaria para o mesmo fluxo da gibbsita, aumentando o teor de sílica reativa no produto. Por isso, além de serem mais eficientes em termos de separação por densidade, as frações mais grosseiras possuem a vantagem de apresentarem quantidade razoável de caulinitas associadas aos minerais portadores de ferro presentes na amostras, as quais seriam reportadas ao rejeito denso do processo.

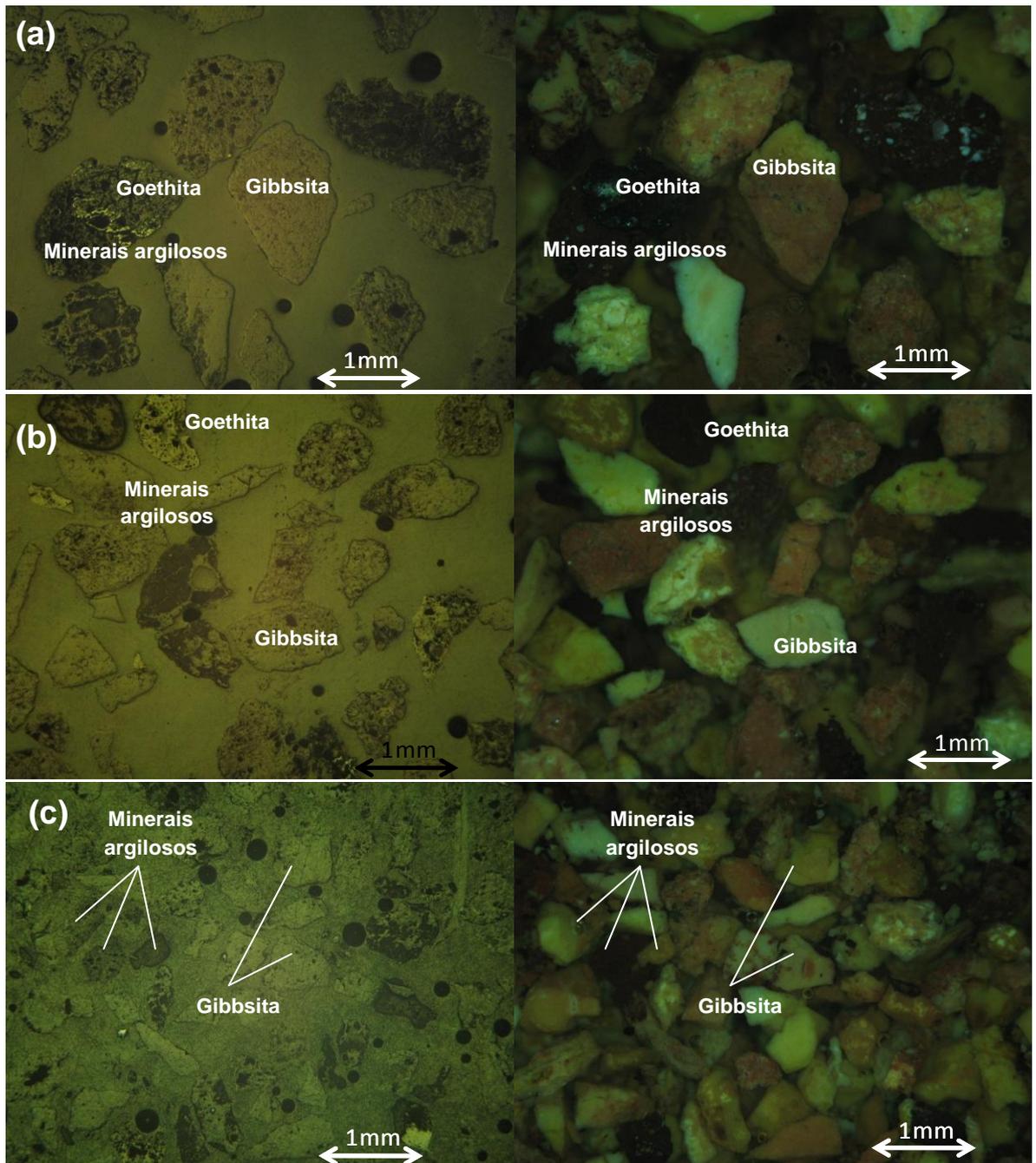


Figura 5.15: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Nodular (a) +0,815 mm ; (b) -0,840 +0,600mm e (c) -0,600 +0,425mm.

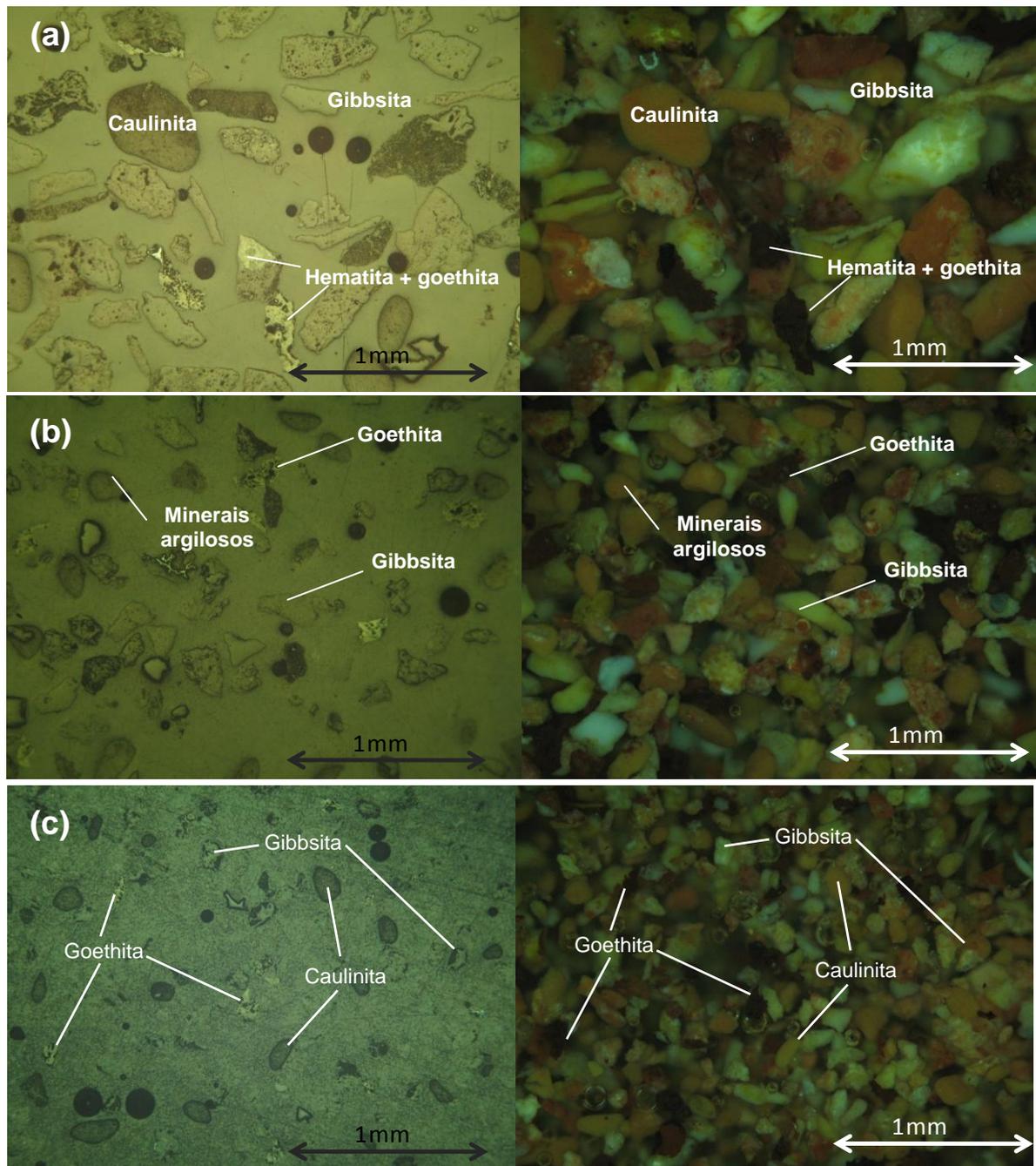


Figura 5.16: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Nodular (a)  $-0,425 + 0,212$  mm ; (b)  $-0,212 + 0,150$ mm e (c)  $-0,150 + 0,075$ mm.

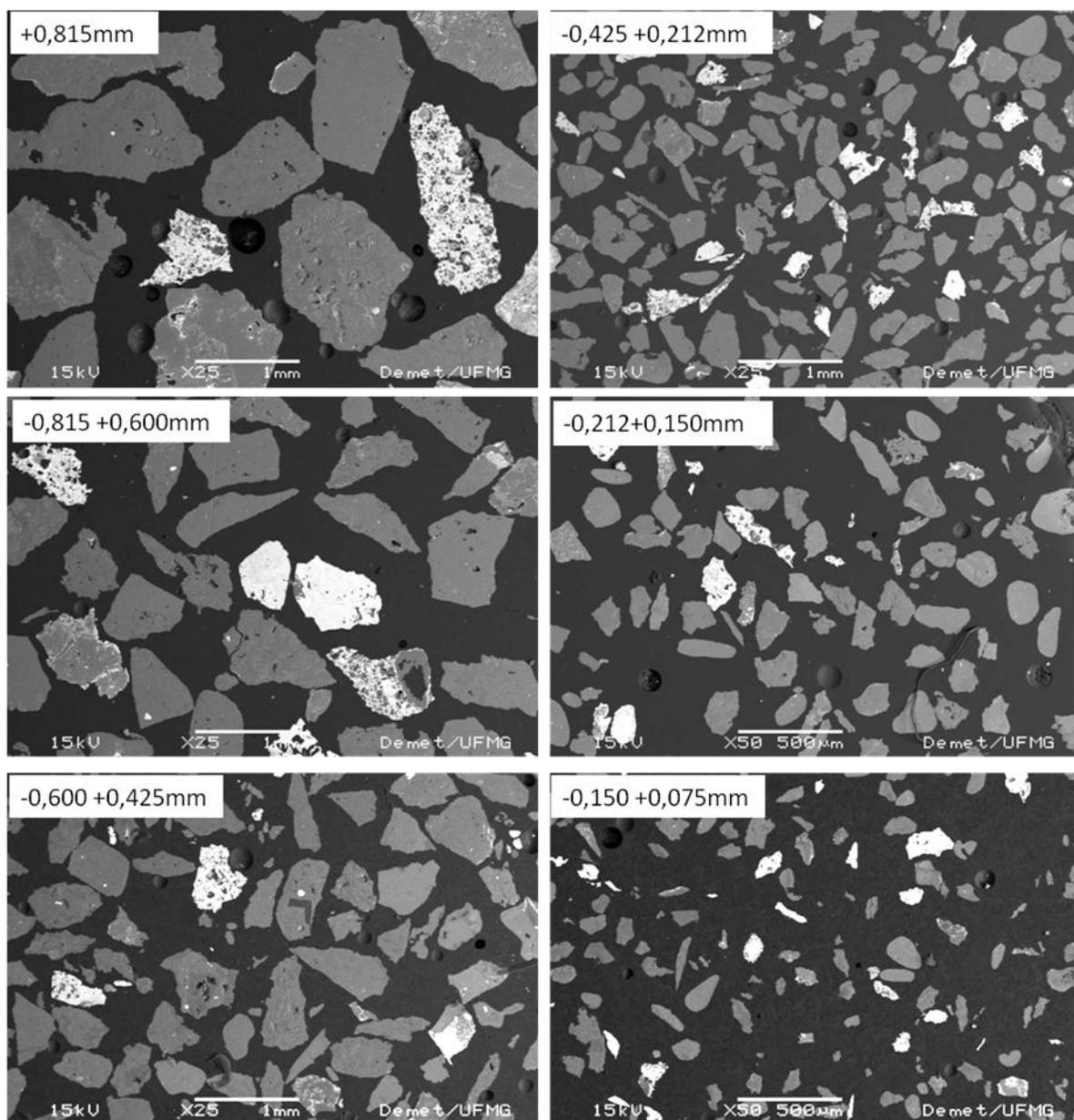


Figura 5.17: Liberação das espécies em imagens de MEV.

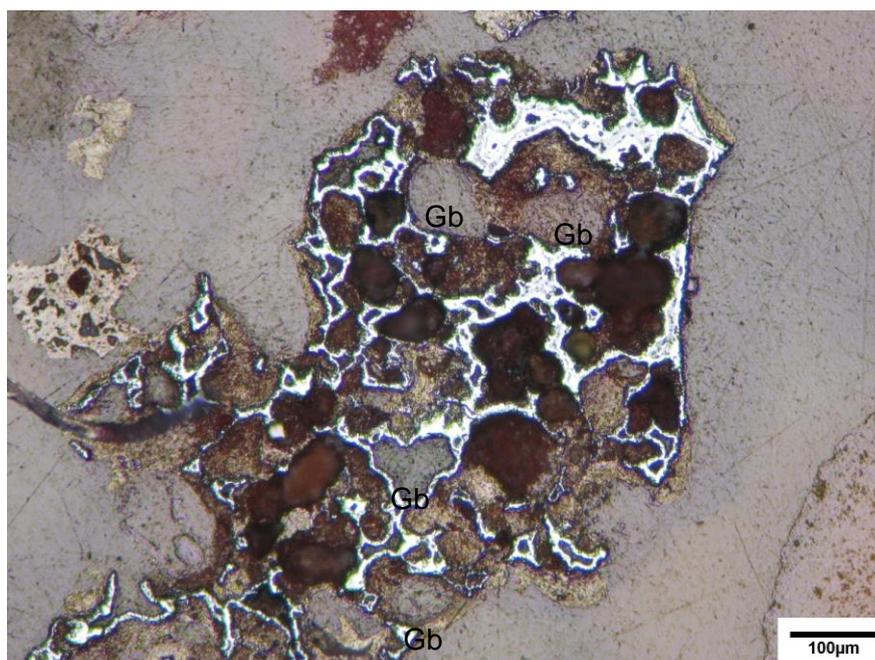


Figura 5.18: Estrutura nodular presente na amostra  $-0,815+0,600\text{mm}$ .

### 5.5.2- Laterita

A Imagem da fração  $-0,815 +0,212\text{mm}$  (figura 5-19) mostra que nessa tipologia a presença de minerais de ferro é intensa. Nota-se também que, salvo algumas partículas menores, a maioria dos minerais de ferro está agrupada em partículas mistas com a gibbsita ou com a caulinita. No caso da caulinita, observa-se que a mesma massa de agregados rica em silício e ferro observada na amostra de bauxita nodular também se faz presente aqui, como se pode ver na partícula 1, mostrada em detalhe na figura 5-20 , onde a massa de tom cinza claro funciona como um cimento para as partículas de caulinita. Observa-se a presença acentuada de anéis claros ricos em ferro contornando partículas de gibbsita ou caulinita (como as partículas no canto superior esquerdo da figura 5-20, identificadas como sendo goethita, pelo seu hábito botroidal típico. A partícula 2 mostra o que a princípio se parece com uma partícula livre de gibbsita. No entanto, pode-se ver no detalhe da figura 5-21 a presença da caulinita nos pontos de tom cinza mais claro da figura. A figura 5-22 mostra em detalhe a partícula 3, que parece ter teor acentuado de ferro, mas onde se encontra também certa quantidade de silício, que se acredita estar presentes em micro cristais de caulinita presos na massa de minerais de ferro.

O mapeamento de raios-x característico para esta fração da Laterita (figura 5-23) mostra novamente que existe uma correlação intensa entre o teor de ferro e o teor de silício nas partículas. Na imagem relativa ao silício (cor verde), percebe-se que as partículas mais nítidas são aquelas também nítidas na imagem relativa ao ferro (cor azul). Isoladamente, pode-se perceber uma partícula de caulinita e uma de quartzo (partículas 1 e 2, respectivamente)

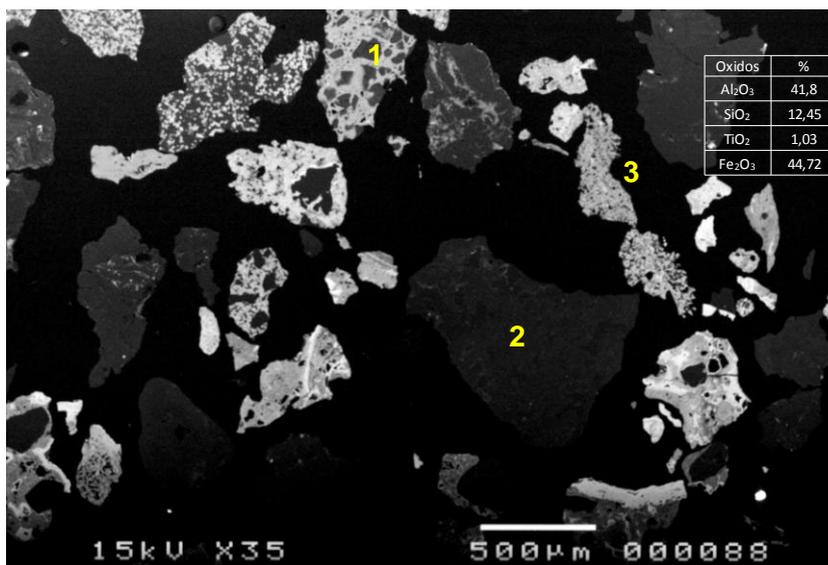


Figura 5.19: Laterita (-0,815 + 0,2125mm) – Geral

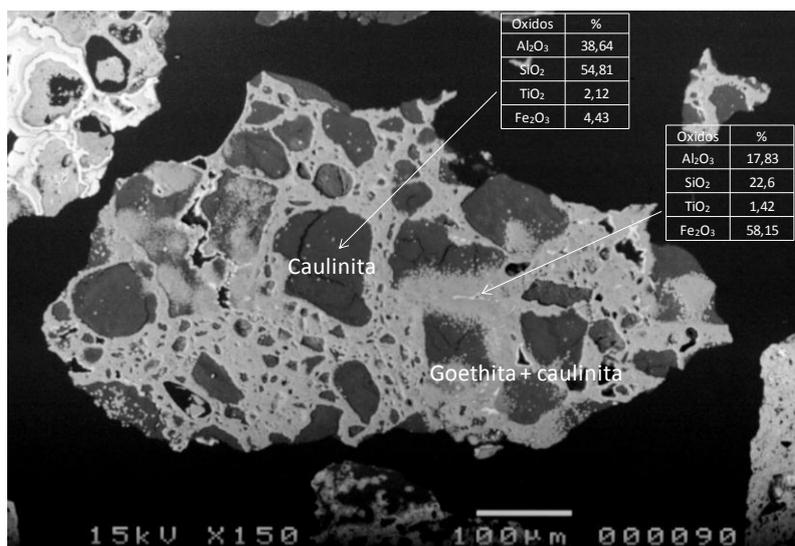


Figura 5.20: Laterita (-0,815 + 0,2125mm) – Detalhe da partícula 1

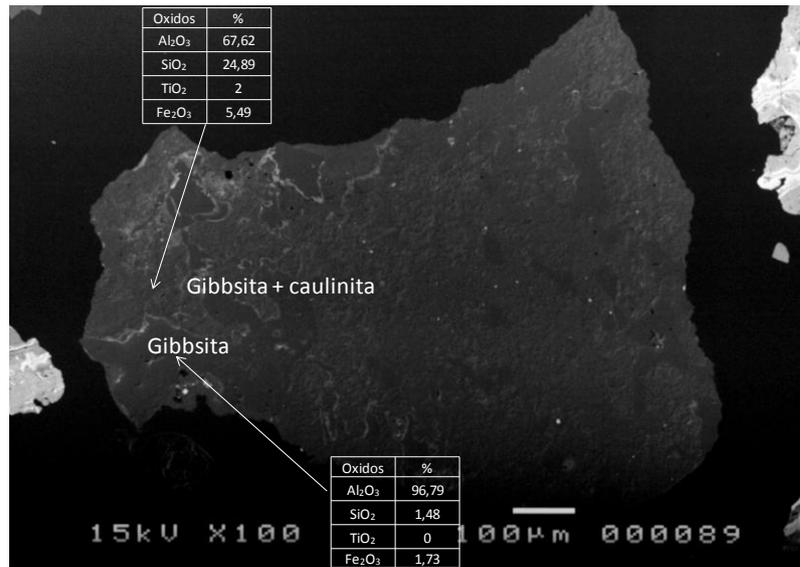


Figura 5.21: Laterita (-0,815 +0,2125mm) – Detalhe da partícula 2

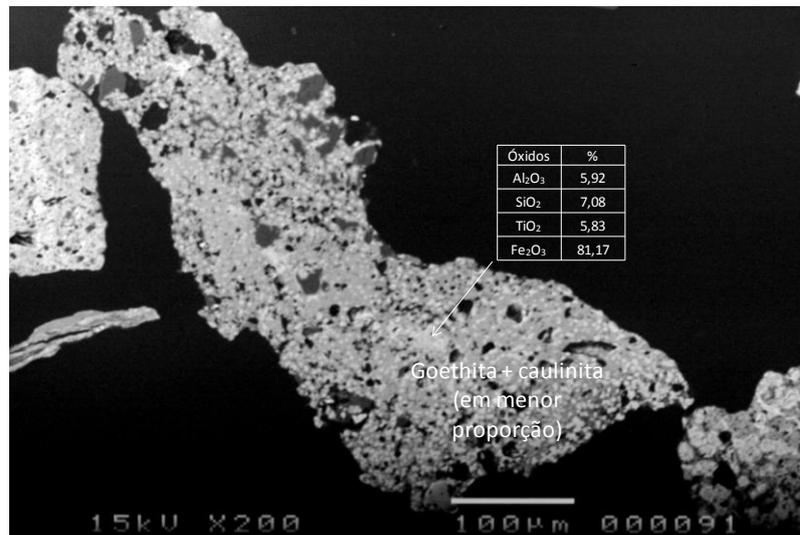


Figura 5.22: Laterita (-0,815 + 0,212mm) – Detalhe da partícula 3

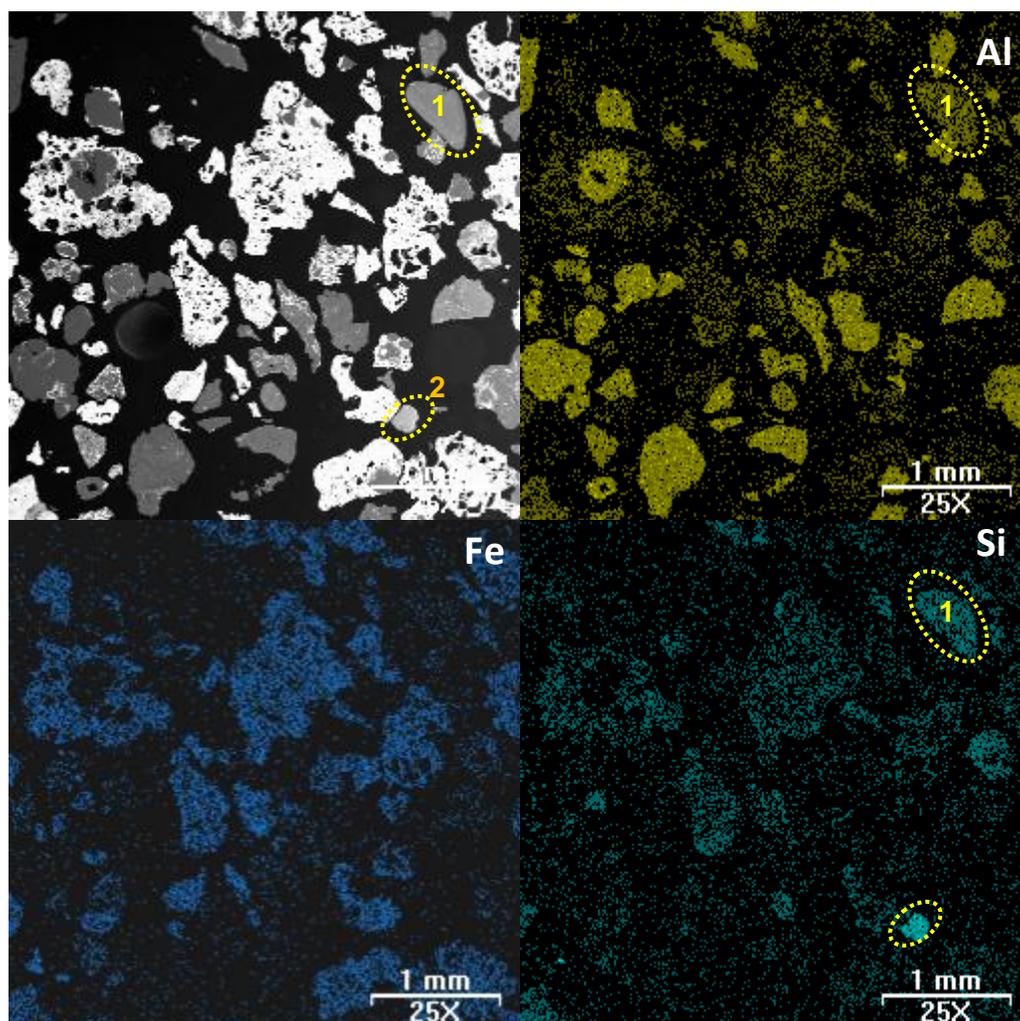


Figura 5.23: Laterita (-0,815 + 0,212mm) - Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício

A análise da fração -0,425 +0,075mm (figura 5-24) mostra que um grande número de partículas de gibbsita encontram-se liberadas, diferentemente das partículas ricas em ferro, onde goethitas e hematitas encontram associadas à massa rica em silício, alumínio e ferro. Entretanto, em termos de quantidade, é essa massa de tom cinza claro quem predomina na amostra. A partícula 1 (figura 5-25) mostra um agregado de gibbsita e da massa rica em ferro e silício. Podem ser também vistos pequenos anéis de goethita contornando pequenos poros. Essa massa também pode ser observada na partícula 2 (figura 5-26), assim como os anéis goethíticos contornando os poros. A partícula 3 (figura 5-27) se mostra uma típica partícula de goethita, com hábito botroidal. Entretanto, observação de partícula similar no microscópio óptico mostrou

que algumas das bandas que são vistas correspondem à hematita (ver figura 5-33 (c)). Isso ajuda a entender porque a dificuldade de se encontrar partículas de hematita nas imagens do MEV de todas as três tipologias, pois estas podem estar associadas a um isomorfismo da goethita ou a um processo de oxidação da hematita para goethita. Na figura 5-28 pode-se ver uma partícula com alto teor de titânio, possivelmente anatásio, que foi encontrada pelo mapeamento de raios-x.

A grande correlação entre as partículas ricas em ferro e o teor de silício é novamente apresentada na figura 5-30 obtida pelo mapeamento de raios-x característico.

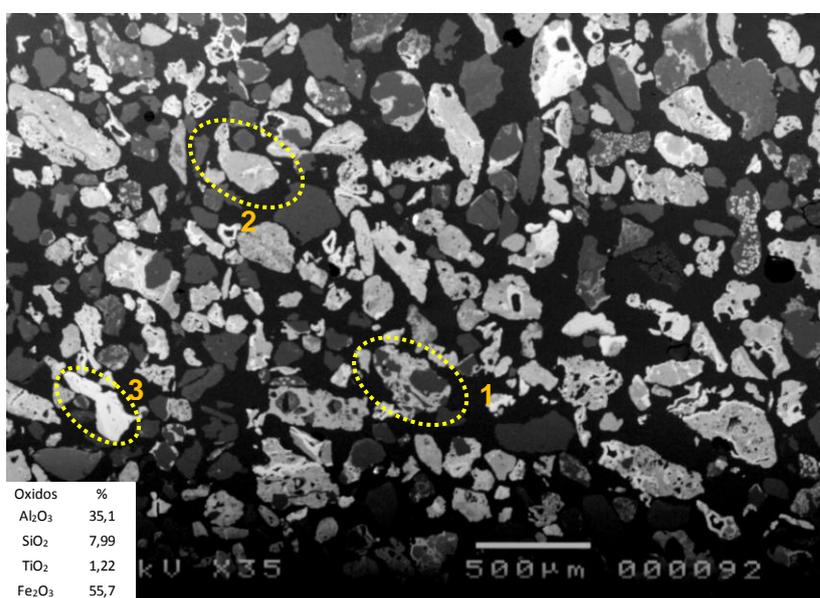


Figura 5.24: Laterita (-0,425+ 0,075mm) - Geral

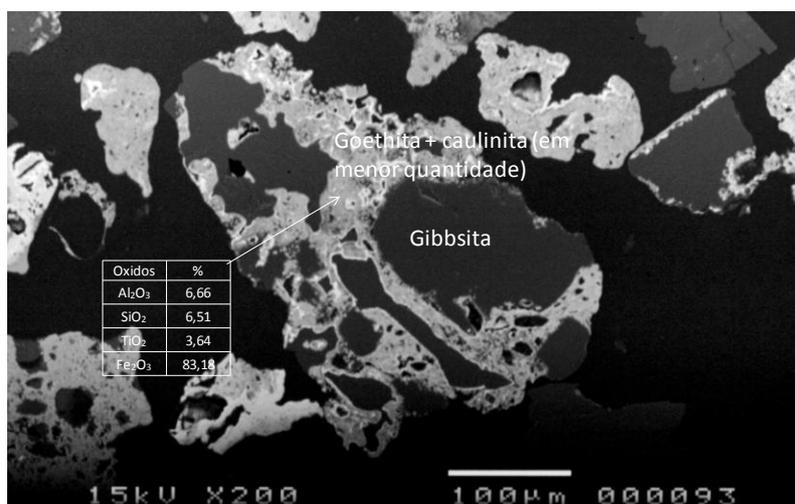


Figura 5.25: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Detalhe da partícula 1

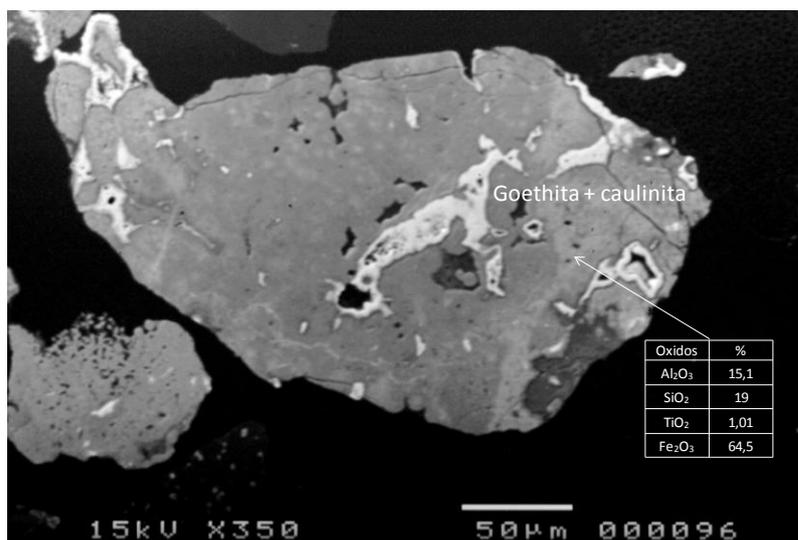


Figura 5.26: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Detalhe da partícula 2

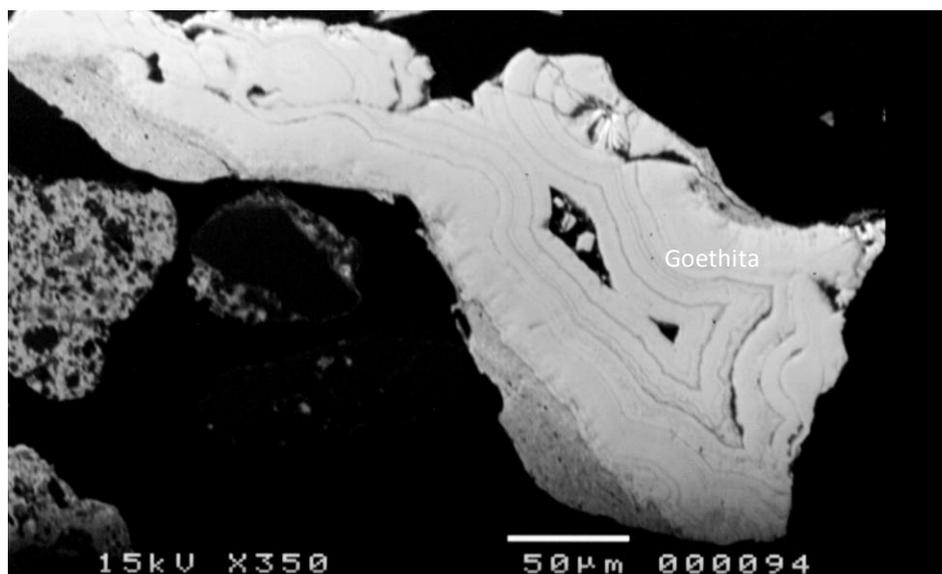


Figura 5.27: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – Partícula 3 – goethita

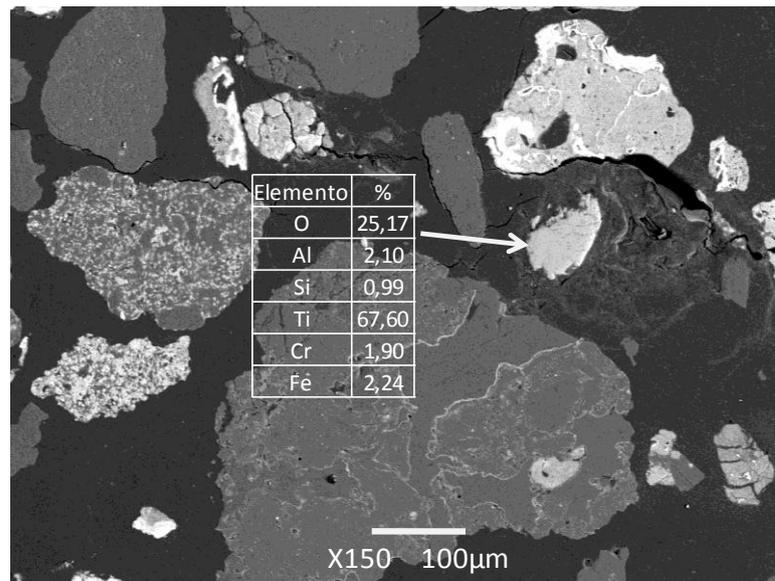


Figura 5.28: Laterita (-0,425+ 0,075mm) – partícula de anatásio.

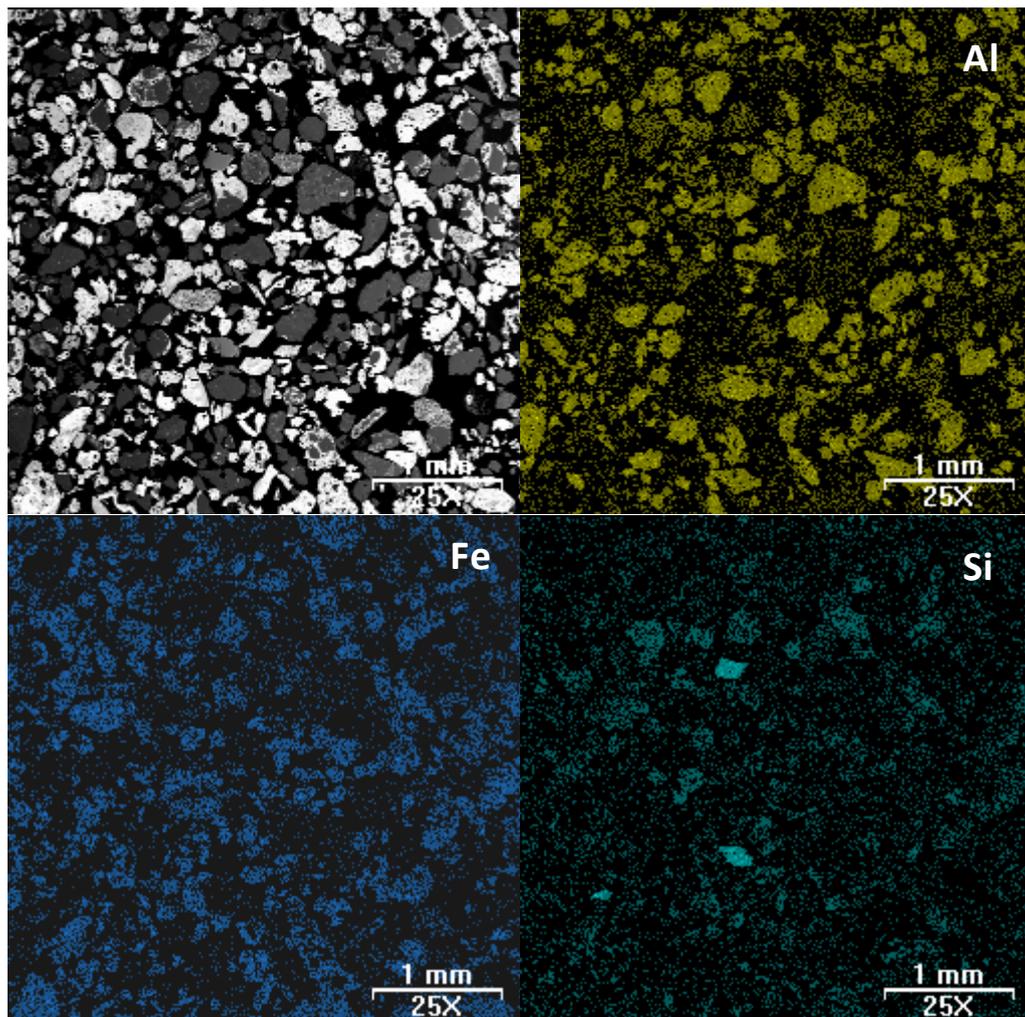


Figura 5.29: Laterita (-0,425 + 0,075mm) - Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício

Na figura 5-30 podem ser observadas as fases diferenciadas em termos de tons de cinza da imagem do MEV para a fração  $-0,815 +0,212\text{mm}$  da laterita. A gibbsita (vermelho) representa 48% da área total; a hematita (amarelo) representa 26% do total; As cores verde e azul (26%) seriam correspondentes aos agregados de partículas ricas em silício, alumínio e ferro, sendo o teor de ferro na cor verde maior. Na fração  $-0,425 +0,075\text{mm}$  (figura 5-31), a gibbsita corresponde a 48% da área total; a hematita corresponde a 5% e os tons que variam de cinza claro a escuro representam 48% do total.

O fato de na fração mais fina ser observada uma menor presença de hematitas e um aumento na quantidade de áreas contendo silício e ferro associados (tons cinza claro) comparado com a fração grosseira é um forte indício de que ocorre uma preservação da hematita durante o processo de cominuição e uma quebra preferencial das porções argilosas.

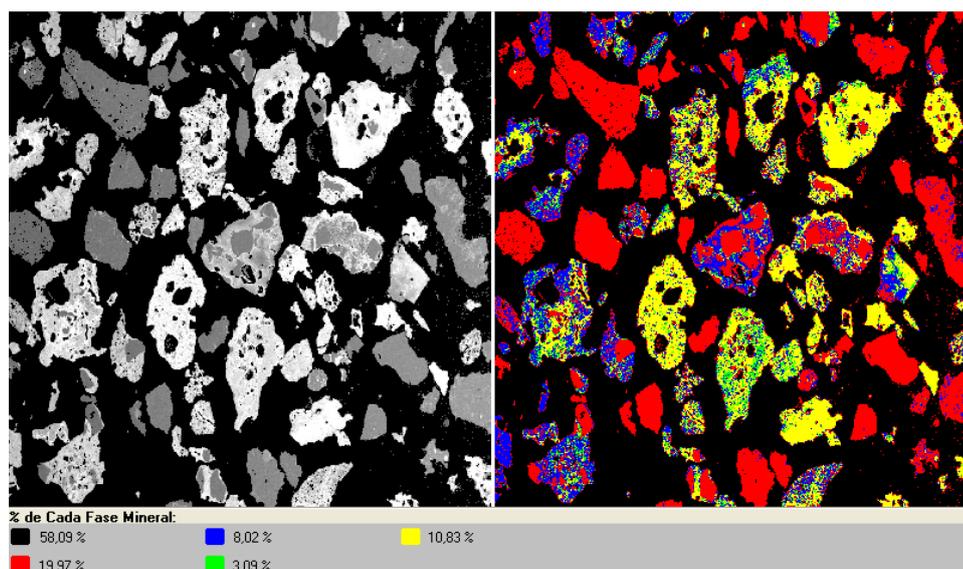


Figura 5.30: Análise de imagem da fração  $-0,815 +0,212\text{mm}$  da amostra *Laterita*.

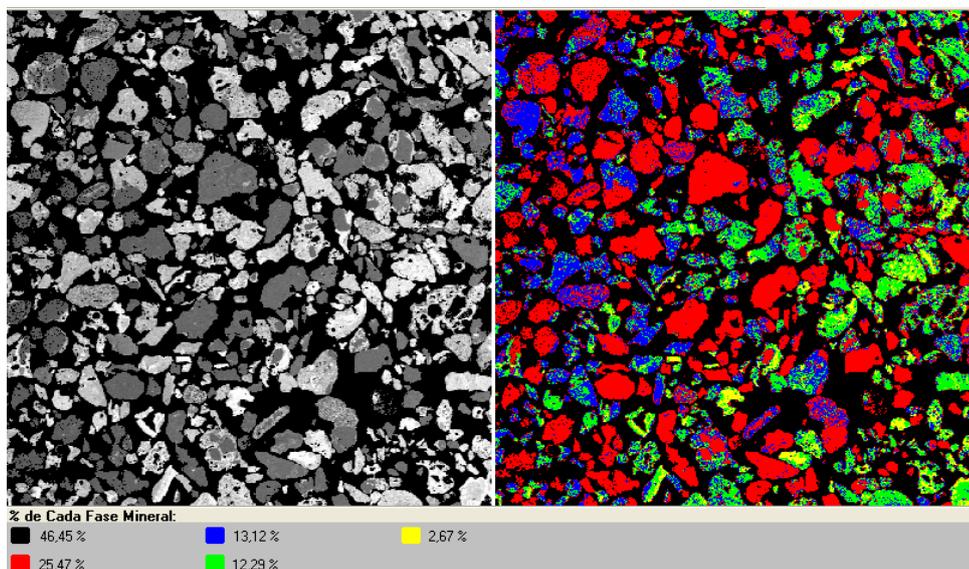


Figura 5.31: Análise de imagem da fração  $-0,425 +0,075\text{mm}$  da amostra *Laterita*.

Nas figuras 5-32 e 5-33 encontram-se as imagens obtidas no microscópio óptico de luz refletida. As imagens obtidas por MEV são apresentadas na figura 5-34. Duas faixas de tamanhos ( $-0,600 +0,425\text{mm}$  e  $-0,150 +0,075\text{mm}$ ) não foram analisadas por problemas na preparação da seção da pastilha relativa a estas duas faixas granulométricas. Novamente o que se vê é uma baixa liberação das partículas de goethita e hematita, que mesmo na fração mais fina apresentada (figura 5-33-a) encontra-se agregada às massas de material argiloso. As partículas de gibbsita começam a aparecer liberadas abaixo de  $0,425\text{mm}$ , apesar de não haver a imagem de  $-0,600\text{mm}$  para comparação, e de as partículas de caulinita serem observadas abaixo de  $0,212\text{mm}$ .

As partículas apresentadas nas figuras 5-33 (b) e (c) mostram a coexistência da goethita e da hematita nas faixas dos anéis botriodais, como já abordado anteriormente. É interessante também perceber nestas figuras as feições das massas de minerais presentes nas partículas. Na imagem de luz polarizada da figura (b), é possível ver pequenas partículas brancas agregadas à matriz, além da cor escura da mesma, que indicaria teor acentuado de ferro, apesar da baixa refletividade apresentada na imagem de luz refletida. Na imagem de luz polarizada da figura (c) é visível o aspecto terroso da massa cinza equivalente na imagem de luz refletida, a qual foi identificada como óxidos amorfos de ferro (“limonita”), onde certamente há a

presença de caulinita, como apresentado em imagens semelhantes obtidas pelo MEV. Nódulos de gibbsita presos em uma matriz de hematita e argilas podem ser vistos na figura 5-35.

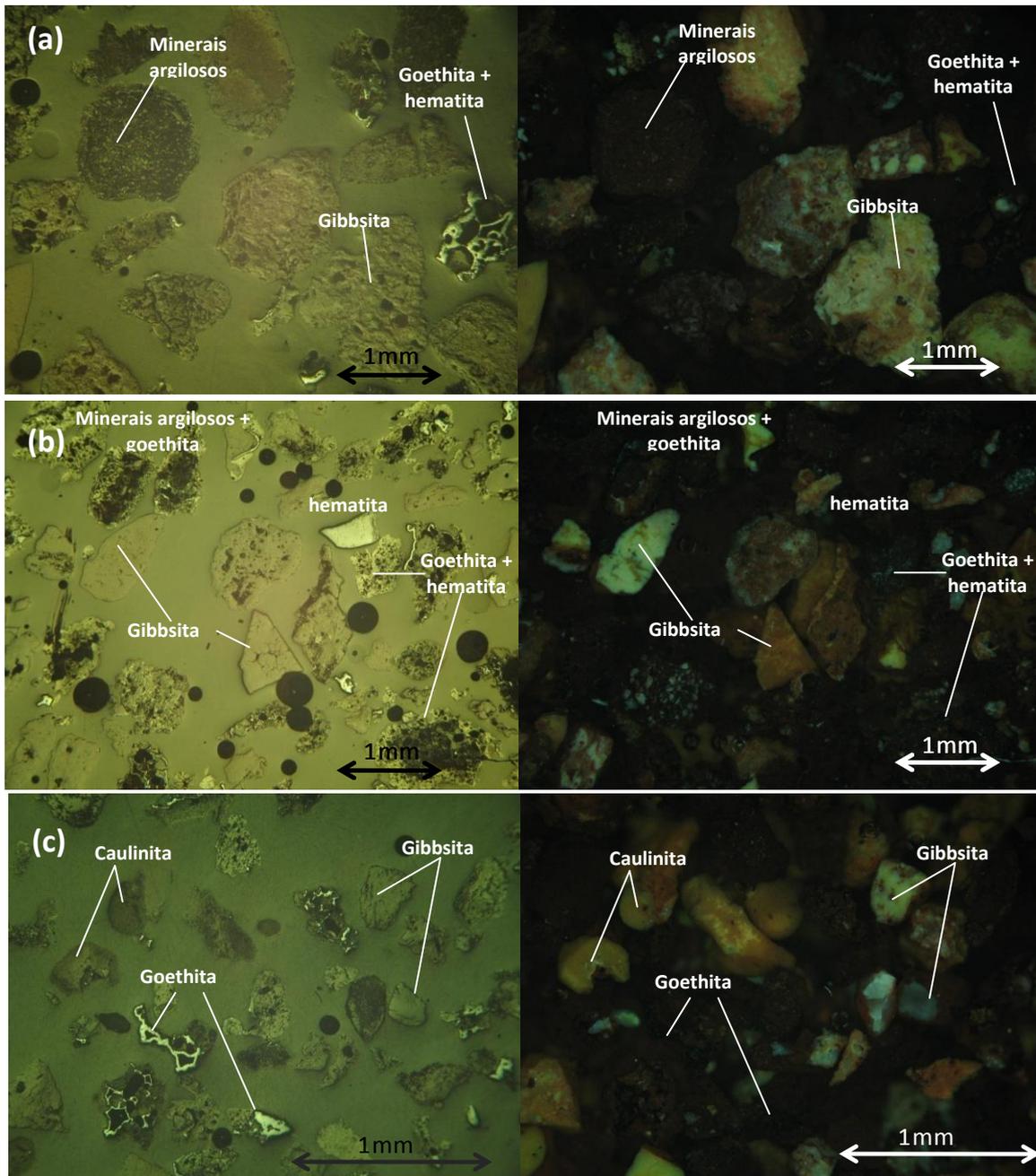


Figura 5.32: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Laterita (a) +0,840 mm ; (b) -0,840 +0,600mm e (c) -0,425 +0,212mm.

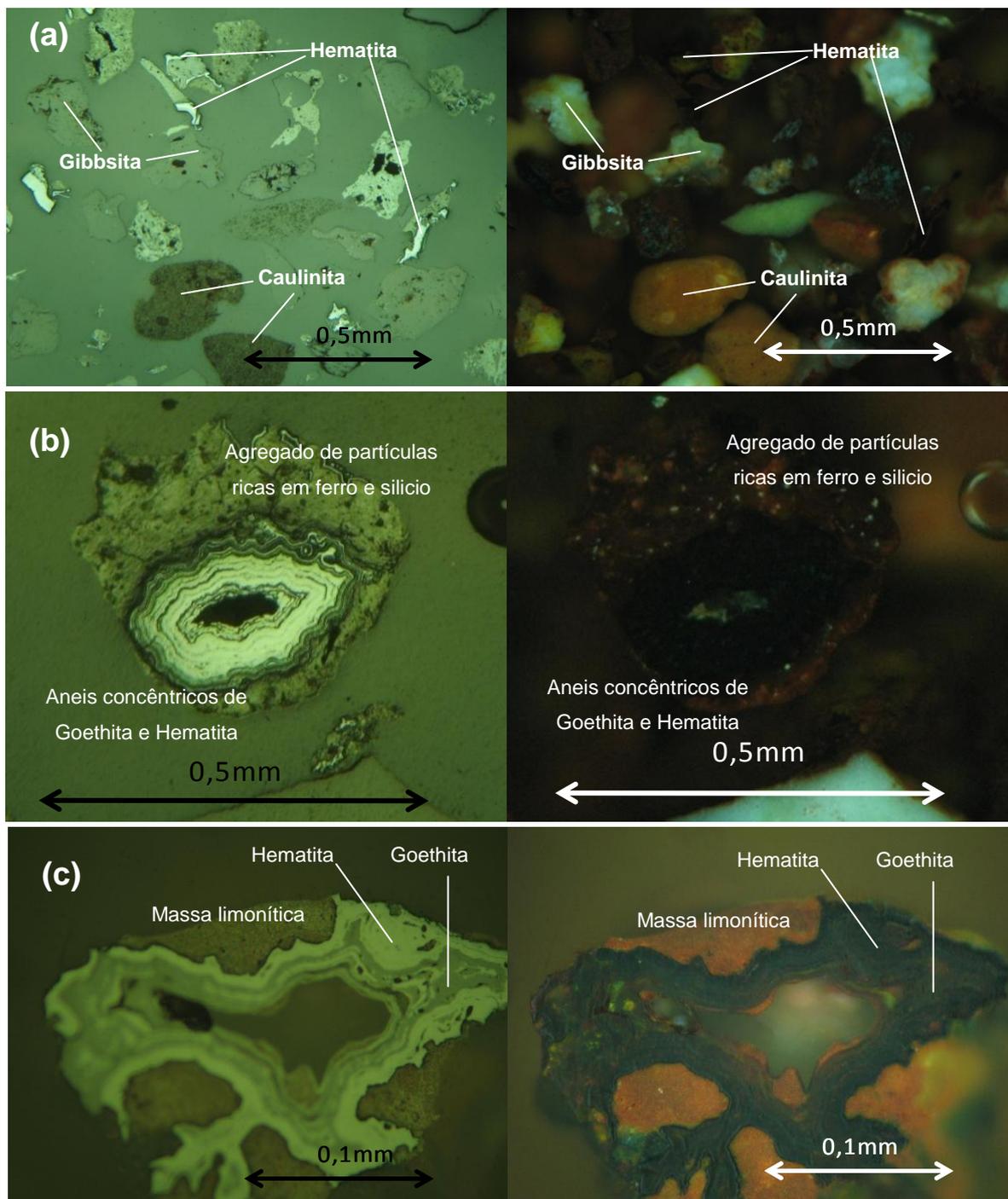


Figura 5.33: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Laterita (a)  $-0,212 + 0,150\text{mm}$  ; (b) e (c) detalhe de partícula mista contendo argilas e hematita + goethita na fração  $-0,425 + 0,212\text{mm}$  e  $-0,212 + 0,150\text{mm}$ .

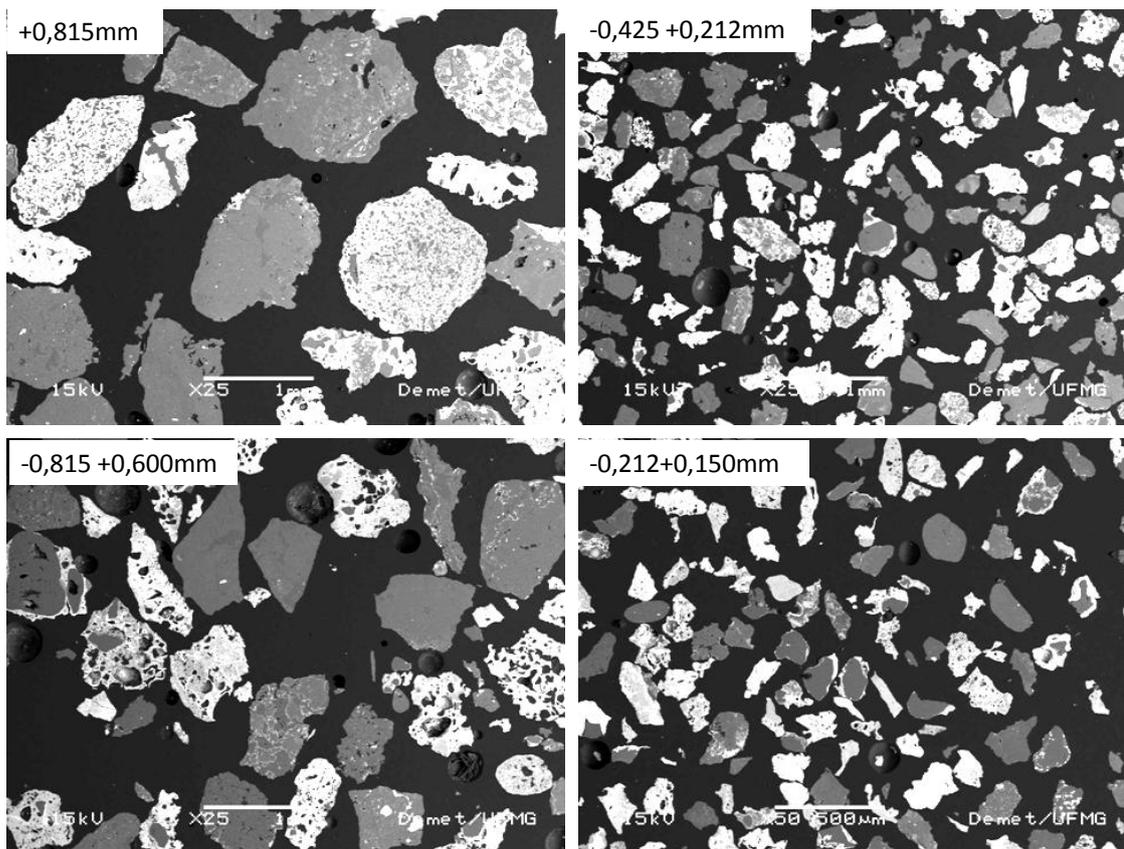


Figura 5.34: Laterita - Liberação das espécies em imagens de MEV.

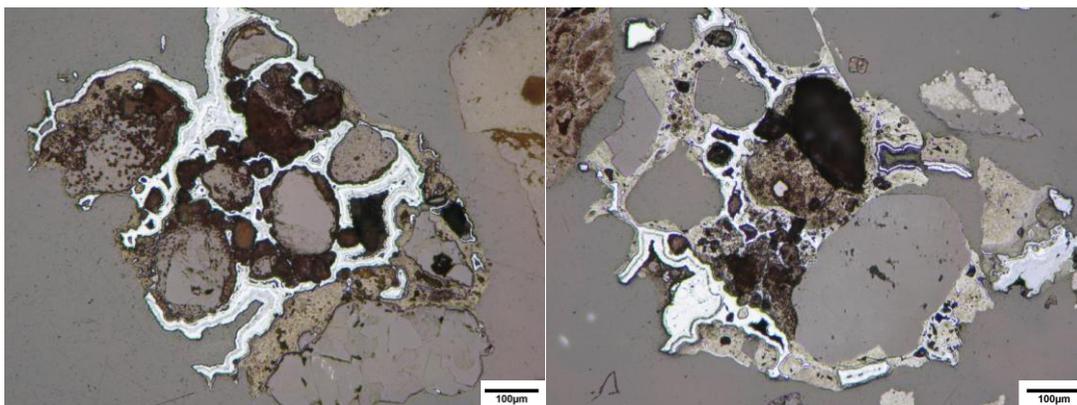


Figura 5.35: Estrutura nodular de partículas da fração  $+0,815\text{mm}$  da amostra Laterita.

### 5.5.3- Bauxita Maciça in Natura

A tipologia bauxita maciça in natura mostrou diferenças acentuadas em relação às duas anteriores. O primeiro é o baixo teor de sílica na micro análise da imagem, mostrada na figura 5-36 comparado aos equivalentes das outras duas tipologias (12,45% para Laterita e 13,2% para a bauxita nodular). Outra diferença é no teor de sílica das tonalidades cinza claro da imagem, que nas outras tipologias apresentava-se como uma massa com teores elevados de ferro e certo teor de sílica e alumina. Nesta amostra o teor de sílica é bastante reduzido, como se pode ver na figura 5-37. A diferença de tons de cinza nas partículas de gibbsita, cujos tons claros indicavam a presença de sílica, não ocorre de maneira intensa, como se pode observar na figura 5-38, onde também se pode ver uma pequena massa de partículas com teor de sílica elevado e que, por este ser maior do que o teor de alumina indicaria além da caulinita a presença de partículas de quartzo.

Uma partícula interessante encontrada na análise dessa fração da bauxita maciça in natura é aquela apresentada na figura 5-39 que se assemelha muito a uma brecha, onde as partículas de gibbsita são os clastos angulosos e os minerais ricos em ferro funcionam como que uma matriz que cimenta os clastos. De fato, possivelmente os minerais de ferro precipitaram ao redor das partículas de gibbsita que já se encontravam na rocha em decomposição.

O mapeamento de raios-x característico (figura 5-40) mostra que não há uma relação tão intensa entre o teor de silício e o teor de ferro, como nas outras tipologias.

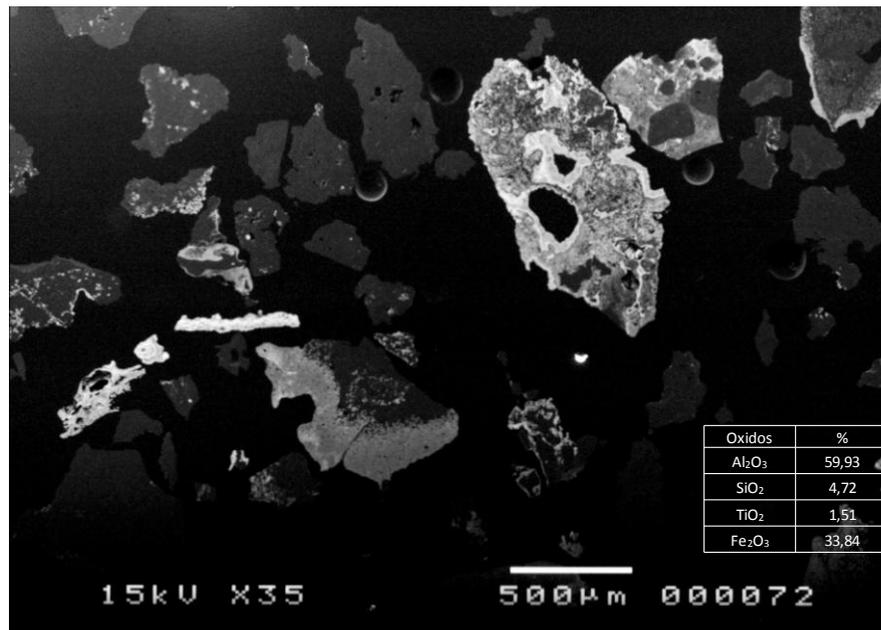


Figura 5.36: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,815 + 0,2125mm) – Geral

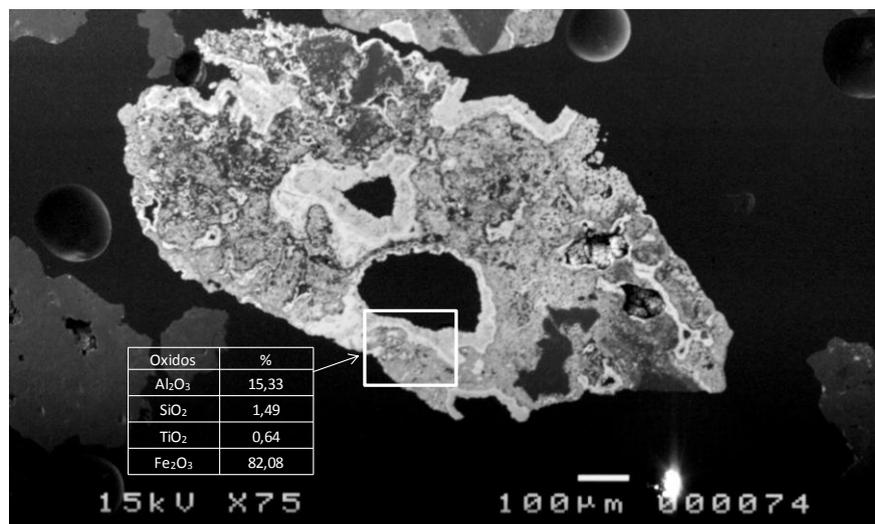


Figura 5.37: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,815 + 0,2125mm) – detalhe da partícula 1.

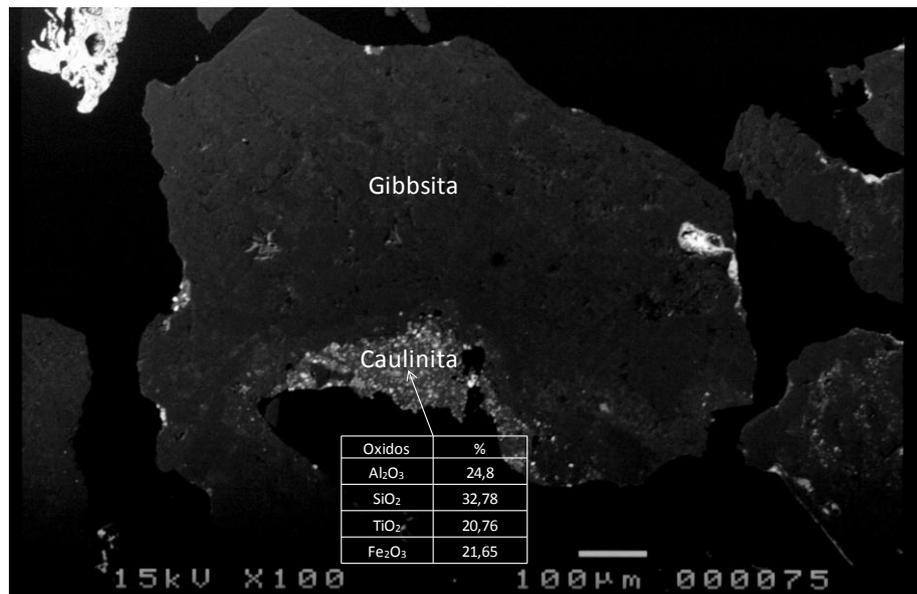


Figura 5.38: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,815 + 0,2125mm) – partícula de gibbsita com agregado de caulinita.

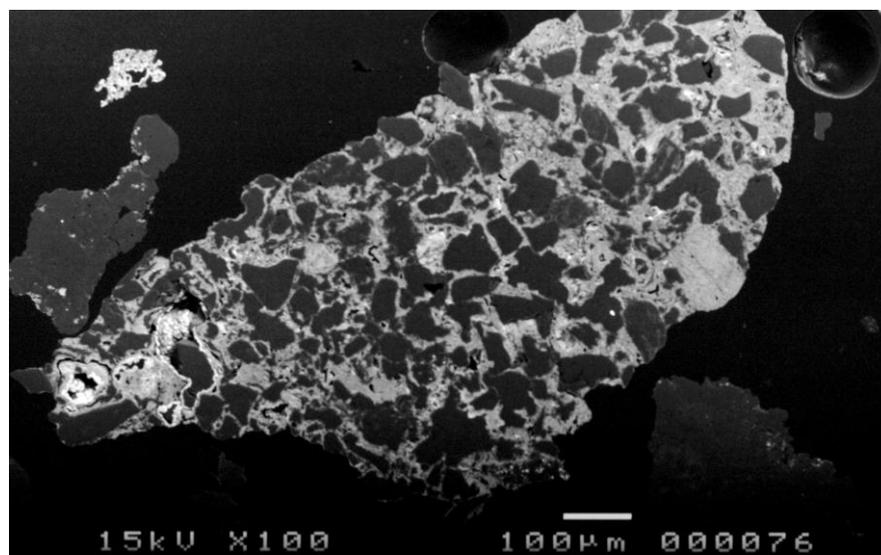


Figura 5.39: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,815 + 0,2125mm) – Agregado de gibbsita e goethita.

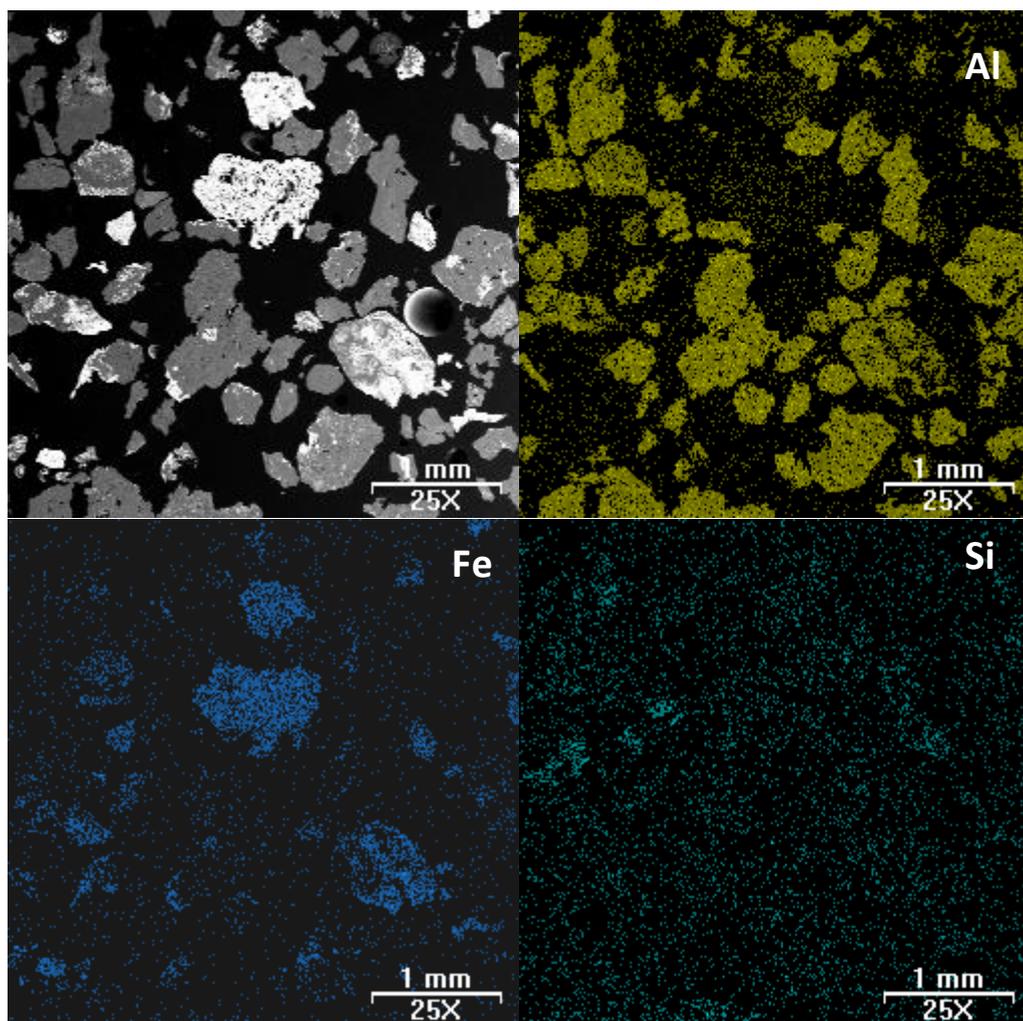


Figura 5.40: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,815 + 0,212mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício.

Na fração -0,425 +0,075mm, apresentada na figura 5-41, destaca-se novamente a disseminação das partículas ricas em ferro nas partículas de gibbsita, mesmo de tamanhos menores, como se pode observar na partícula 1 (detalhe na figura 5-42). A partícula 2 (figura 5-43) mostra veios de goethita que ocupam fraturas em uma partícula de gibbsita. Na figura 5-44 pode-se observar novamente a ligeira diferença entre tons de cinza em uma partícula de gibbsita, onde o tom mais claro apresenta um teor de sílica considerável.

O mapeamento de raios-x característico mostrado na figura 5-45 mostra que nesta granulometria não há correlação entre o teor de ferro e o teor de silício nas partículas.

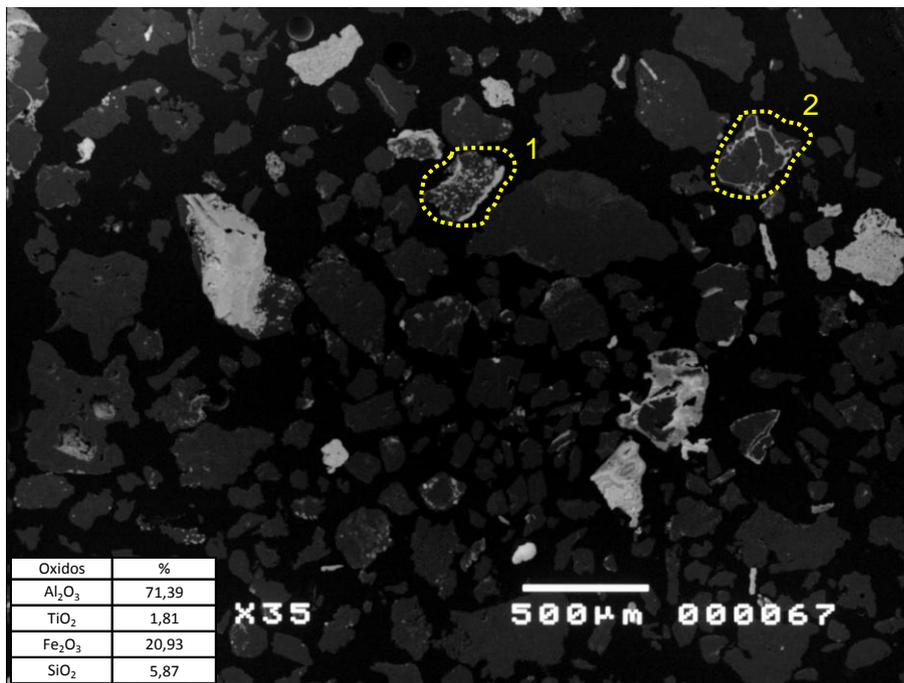


Figura 5.41: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,425 + 0,075mm) – Geral.

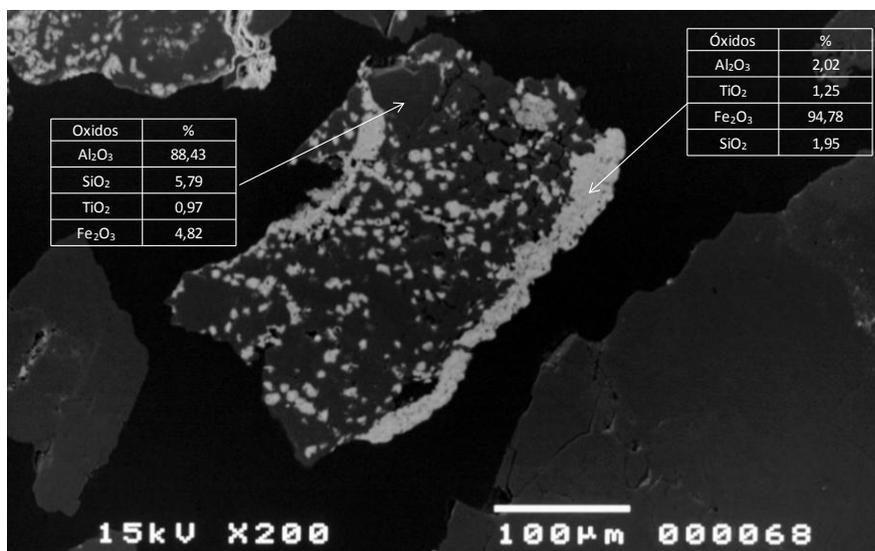


Figura 5.42: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,425 + 0,075mm) – Geral

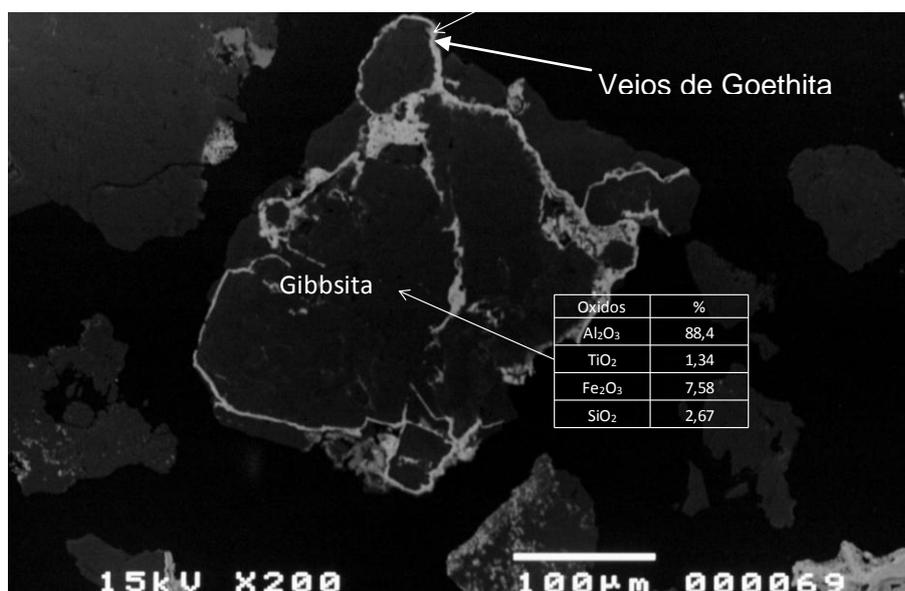


Figura 5.43: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,425 + 0,075mm) – Geral.

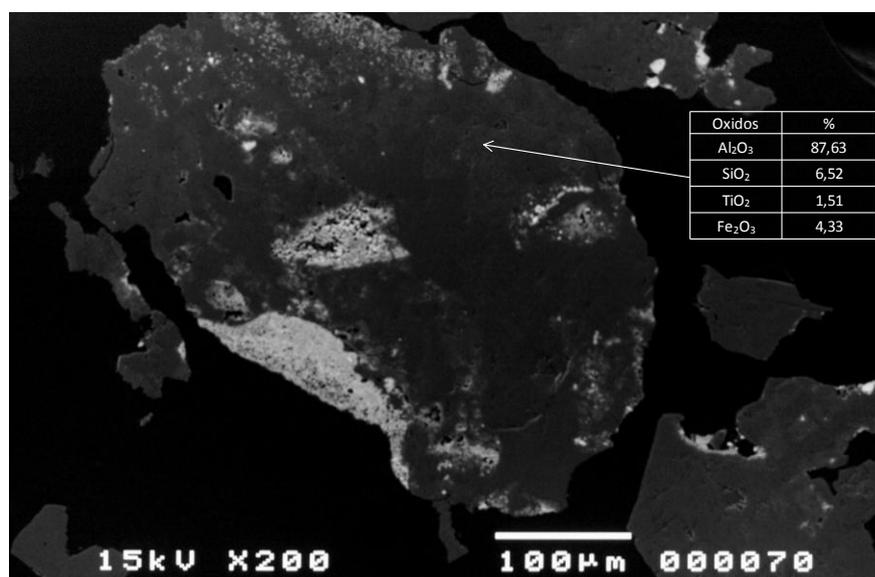


Figura 5.44: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,425 + 0,075mm) – presença de sílica no ton mais claro da partícula.

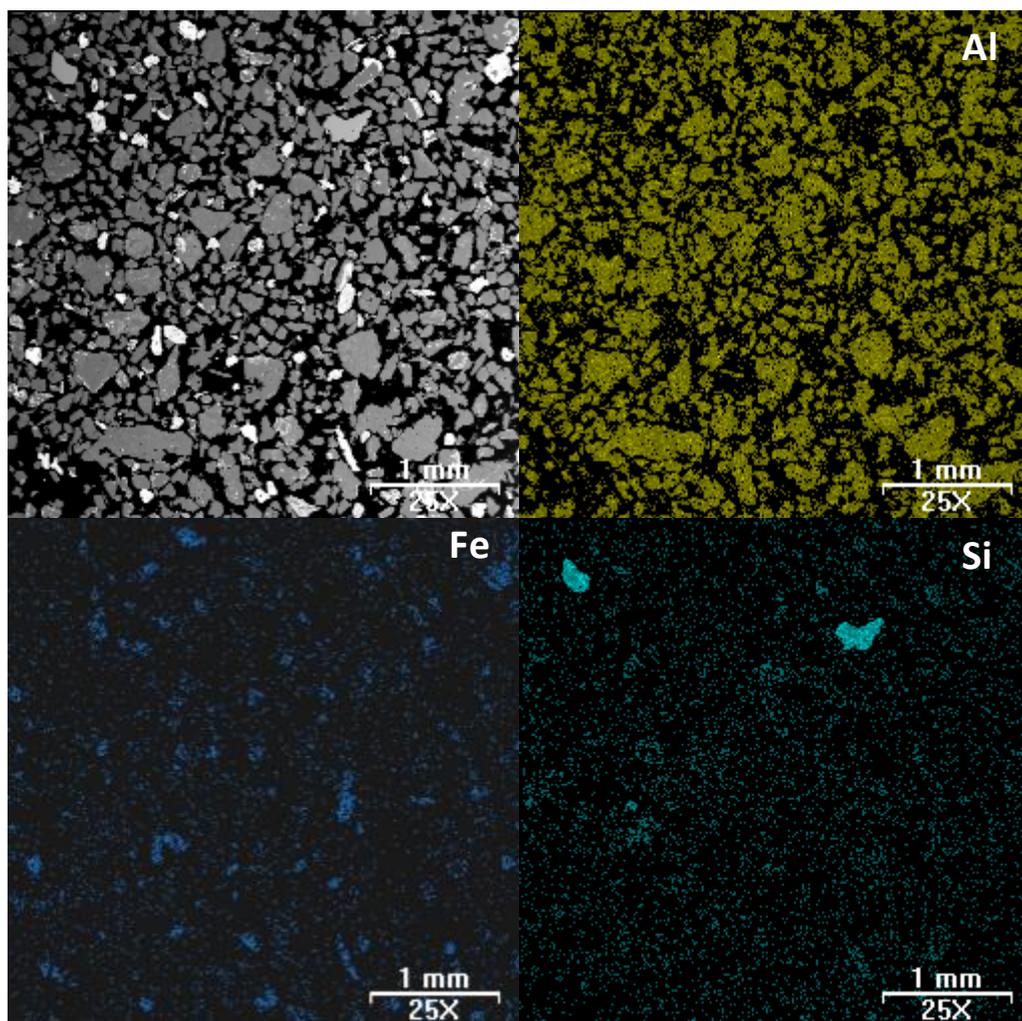


Figura 5.45: Bauxita Maciça *in Natura* (-0,425 + 0,075mm) Mapeamento de raios-x para alumínio, ferro e silício.

A análise de imagem apresentada nas figuras 5-46 e 5-47 mostra que praticamente a totalidade dos minerais de ferro encontra-se associados a outras fases na fração -0,815 +0,212mm, diferente da fração -0,425 +0,075mm, onde a primeira vista há pouca associação entre os minerais de ferro e a gibbsita, o que não se comprova pelas imagens do MEV para frações mais finas (figura 5-51). Na fração -0,815 +0,212mm, a gibbsita (fase vermelha) corresponde a 79%; a hematita (verde) corresponde a 9%; fases intermediárias (azul) que representam alto teor de ferro e presença de alumínio correspondem a 11% da área total. Para a fração 0,425 +0,075mm, a gibbsita corresponde a 93%; a hematita (amarelo) a 2%; as frações com teores intermediários de ferro e alumínio (verde e azul) correspondem a 5% da área total.

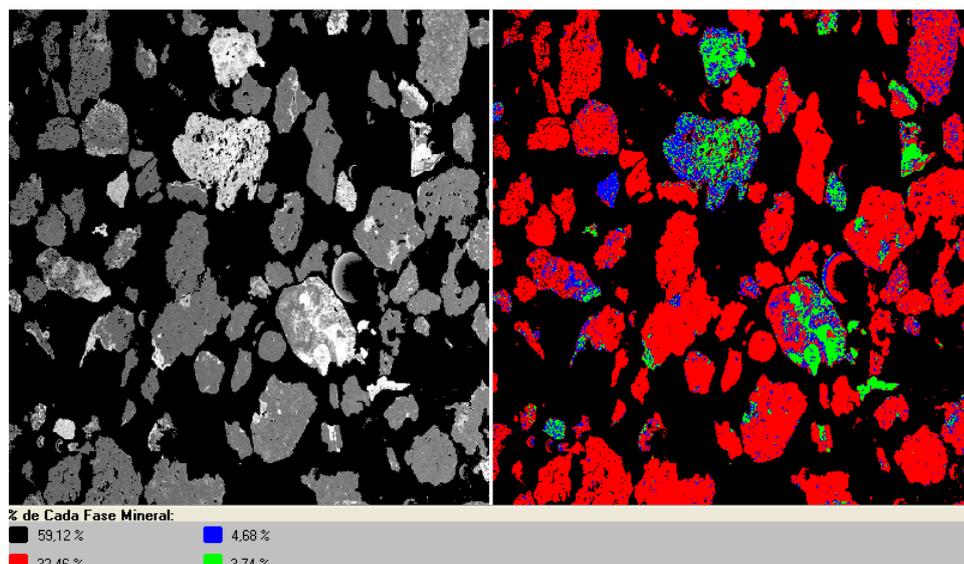


Figura 5.46: Análise de imagem da fração  $-0,815 +0,212\text{mm}$  da amostra *Bauxita Maciça in natura*.

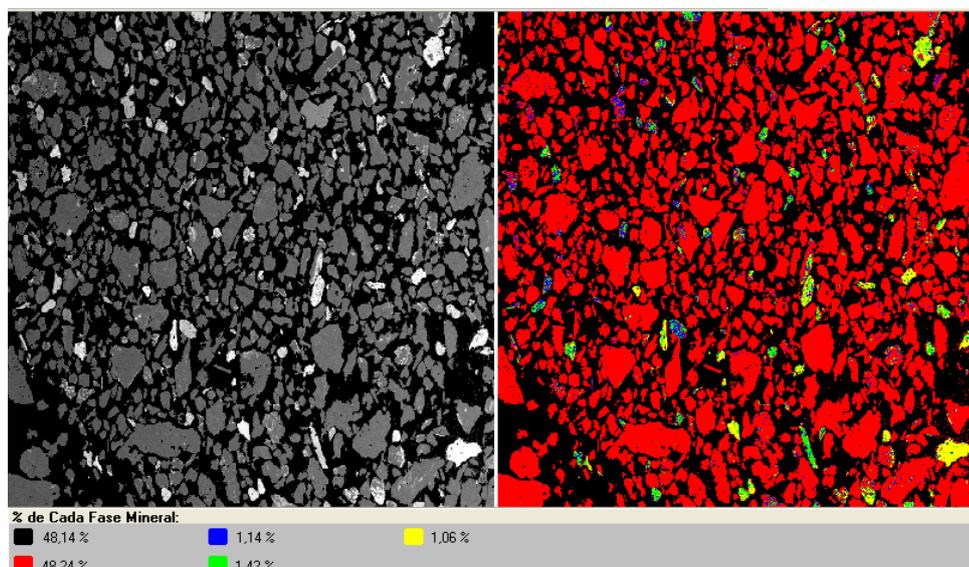


Figura 5.47: Análise de imagem da fração  $-0,425 +0,075\text{mm}$  da amostra *Bauxita Maciça in natura*.

As imagens obtidas pela microscopia óptica (figuras 5-48 e 5-49) mostram que abaixo de 0,600mm uma quantidade considerável de partículas de gibbsita já está liberada dos minerais de ferro. Estes últimos se encontram em partículas mistas de estruturas complexas, como as mostradas nas figuras 5-50 (a) e (b). Abaixo de 0,212mm, a liberação dos minerais de ferro já é bem considerável. Mesmo em tamanhos menores, a liberação total dos minerais de ferro não é alcançada, como se vê na figura 5-49 (c),

relativa à faixa  $-0,150 +0,075\text{mm}$ , que é o menor tamanho sugerido para concentração em espiral. As imagens do MEV (figura 5-51) obtidas por faixa também mostram que, apesar do número de partículas livres de gibbsita aumentarem nas frações mais finas, os minerais de ferro se encontram ainda associados em partículas mistas com estruturas de liberação difícil de alcançar.

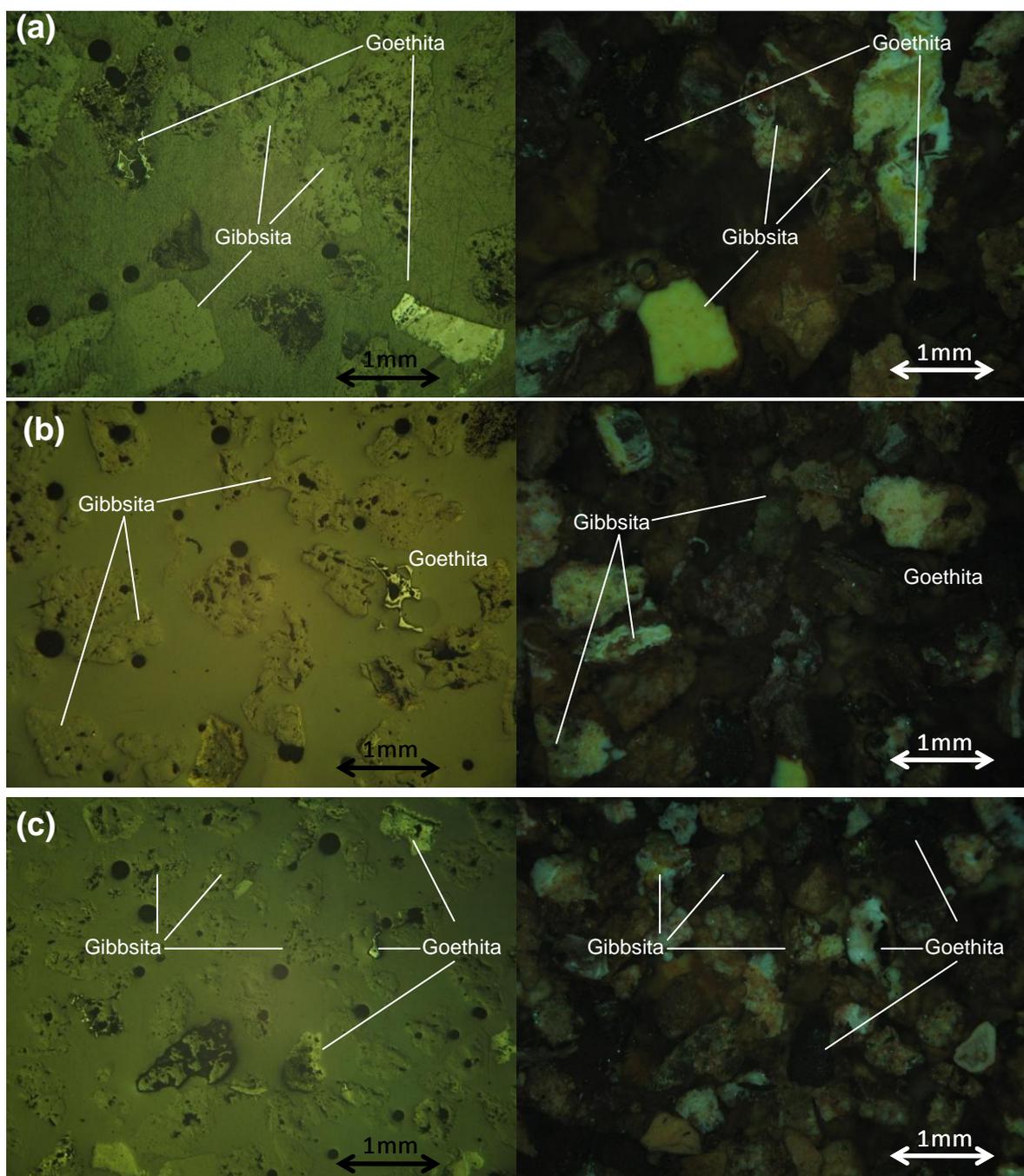


Figura 5.48: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Maciça *in Natura* (a)  $+0,840\text{ mm}$ ; (b)  $-0,840 +0,600\text{mm}$  e (c)  $-0,425 +0,212\text{mm}$ .

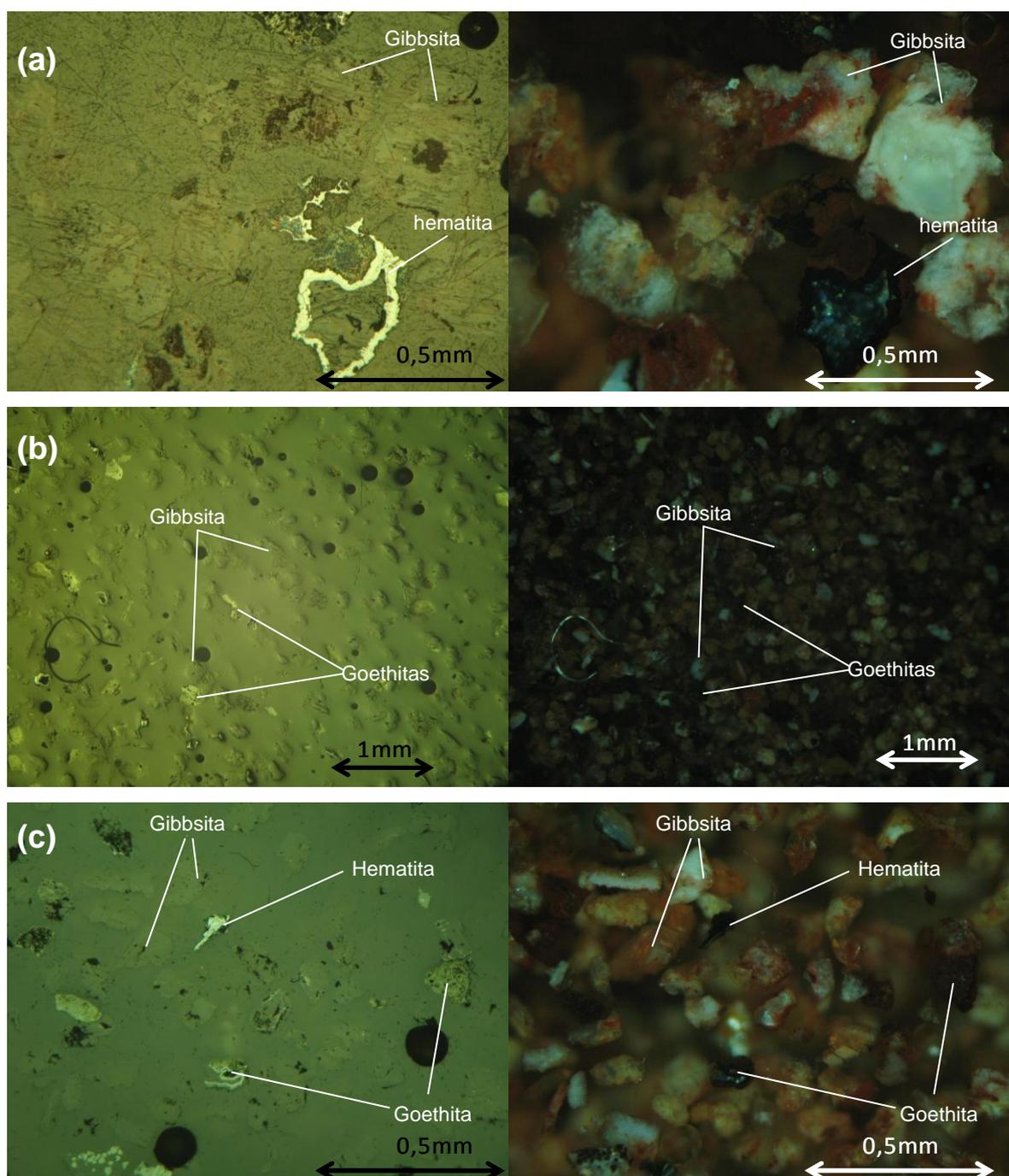


Figura 5.49: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Bauxita Maciça *in Natura* (a)  $-0,425 + 0,212$  mm ; (b)  $-0,212 + 0,150$ mm e (c)  $-0,150 + 0,075$ mm.

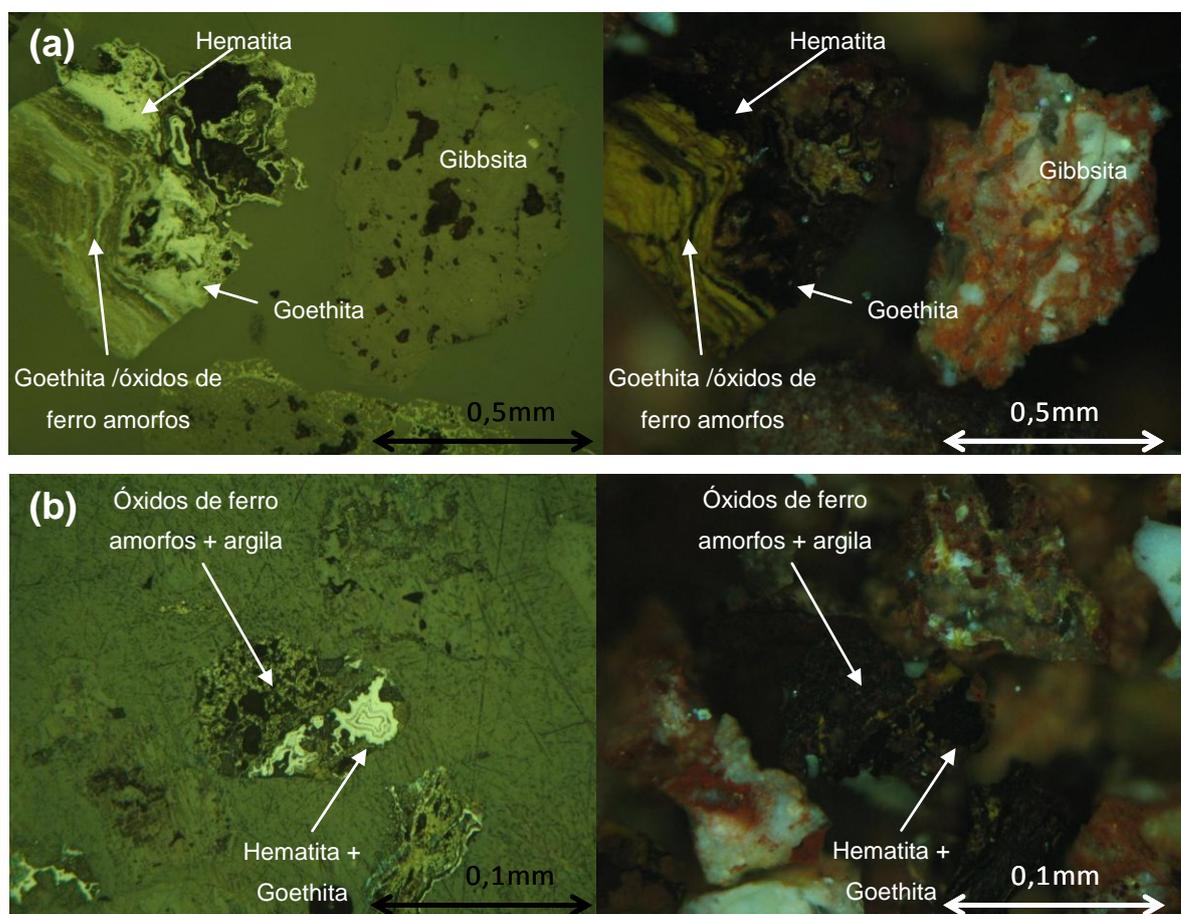


Figura 5.50: Micrografia em luz refletida (esquerda) e com luz polarizada (direita) de Maciça *in Natura* (a) -0,840 +0,600mm e (b) -0,212 +0,150mm.

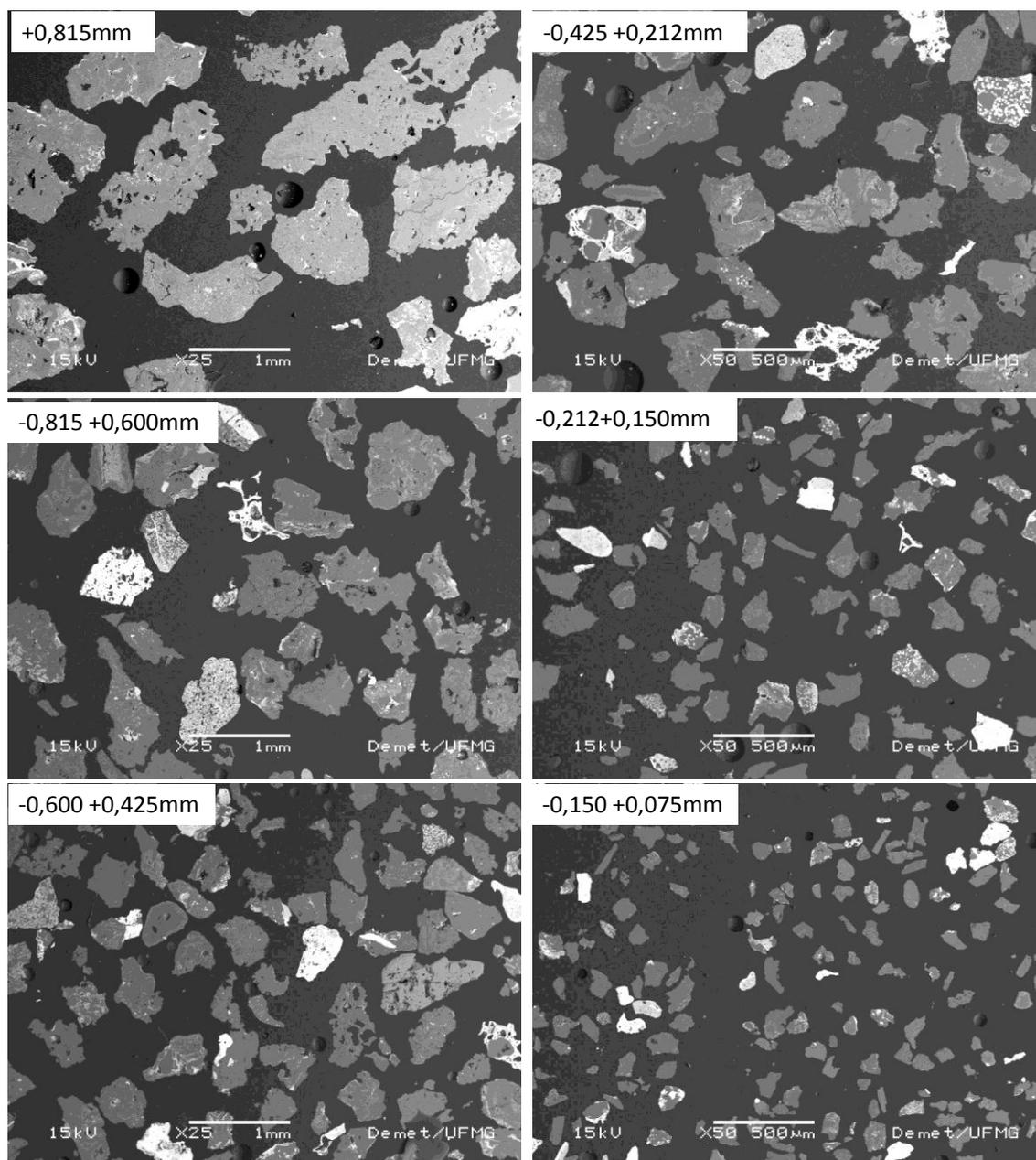


Figura 5.51: Bauxita Maciça in natura - Liberação das espécies em imagens de MEV.

## 5. – Testes de concentração

A tabela 5-9 apresenta os resultados obtidos nos testes de concentração em jigue e espiral. Os testes em jigue mostraram um pequeno aumento no teor de alumina no concentrado leve, além de uma redução no teor de sílica nas amostras bauxita nodular e laterita. A maior recuperação em massa foi alcançada na amostra Bauxita Nodular, em torno de 74%, seguida pela Laterita (65%) e Bauxita Maciça (62%), como pode ser observado na figura 5.52 (a). A Recuperação dos óxidos (Figura 5.52-b) mostra que não há uma diferença considerável entre a distribuição dos óxidos, indicando que a concentração não foi eficiente.

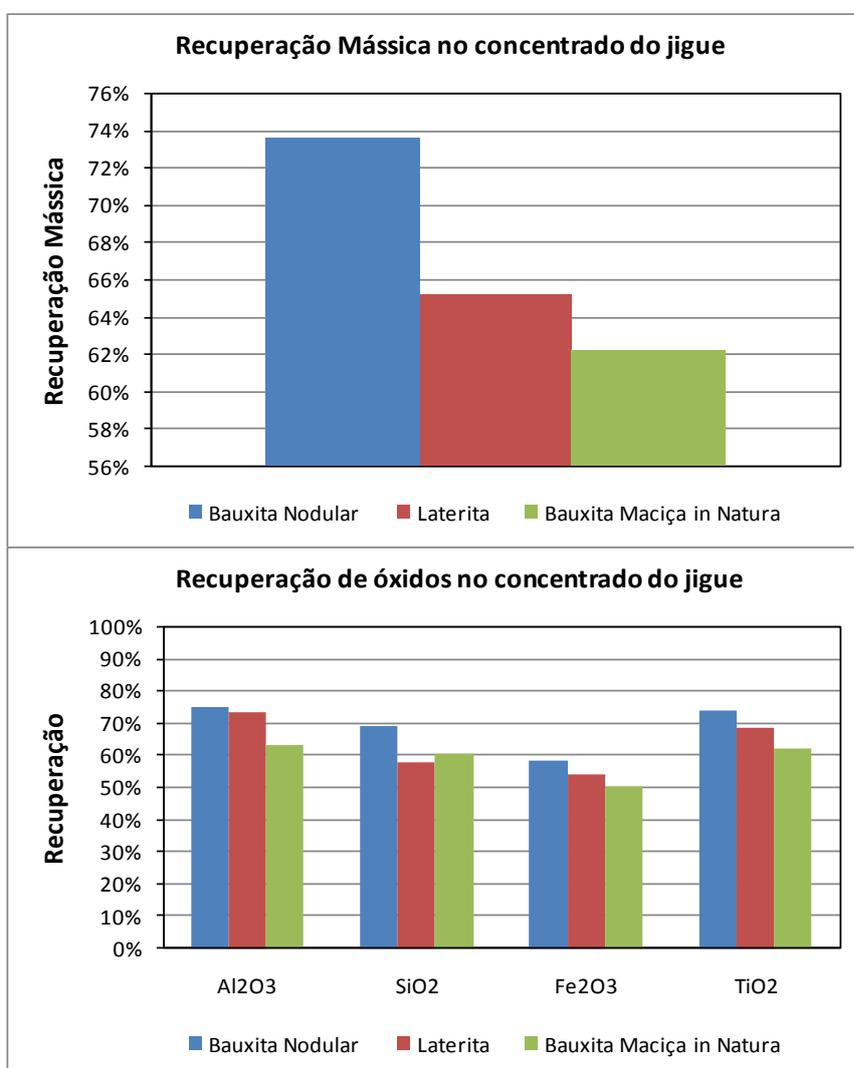


Figura 52: Recuperação mássica (a) e recuperação de óxidos (b) para os testes em Jigue.

A figura 5.53 mostra como o ganho no teor de alumina não é expressivo nos concentrados, especialmente na Bauxita Nodular e Bauxita Maciça, onde a presença de minerais densos é menor. A diminuição do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi mais expressiva na amostra Laterita (Figura 5.54), assim como o teor de  $\text{SiO}_2$  (Figura 5.55). Em termos da relação Alumina/silica, a bauxita nodular apresentou um aumento de 8,31 para 9,07, e a laterita de 6,52 para 8,31. A concentração por jigue não apresentou ganhos consideráveis no teor de alumínio.

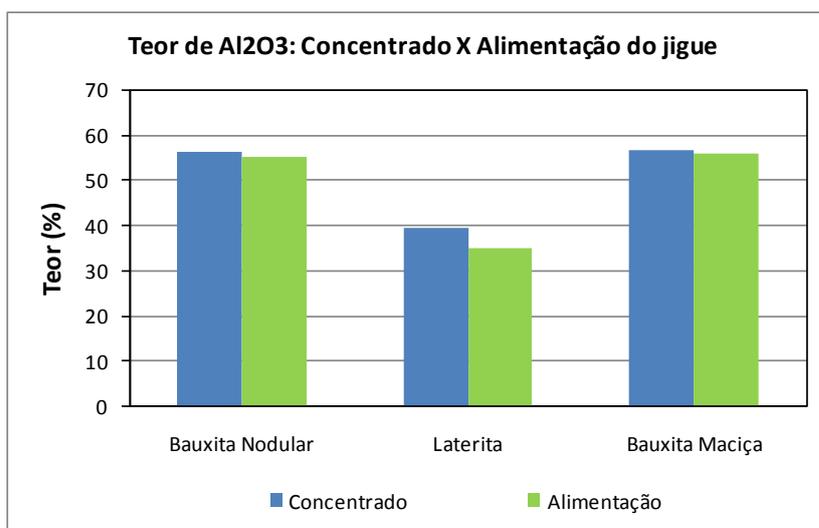


Figura 53: Comparação entre os teores de alumina na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras.

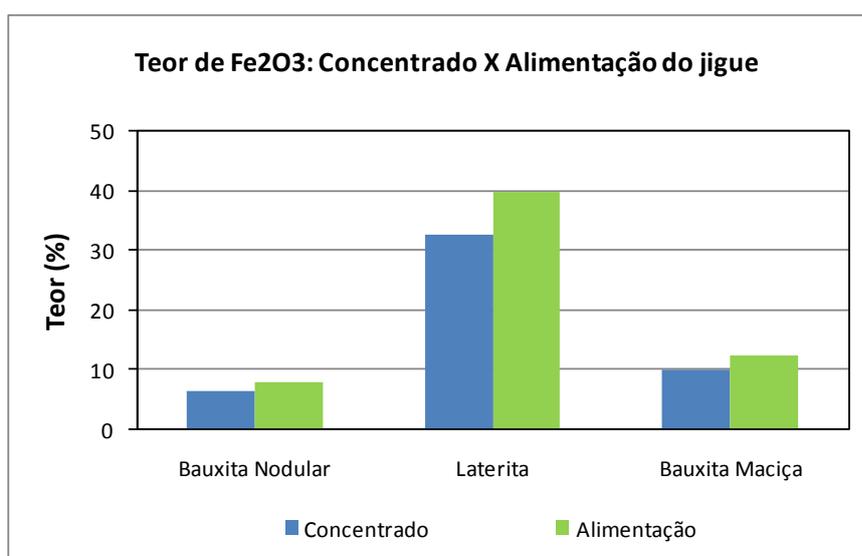


Figura 54: Comparação entre os teores de óxido de ferro na alimentação e no concentrado do jigue das três amostras.

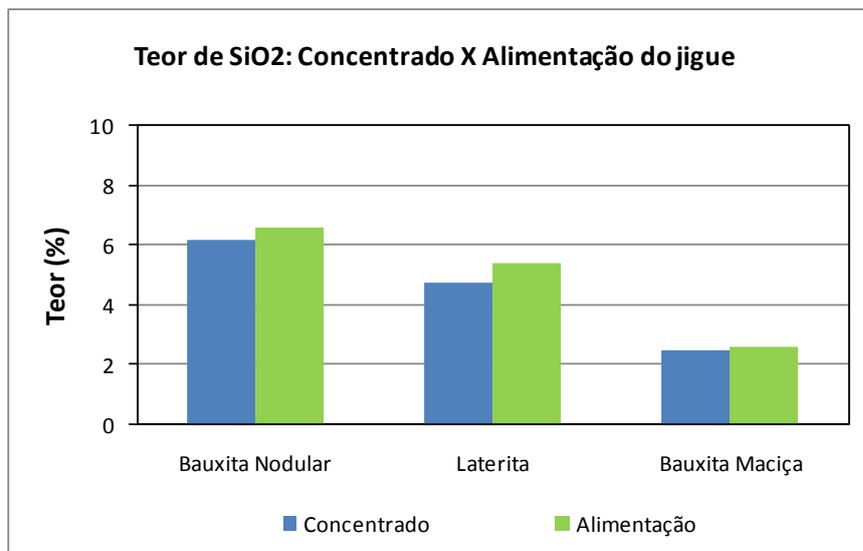


Figura 55: Comparação entre os teores de sílica na alimentação e no concentrado do jigge das três amostras.

A figura 5.56 mostra a recuperação mássica no concentrado das espirais para as três amostras. Observa-se que a maior recuperação foi obtida pela Bauxita Nodular, Bauxita Maciça e por fim Laterita, onde a menor recuperação foi obtida devido ser essa amostra a maior portadora de partículas densas. A recuperação dos óxidos (Figura 5.57) mostra que há uma distribuição diferencial entre a alumina (com maior recuperação nas três amostras) a sílica e o óxido de ferro, sendo que a diferença da recuperação de alumina e a recuperação do óxido de ferro é a mais acentuada.

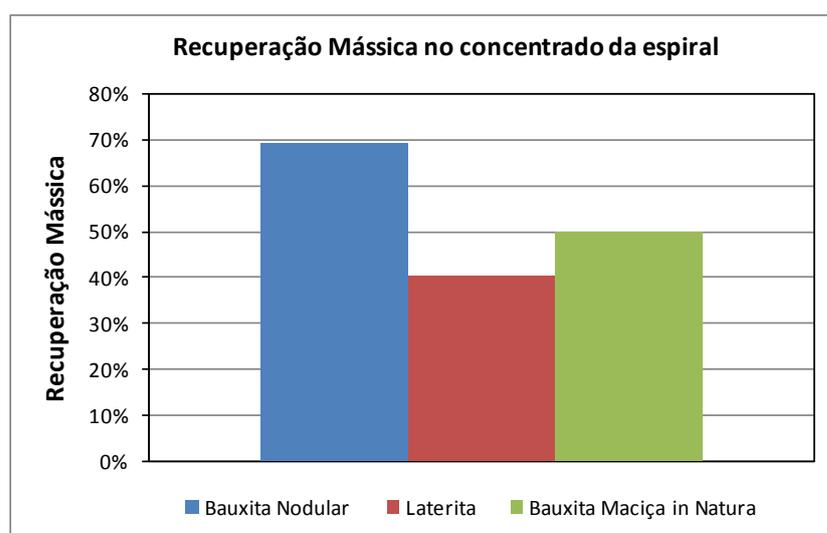


Figura 566: Recuperação mássica do concentrado das três amostras para os testes em espiral.

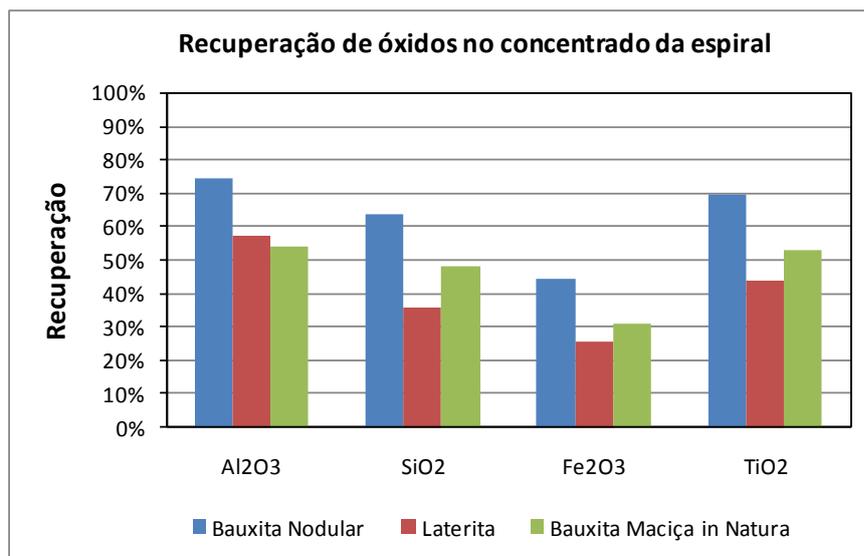


Figura 577: Recuperação de óxidos no concentrado das três amostras para os testes em espiral.

Os testes em espiral na fração  $-0,425 + 0,075\text{mm}$  mostraram para bauxita nodular um aumento no teor de alumina de 55,01 para 58,8%; para laterita um aumento de alumina de 30,28 para 42,8% e para bauxita maciça in natura um aumento de 54,60 para 59,2% (Figura 5.58). Os teores de óxido de ferro reduziram de 10,40 para 6,66% na Bauxita Nodular; de 48,54 para 31,1% na Laterita e de 14,89 para 9,23% para a Bauxita Maciça (Figura 5.59). Os teores de Silica reduziram de 8,04 para 7,41% na Bauxita Nodular; de 5,80 para 5,15% na Laterita; de 2,55 para 2,46% na Bauxita Maciça (Figura 5.60). A redução na relação Alumina/Silica aumentou de 6,84 para 7,94 na Bauxita Nodular; de 5,22 para 8,31 na Laterita e 21,39 para 24,05%.

Um maior ganho no teor de alumina para as amostras laterita e bauxita maciça in natura foi observado, o que é de se esperar pelo teor maior de ferro na alimentação dessas duas comparadas à alimentação da bauxita nodular. Houve também uma pequena redução no teor de sílica das três amostras, apesar de não tão expressiva. A relação alumina/sílica do concentrado não foi satisfatória nas amostras bauxita nodular e laterita apesar do aumento em relação à alimentação, alcançando valores de 7,94 e 8,31 respectivamente. Na bauxita maciça in natura a relação alumina /sílica já é suficiente na própria alimentação. A diminuição no teor de ferro das três amostras, dada pela razão do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  no concentrado e o teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na alimentação, foi igual e correspondente a 0,64.

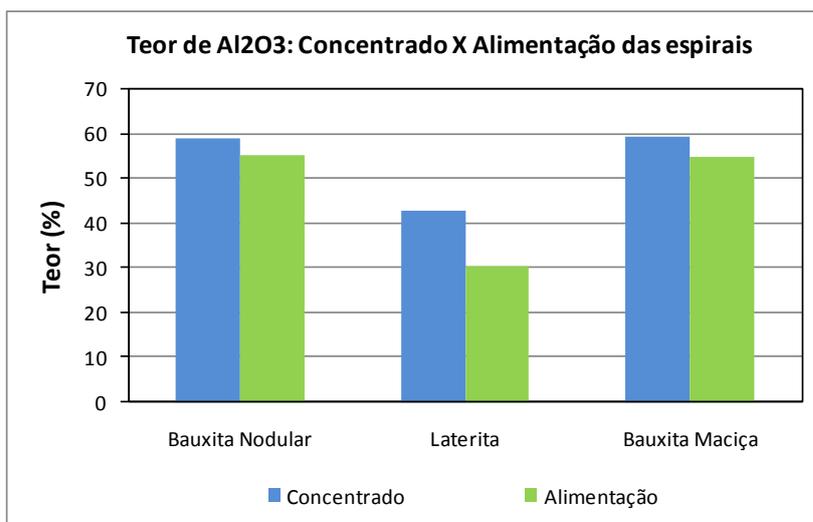


Figura 58: Comparação entre os teores de alumina na alimentação e no concentrado do jigge das três amostras.

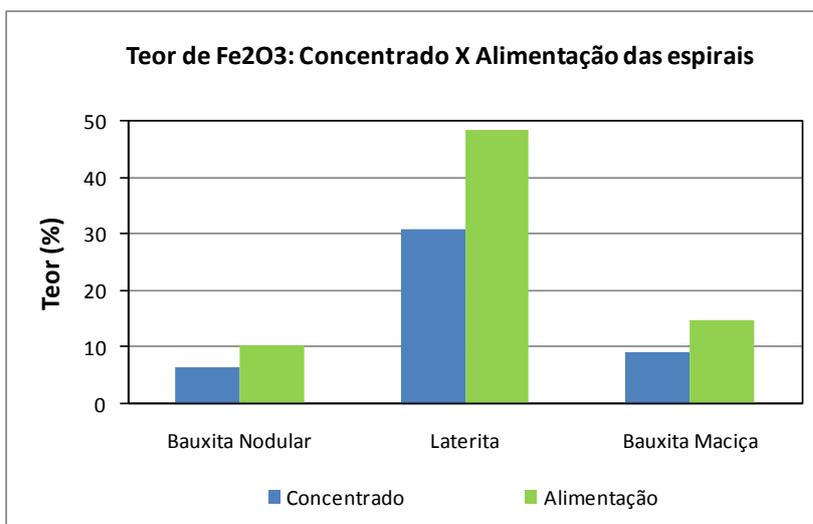


Figura 599: Comparação entre os teores de óxido de ferro na alimentação e no concentrado do jigge das três amostras.

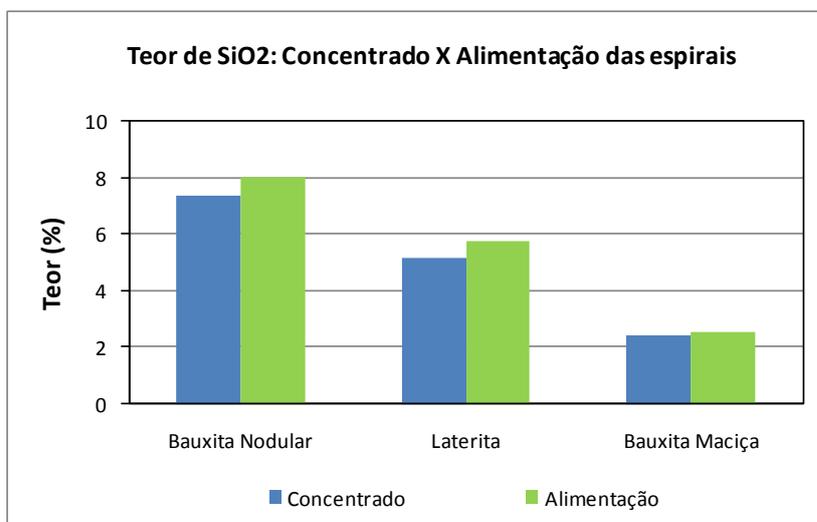


Figura 60: Comparação entre os teores de sílica na alimentação e no concentrado do jigge das três amostras.

Tabela 5.9: Resultados dos testes de concentração em jigue e espiral

	Amostras	Massa (g)	Teor (%)				Relação Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	Rec. Mássica (%)	Distribuição(%)				
			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>	
Bauxita Nodular	Jigue	Leves	339,7	56,04	6,18	6,47	1,17	9,07	73,6	75,0	68,8	58,4	73,8
		Densos	121,7	52,06	7,83	12,86	1,16	6,65	26,4	25,0	31,2	41,6	26,2
		Alim.	461,4	54,99	6,62	8,16	1,17	8,31	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Espiral	1	109,9	45,69	9,41	19,37	1,31	4,86	11,1	9,2	12,9	20,6	12,0
		2	84,6	45,4	10	20,64	1,23	4,54	8,5	7,0	10,6	16,9	8,7
		3	110,3	47,78	9,11	16,96	1,11	5,24	11,1	9,6	12,6	18,1	10,2
		Conc	689	58,83	7,41	6,66	1,2	7,94	69,3	74,1	63,9	44,4	69,1
		Alim.	993,80	55,01	8,04	10,40	1,20	6,84	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Laterita	Jigue	Leves	376,9	39,59	4,77	32,85	1,06	8,31	65,2	73,5	57,6	53,9
Densos			201,3	26,78	6,56	52,69	0,91	4,08	34,8	26,5	42,4	46,1	31,4
Alim.			578,2	35,13	5,39	39,76	1,01	6,52	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Espiral		1	99,4	17,66	6,20	66,31	0,82	2,85	18,2	10,6	19,5	24,9	17,3
		2	117,93	20,45	6,33	62,22	0,80	3,23	21,6	14,6	23,6	27,7	20,1
		3	108,5	27,16	6,17	52,85	0,81	4,40	19,9	17,8	21,1	21,6	18,6
		Conc	220,3	42,78	5,15	31,07	0,94	8,31	40,3	57,0	35,8	25,8	43,9
		Alim.	546,13	30,28	5,80	48,54	0,86	5,22	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Bauxita Maciça in Natura		Jigue	Leves	268,4	56,61	2,52	10,2	1,22	22,46	62,2	62,9	60,5	50,5
	Densos		163	54,95	2,71	16,49	1,23	20,28	37,8	37,1	39,5	49,5	38,0
	Alim.		431,4	55,98	2,59	12,58	1,22	21,60	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Espiral	1	56,9	45,99	2,61	27,15	0,96	17,62	3,6	3,0	3,6	6,5	3,7
		2	54,2	45,48	2,76	27,05	0,9	16,48	3,4	2,8	3,7	6,2	3,3
		3	687	50,72	2,64	19,48	0,86	19,21	43,0	40,0	44,5	56,3	40,2
		Conc	798,1	59,17	2,46	9,23	0,97	24,05	50,0	54,2	48,2	31,0	52,7
		Alim.	1596,2	54,60	2,55	14,89	0,92	21,39	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

## Capítulo 6 : Conclusões

1. A amostra bauxita maciça in natura é a que apresenta maior teor de alumina, seguida pela bauxita nodular e pela amostra denominada por laterita. O teor de óxido de ferro é mais expressivo na laterita, seguido pela bauxita nodular e pela bauxita maciça in natura. Já o teor de sílica é maior na bauxita nodular, seguido pela laterita e bauxita maciça in natura.
2. A principal fase mineral encontrada em todas as três tipologias é a gibbsita. A bohemita foi identificada na bauxita maciça in natura. A caulinita foi identificada em maior proporção na bauxita nodular, sobretudo na fração  $-0,075$ , onde aparece junto com a caulinita como fase majoritária. A presença da caulinita na bauxita maciça é menos expressiva do que na laterita. A hematita foi identificada como principal mineral portador de ferro, seguido pela goethita e pela magnetita. O anatásio foi identificado como mineral portador de titânio.
3. A amostra laterita foi a que apresentou distribuição granulométrica mais grosseira após a britagem. Além disso, a distribuição do ferro se mostrou maior nas frações mais grosseiras, o que não ocorreu na bauxita nodular e na bauxita maciça in natura.
4. A diferença de densidade entre os produtos magnético e não magnético das frações  $-0,815+0,212\text{mm}$  e  $0,425 +0,075\text{mm}$  levou a critérios de concentração muito próximos ao limite de aplicação de métodos gravíticos para as duas faixas de tamanho estudadas.
5. As amostras magnéticas são as que apresentam maior porosidade e maior área específica.
6. As imagens do MEV puderam identificar os principais minerais presentes nas amostras - gibbsita, caulinita, goethita/hematita, anatásio. Apesar de não aparecer na difração, o quartzo foi identificado pelo MEV/EDS.
7. Os minerais estão associados em partículas complexas onde muitas vezes há a disseminação de uma espécie em outra. A caulinita se mostrou associada a massas de agregados com teores expressivos de ferro, silício e alumínio, especialmente na bauxita nodular e laterita.

8. A liberação de partículas de gibbsita começa a ser considerável abaixo de 0,600mm para a bauxita nodular e para a bauxita maciça in natura. Para a laterita a liberação já é considerável abaixo de 0,425mm, mas não se pode concluir uma vez que não foi analisada a imagem -0,600mm.
9. O mapeamento de raios-x característico mostrou que há uma alta correlação entre os teores de silício e ferro nas partículas da bauxita nodular e laterita, o que seria de grande valia em um processo onde ocorra a separação da fase rica em ferro da fase rica em alumínio, como a separação magnética ou a separação gravítica.
10. Os testes em jigue não mostraram ganhos expressivos nos teores de alumina, sílica e ferro para a fração +0,815mm das amostras.
11. Os testes em espiral mostraram ganhos superiores aos alcançados com o jigue, sobretudo para a amostra denominada laterita. Entretanto, a relação Alumina/sílica ainda não foi suficiente para garantir a aplicação no processo Bayer.

## Capítulo 7 : Sugestões Para Trabalhos Futuros

1. Estudar com maior detalhe a cominuição das amostras, de modo a se obter uma menor geração de finos e assim, maior recuperação mássica. Processos como fragmentação em rolos de alta pressão, moagem autógena e semi-autògena seriam algumas opções.
2. Realizar ensaios de concentração em espiral, buscando a melhor combinação de variáveis operacionais que ofereça resultados satisfatórios para as amostras.
3. Estudar a possibilidade de concentração magnética das frações grosseiras da bauxita nodular e da laterita, buscando aproveitar a correlação entre ferro e silício nas partículas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIME. Proceedings of 85° Meeting. New York City, 1904.

ARAUJO, A. C. *Mercado de Minério de Ferro e Tendências Futuras*. In Minério de Ferro – Processos de Obtenção e Sua Utilização na Siderurgia. Curso da ABM, Belo Horizonte, 2003, Cap 10.

ATASOY, Y; SPOTTISWOOD, D. J. *A Study of Particle Separation in a Spiral Concentrator*. Minerals Engineering, Vol 8, N°10, 1995, pp. 1197-1208.

AUTHIER-MARTIN, M. et al. *The Mineralogy of Bauxite for Producing Smelter-Grade Alumina*. JOM, 2001. Minerals, Metals & Materials Society V. 53, N° 12, pp. 36-40

BIRKELANO, P. W. *Soils And Geomorphology*. New York: Oxford University Press. 3th. 1999, Pp. 53-104

BURT, R. O. *Gravity Concentration Technology*. Amsterdam: Elsevier, 1984.

CHAVES, A. P. et al. *The Practice of Bauxite Ores Processing*. XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Ouro Preto – MG, Novembro 2007, pp 187-192.

CSILLAG, Z et al. *Role of Ore Dressing in Beneficiation of Monohydrate Bauxite*. In Bauxite, SME, Chapter 34, 1984.

DANA, J. D., HURLBUT, C. S.. *Manual de Mineralogia*. Rio de Janeiro, 1969. Livros Técnicos e Científicos Editora. 1ª Ed. v. 1, pp 341.

DELBEM I.D.; GALERY, R.; *LibMin: Manual Prático de Instalação e Utilização*; DeMin/UFMG; Março/2009; 45p.

FALCUCCI, A. *A influência de floculantes poliméricos na formação de pastas minerais*. Dissertação de mestrado, CPGEM, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

GANDRUD, B. W., DE VANEY, F. D. *Float-and-Sink Fractionations and Flotation experiments of bauxite ores*. United States Bureau of Mines, Department of Commerce, and the University of Alabama. Washington, 1929.

GREIG, E. W. Trombetas and Other Amazon Basin Bauxites. AIME Transactions Volume 264, (1978)pp.1719 -1727.

FALCONER, A. *Gravity Separation: Old Technique/New Methods*. Physical Separation in Science and Engineering, 2003, vol 12, N°1, pp. 31-48.

HARTMAN, H. L.. *Introductory Mining Engineering*. Jonh Wiley & Sons, 1987, pp194-207.

HOLLAND-BATT, A. B. *Some design considerations for spiral separators*. Minerals Engineering, Vol 8, N° 11 1995, pp. 1381-1395.

HU, Y.; LIU, X.; XU, Z..*Role of crystal structure in flotation separation of diaspore from kaolinite, pyrophyllite and illite*. Minerals Engineering, 16 (2003). P. 219–227

HU, Y.; WEI, S.; HAIPU, L.; XU, Z.. *Role of Macromolecules in Kaolinite flotation*. Minerals Engineering 17. 2004. p. 1017-1022.

LINS, F. A. F. *Concentração Gravítica*. In Tratamento de Minérios, 4ª Edição, CETEM, Rio de Janeiro, 2004, pp 269-301.

MARTIRES, R. A. C. *Balanço Mineral Brasileiro: Alumínio*. DNPM. 2001.

MARTIRES, R. A. C.. *Sumário Mineral Brasileiro: Alumínio*. DNPM. 2005.

MASSOLA, C. P.. *Reverse Froth Flotation of Bauxites From the Zona da Mata Area*. XXII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Ouro Preto - MG, Novembro 2007, pp 431-437.

MELFI, A; PEDRO, G.. *Estudo Geoquímico dos Solos e Formações Superficiais do Brasil*. Revista Brasileira de Geociências, Volume 7, 1977. Pp 271-284.

MELFI, A; CERRI, C. C.; FRITSCH, E.; FORMOSO, M. L. L.. *Tropical Soils: Genesis, Distribution and Degradation of Lateritic Pedological Systems*. Workshop on Tropical Soils. Rio de Janeiro. Academia Brasileira de Ciências, 1999, pp. 7-30.

MEYER, F.M. *Availability of Bauxite Reserves*, Natural Resources Research, v. 13, nº 3 (2004).

MILOVSKY, A. V; KONONOV, O. V. *Mineralogy*. MIR Publishers Moscow.1985. pp139.

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C.. *A Flotação como Operação Unitária no Tratamento de Minérios*. In Teoria e prática do Tratamento de Minérios – Flotação. Editora Signus, Volume 4, 1ª Edição, 2006, pp. 1-29.

SAMPAIO\*, J. A.; ANDRADE, M. C; DUTRA, A. J. B. *Bauxita*. In Minerais e Rochas Industriais. CETEM, 2005 p. 279-304.

SAMPAIO, J. A.; NEVES, C. H. B.. *Bauxita, MSL Minerais S. A.* In Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil. CETEM, 2001, pp. 307-314.1

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. *Beneficiamento Gravimétrico*. Editora UFRGS, 1ª Edição, 2005.

SILVA, A. T.. *Tratamento de Minérios*. Edições Engenharia,UFMG, Volume 2, Belo Horizonte, 1976, pp 1-5.

SUDGEN, D. *The Laterite-Bauxite Deposits of the Trombetas and Paragomimas regions of the Amazon Basin*. SME. In *Bauxite*. 1984. PP 370 -386

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A..*Intemperismo e formação do solo*. In Decifrando a Terra. Oficina de Textos, USP. São Paulo, 2001, pp 140-166.

XU, Z.; PLITT, V.; LIU, Q..*Recent advances in reverse flotation of diasporic ores - A Chinese experience*. Minerals Engineering, 17 (2004), p.1007–1015

WANG, Y., HU, He, P., Gu, G. *Reverse flotation for removal of silicates from diasporic-bauxite*. Minerals Engineering 17 (2004) 63-68.

WILLS, B. A.. *Mineral Processing Technology*. Oxford: Pergamon Press. 5ª Edição, 1992. Pp 407-447.

## ANEXOS

## Distribuição Granulométrica das três amostras

	Abertura (mm)	Massa (g)	% retida simples	%retida acumulada	% passante acumulada
Bauxita Nodular	1,19	18,90	4,74	4,74	95,26
	0,84	60,66	15,22	19,96	80,04
	0,6	38,05	9,54	29,50	70,50
	0,425	30,56	7,67	37,17	62,83
	0,3	16,83	4,22	41,39	58,61
	0,212	18,38	4,61	46,00	54,00
	0,15	11,48	2,88	48,88	51,12
	0,105	8,11	2,03	50,91	49,09
	0,075	8,91	2,23	53,15	46,85
	0,053	0,00	0,00	53,15	46,85
	0,045	8,82	2,21	55,36	44,64
	-0,045	177,98	44,64	100,00	0,00
Total	398,68	100			
Laterita	1,19	7,09	3,24	3,24	96,76
	0,84	44,25	20,24	23,48	76,52
	0,6	28,47	13,02	36,51	63,49
	0,425	26,50	12,12	48,63	51,37
	0,3	15,96	7,30	55,93	44,07
	0,212	19,68	9,00	64,93	35,07
	0,15	13,61	6,23	71,16	28,84
	0,106	10,50	4,80	75,96	24,04
	0,075	11,90	5,44	81,40	18,60
	0,053	12,37	5,66	87,06	12,94
	0,045	1,82	0,83	87,89	12,11
	-0,045	26,47	12,11	100,00	0,00
Total	218,62	100			
Bauxita Maciça in Natura	1,19	3,93	1,43	1,43	98,57
	0,84	36,08	13,12	14,55	85,45
	0,6	26,04	9,47	24,02	75,98
	0,425	27,29	9,92	33,94	66,06
	0,3	17,40	6,33	40,27	59,73
	0,212	21,55	7,84	48,11	51,89
	0,15	14,95	5,44	53,54	46,46
	0,106	11,84	4,31	57,85	42,15
	0,075	15,27	5,55	63,40	36,60
	0,053	16,91	6,15	69,55	30,45
	0,045	1,77	0,64	70,20	29,80
	-0,045	81,96	29,8047202	100	0
Total	274,99	100			

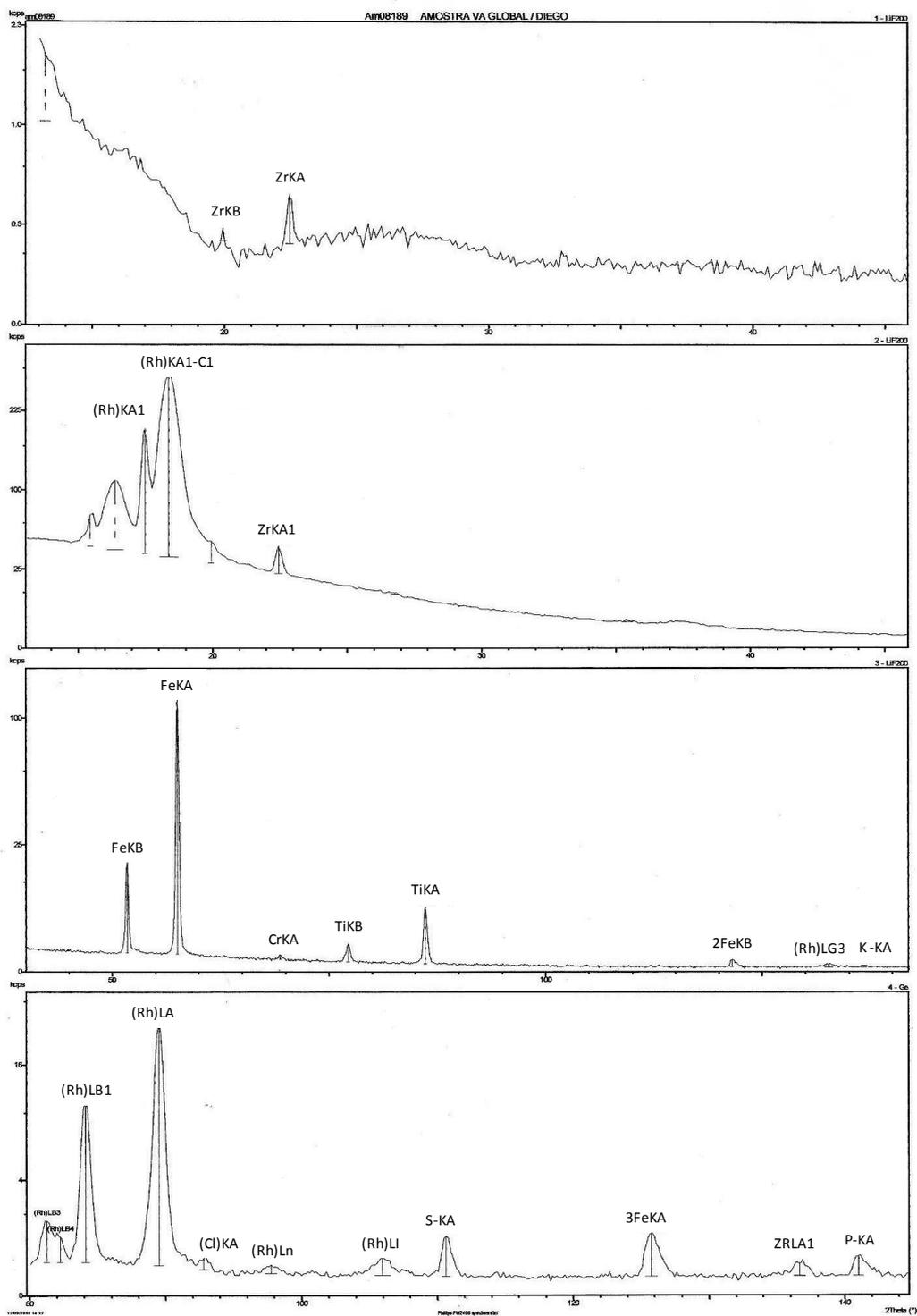
## Determinação da densidade por picnometria a água

Amostra	Tamanho	Produto	mpic	mpic + agua	msolido	mpic+solido	mpic+solido+ agua	Densidade
Bauxita Nodular	-815+212	Magnético	23,83	50,47	9,34	33,17	56,69	2,99
		Não Magnético	23,83	50,47	8,32	32,15	55,38	2,43
	-425 +75	Magnético	23,83	50,47	6,97	30,8	55,11	2,98
		Não Magnético	23,83	50,47	10,56	34,39	56,72	2,44
Laterita	-815+212	Magnético	23,83	50,47	10,99	34,82	58,15	3,31
		Não Magnético	23,83	50,47	8,136	31,966	55,39	2,52
	-425 +75	Magnético	23,83	50,47	10,56	34,39	57,93	3,40
		Não Magnético	23,83	50,47	8,92	32,75	55,77	2,46
Bauxita Maciça in Natura	-815+212	Magnético	23,83	50,47	8,3	32,13	55,89	2,87
		Não Magnético	23,83	50,47	10,91	34,74	56,91	2,43
	-425 +75	Magnético	23,83	50,47	9,647	33,477	56,71	2,82
		Não Magnético	23,83	50,47	9,167	32,997	55,92	2,46

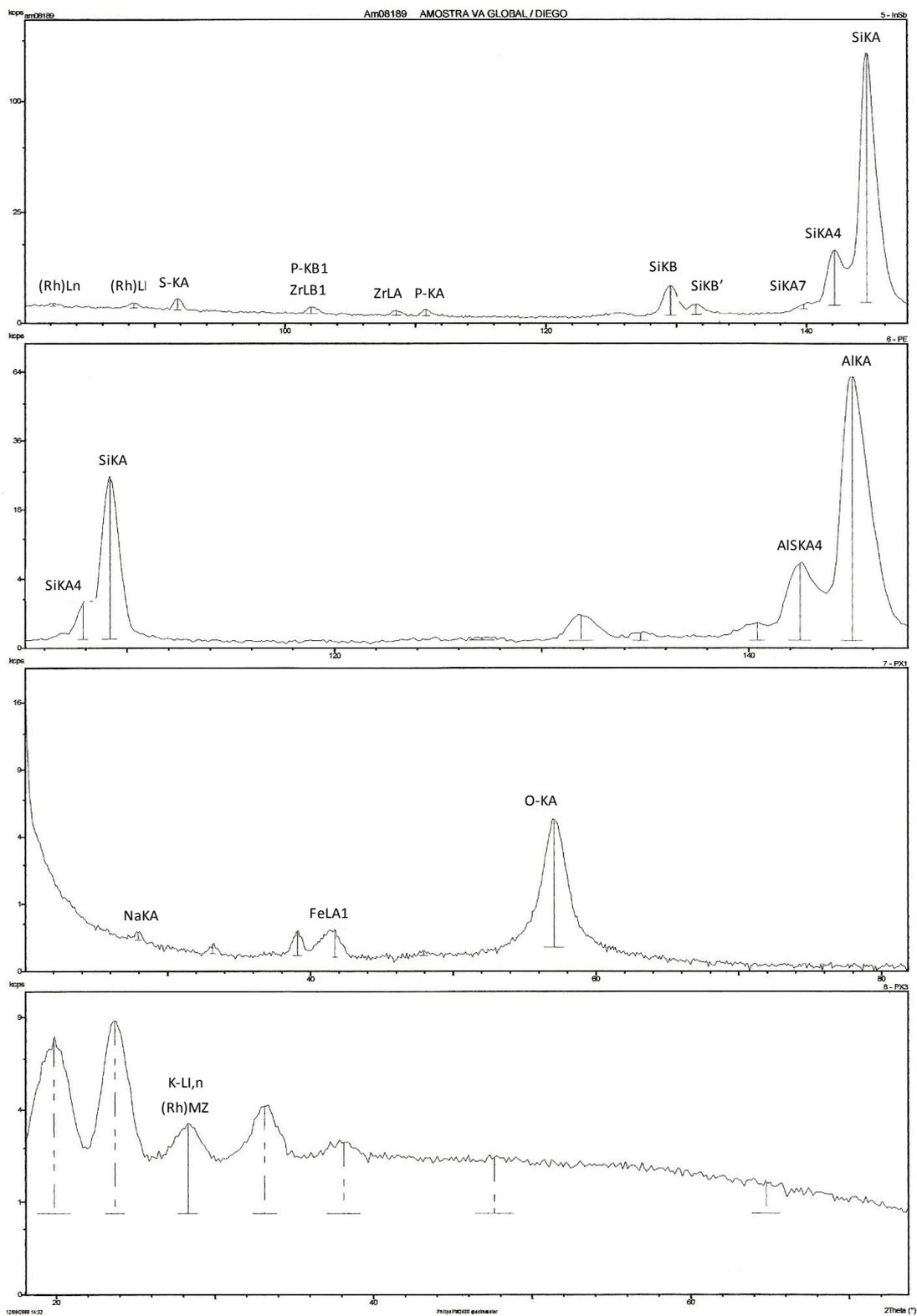
Determinação da porosidade percentual a partir dos dados fornecidos pela  
porosimetria de condensação gasosa.

Amostra	Tamanho	Produto	Porosidade (cm <sup>3</sup> /g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Massa (g)	Porosidade (% de vazios)
Bauxita Nodular	-815+212	Magnético	0,04	0,53606	1,6425	12,26
		Não Magnético	0,019	0,52593	1,3569	4,90
	-425 +75	Magnético	0,045	0,45341	1,5001	14,89
		Não Magnético	0,022	0,49414	1,3144	5,85
Laterita	-815+212	Magnético	0,069	0,5701	0,1659	2,01
		Não Magnético	0,024	0,50125	1,3684	6,55
	-425 +75	Magnético	0,055	0,48037	1,8254	20,90
		Não Magnético	0,01	0,52074	1,3383	2,57
Bauxita Maciça	-815+212	Magnético	0,051	0,45841	1,4715	16,37
		Não Magnético	0,011	0,60529	1,5798	2,87
	-425 +75	Magnético	0,044	0,44225	1,3754	13,68
		Não Magnético	0,005	0,60855	1,5579	1,28

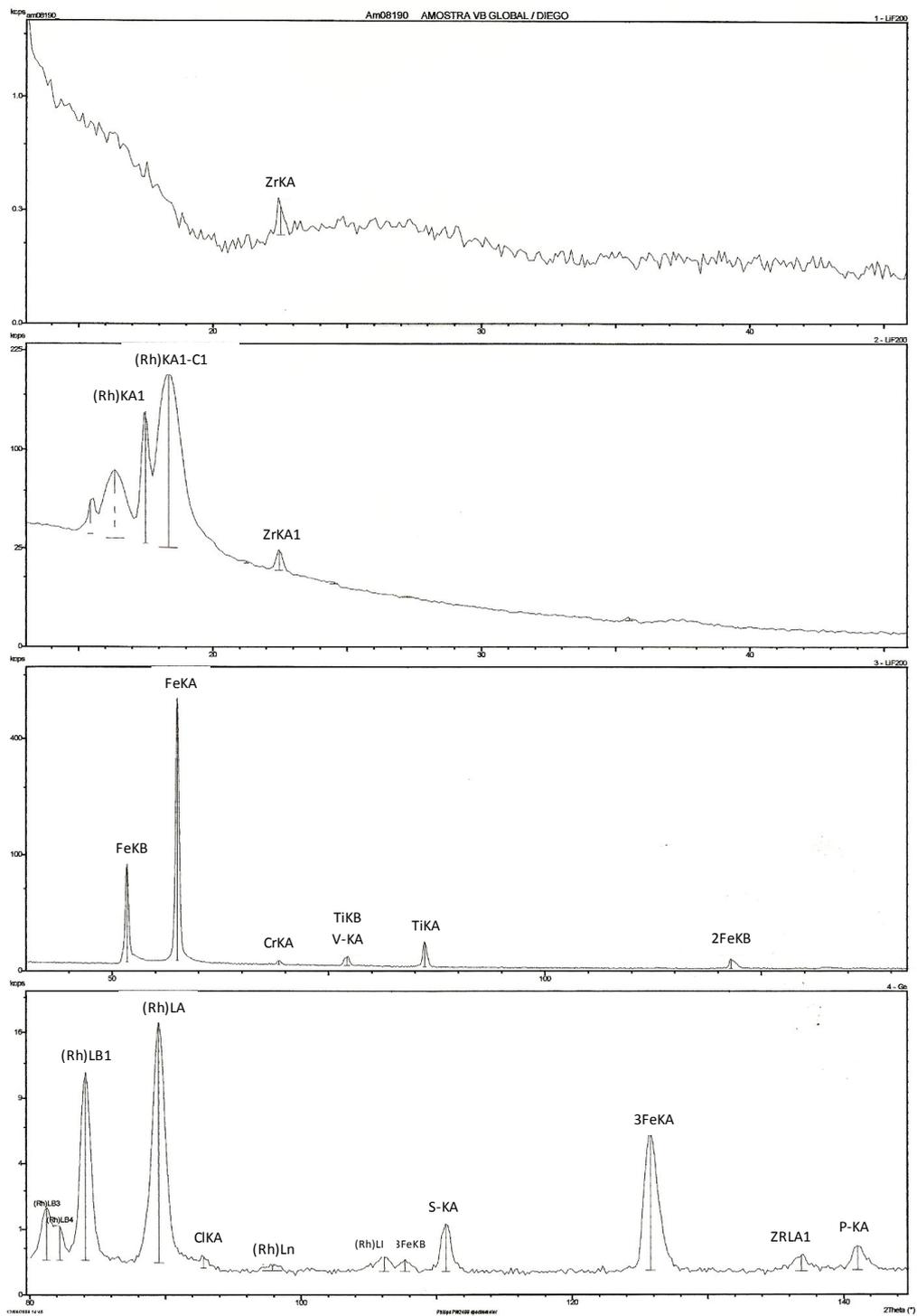
## Fluorescência de raios-x



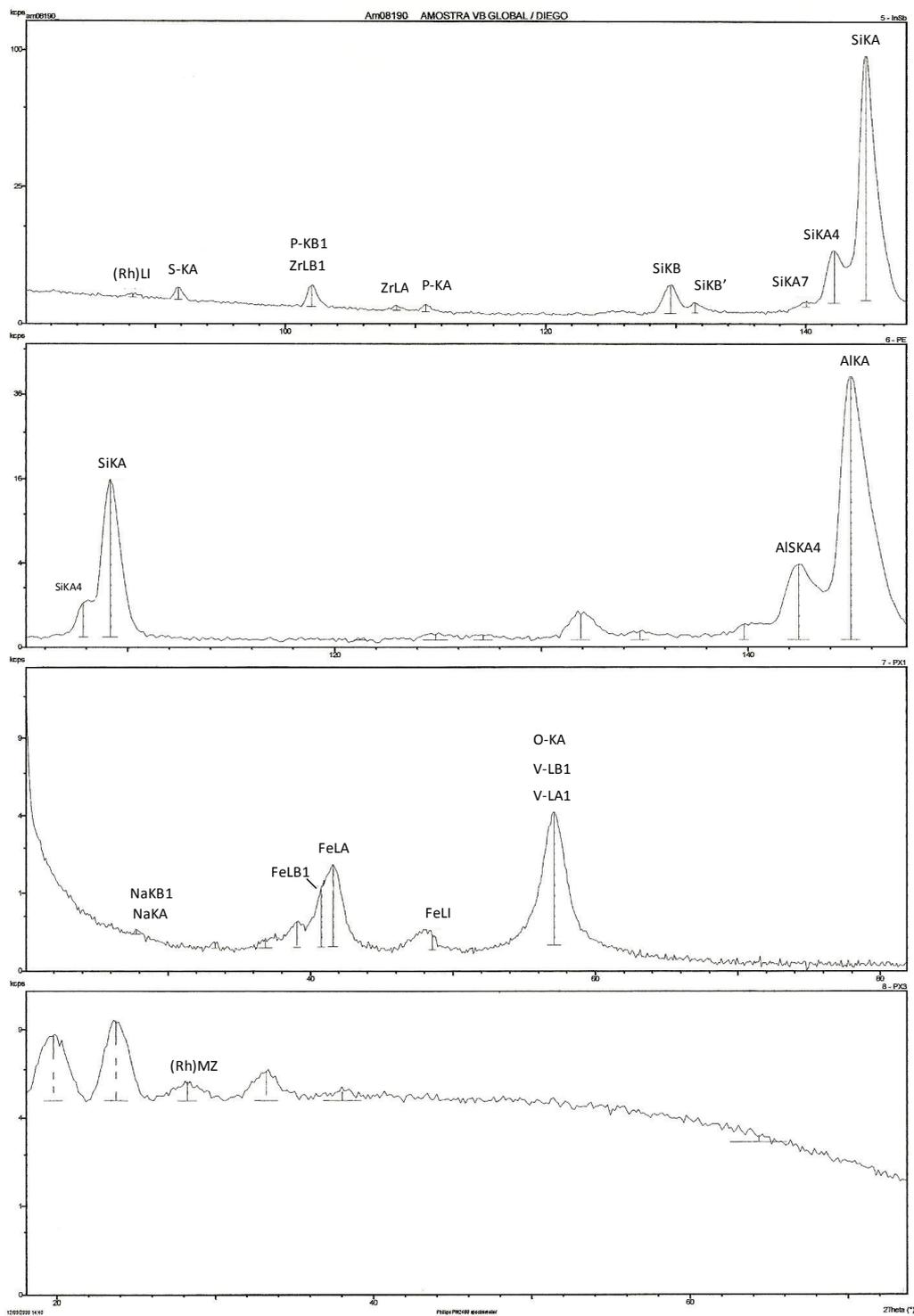
Amostra bauxita nodular



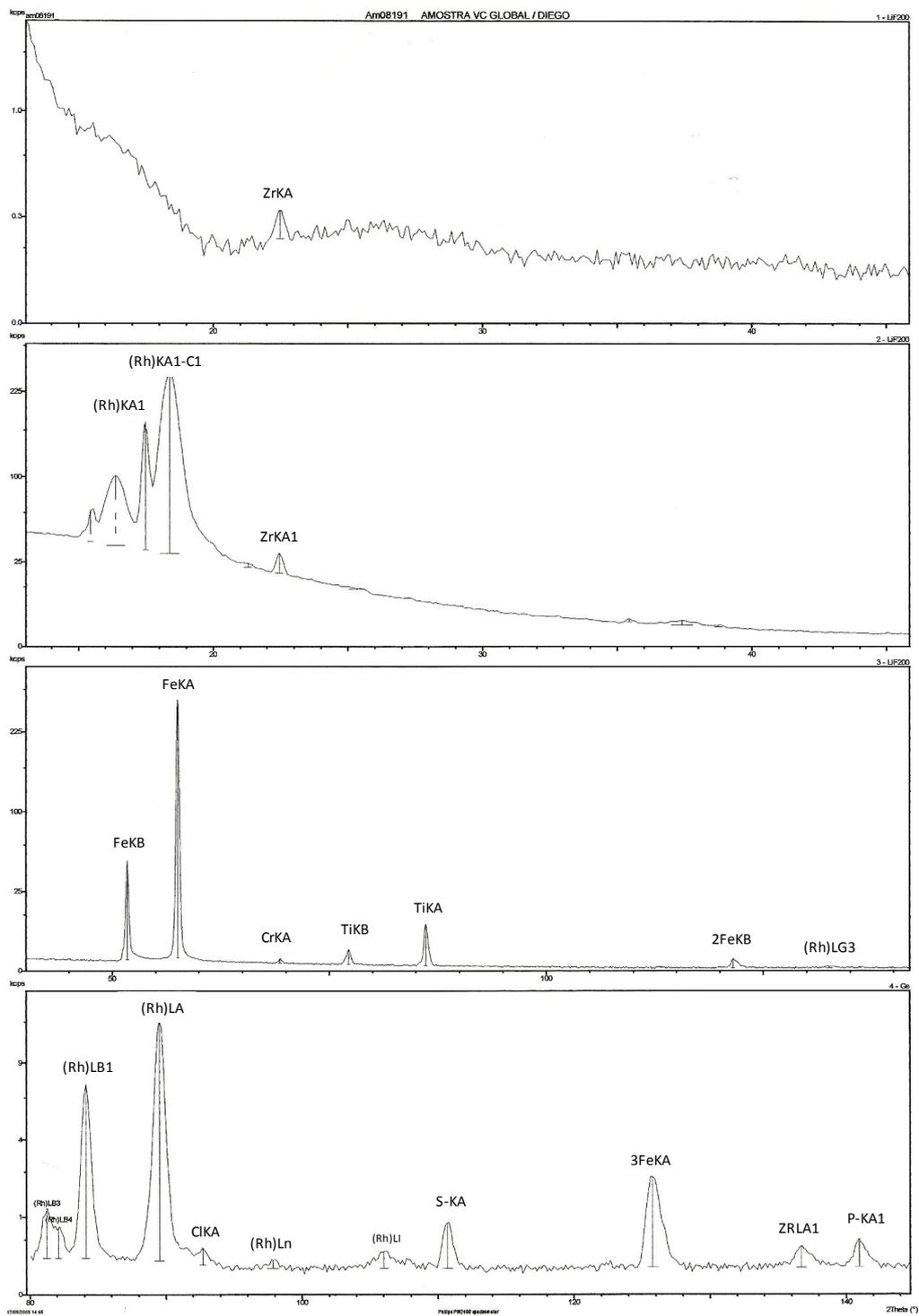
Amostra bauxita nodular



Amostra Laterita



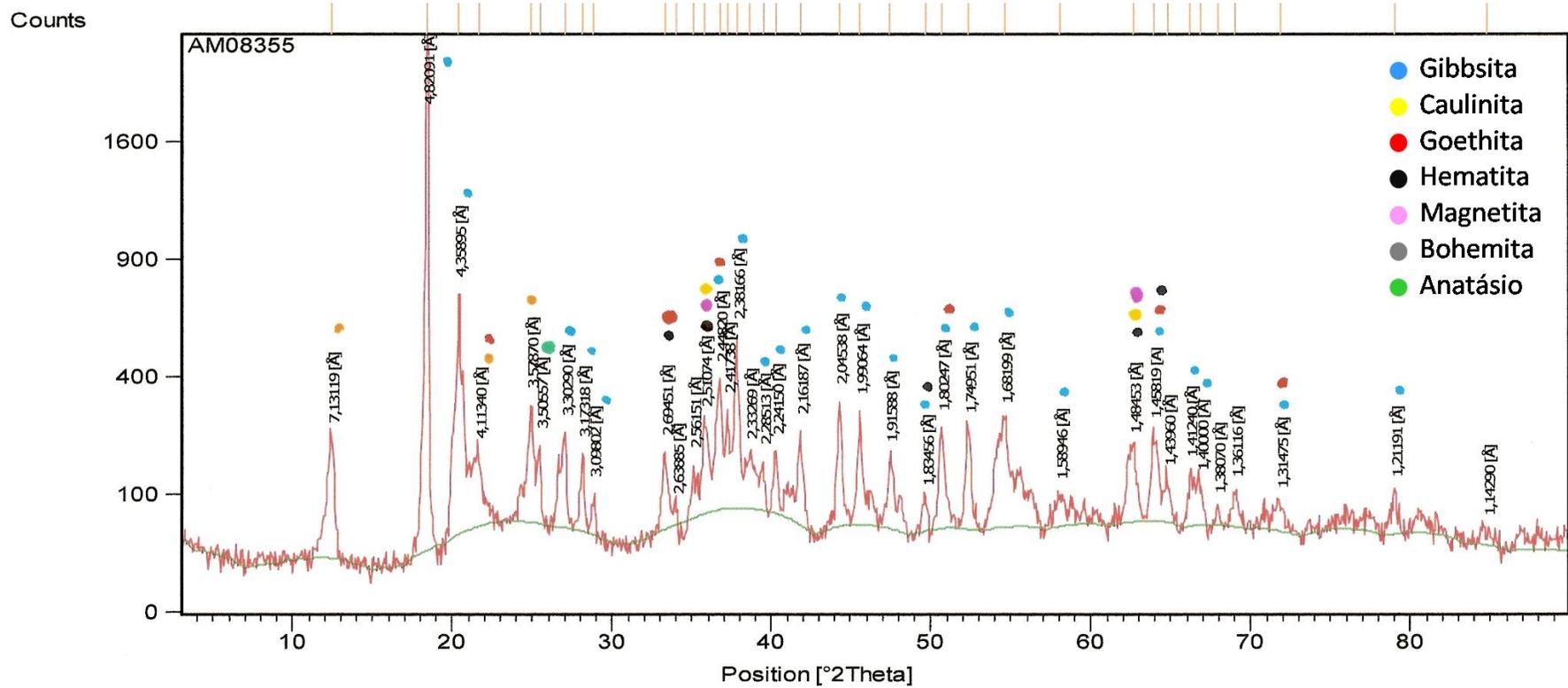
Amostra Laterita



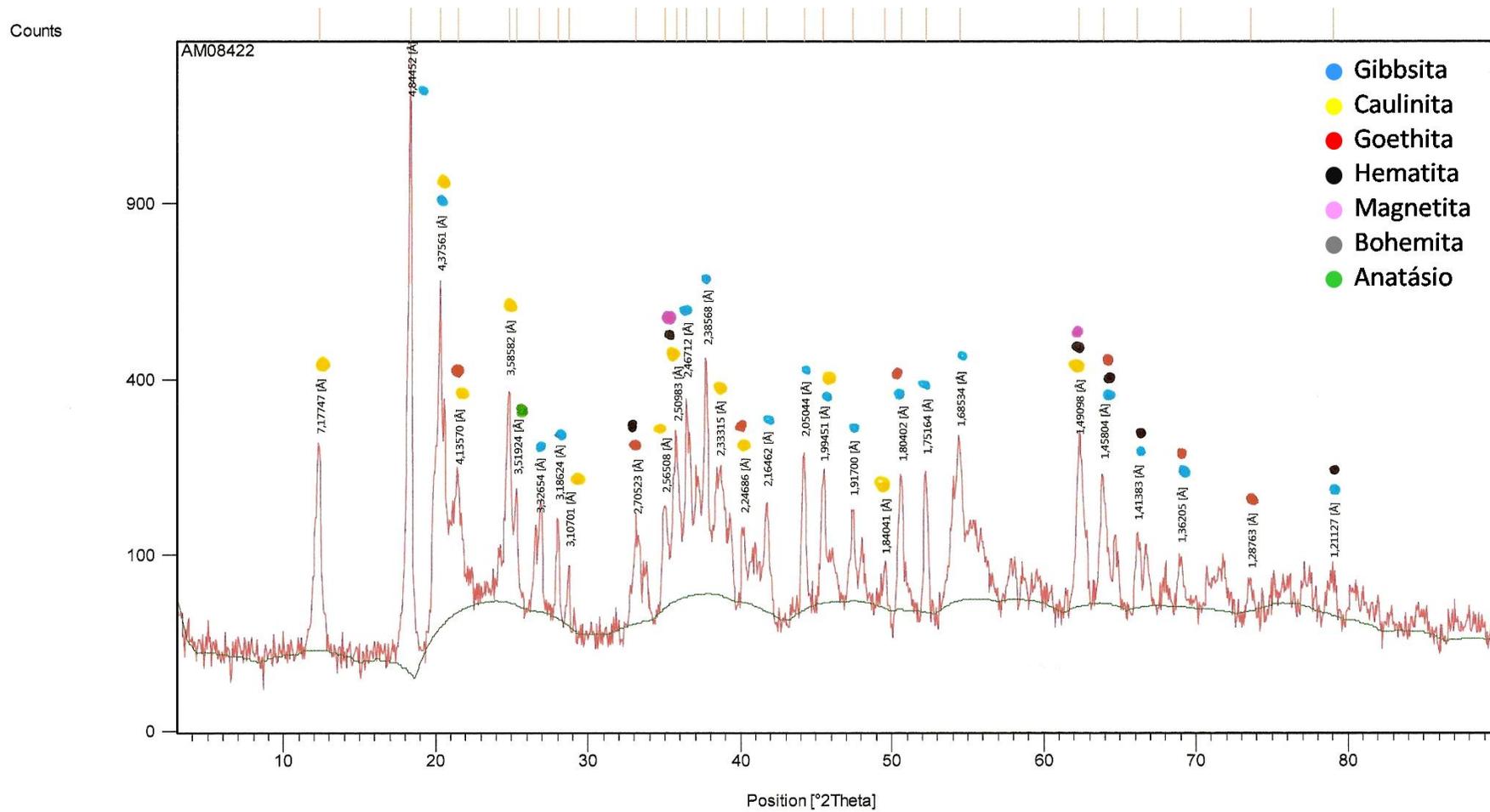
Amostra bauxita maciça in natura



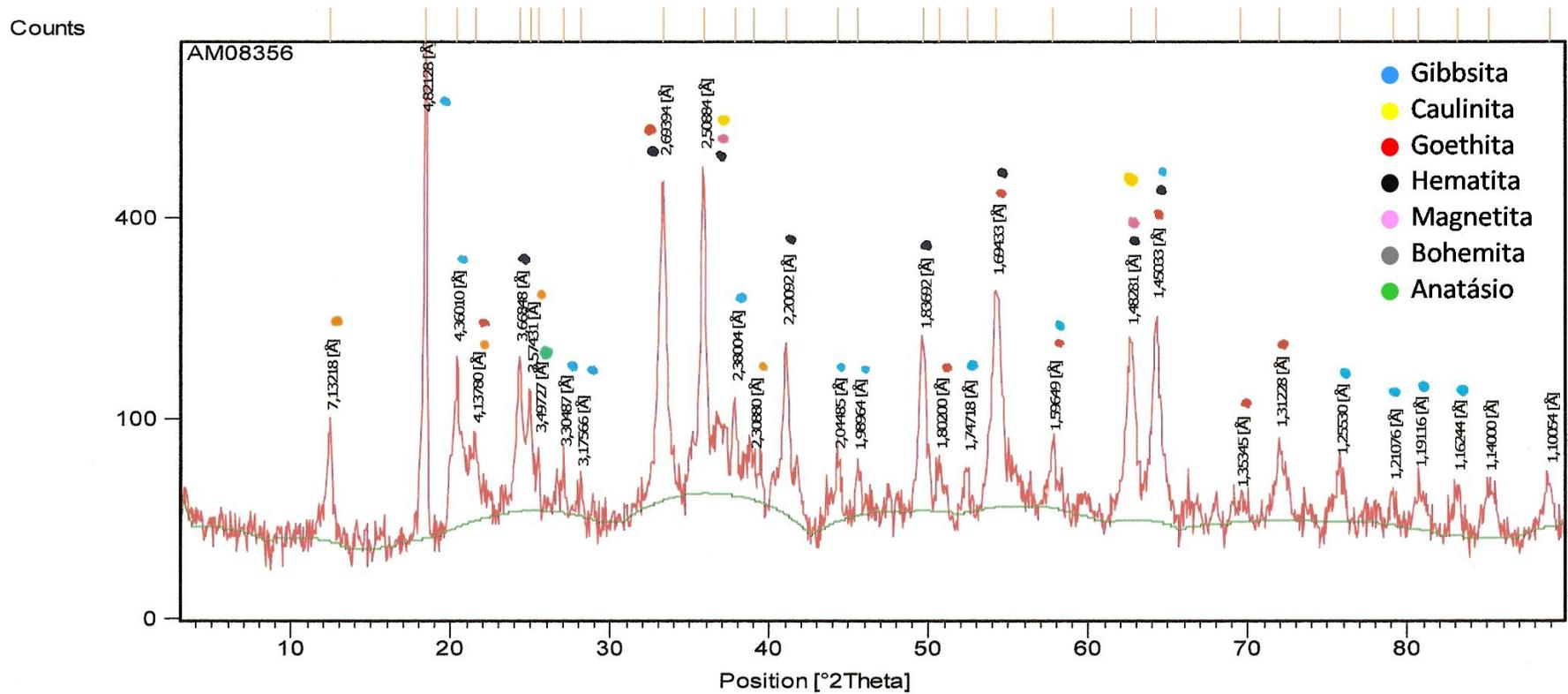
## Difratogramas



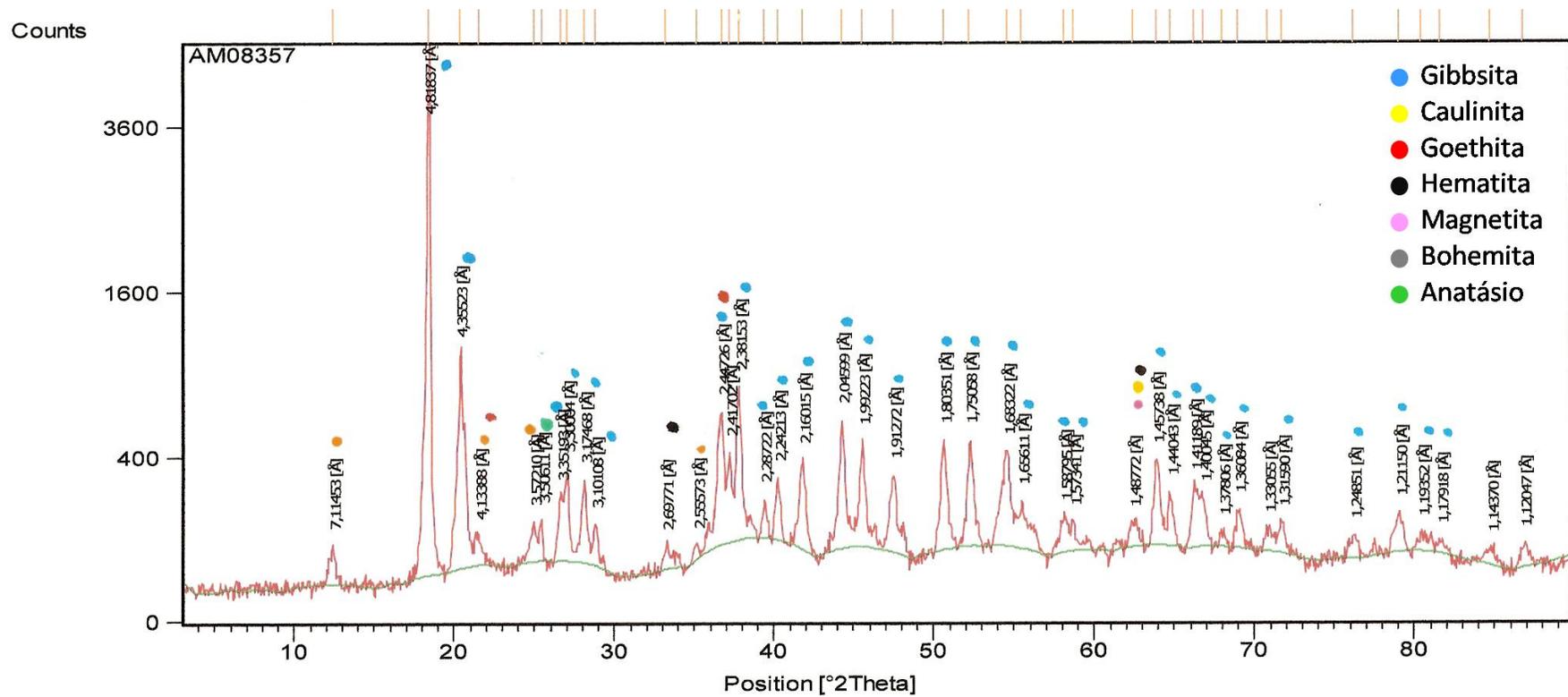
Difratograma amostra Bauxita Nodular (Global)



Difratograma amostra Bauxita Nodular (Amostra -0,075mm)

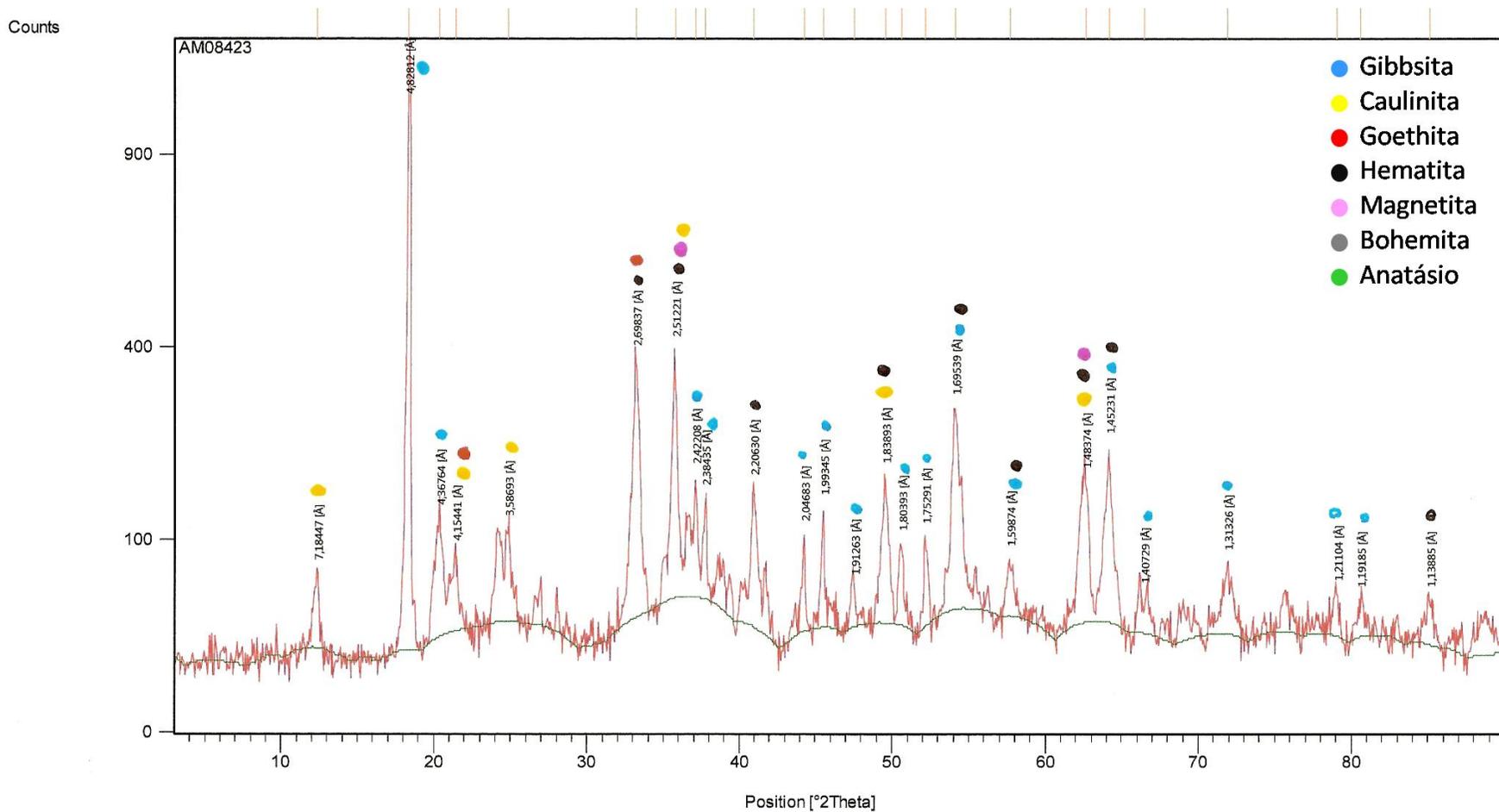


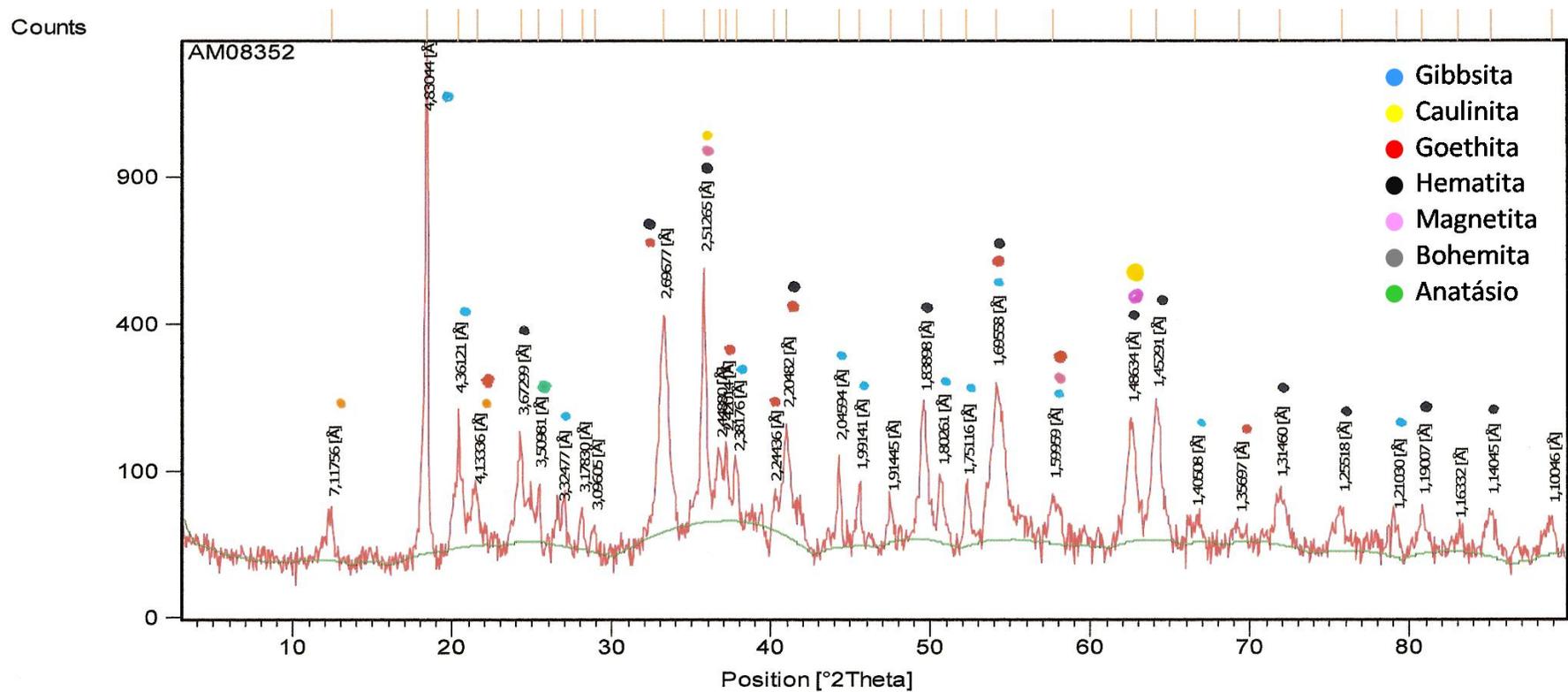
Difratograma amostra Bauxita Nodular (-0,425 +0,075mm - Produto Magnético)



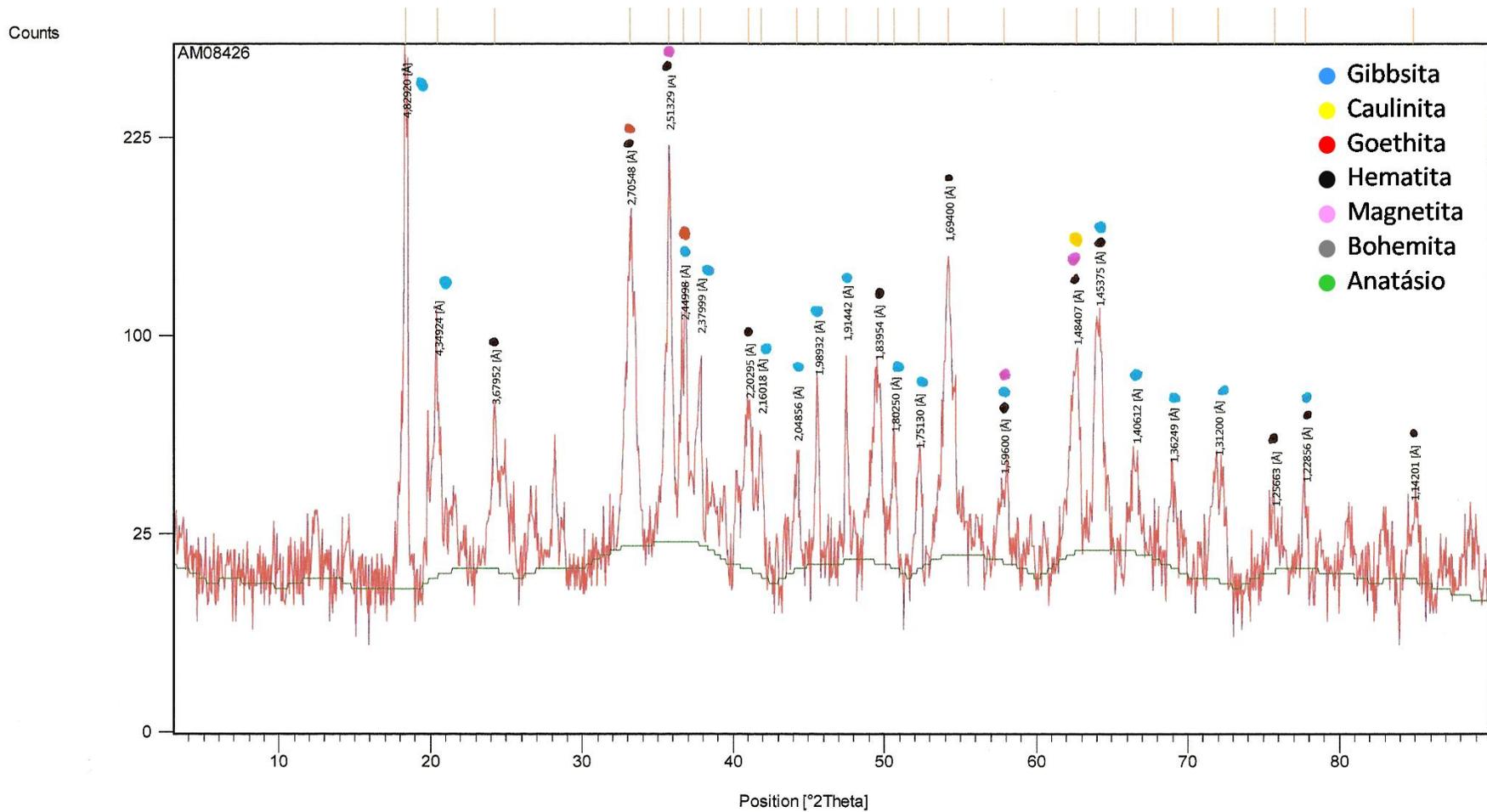
Difratograma amostra Bauxita Nodular (-0,425 +0,075mm - Produto Não Magnético)



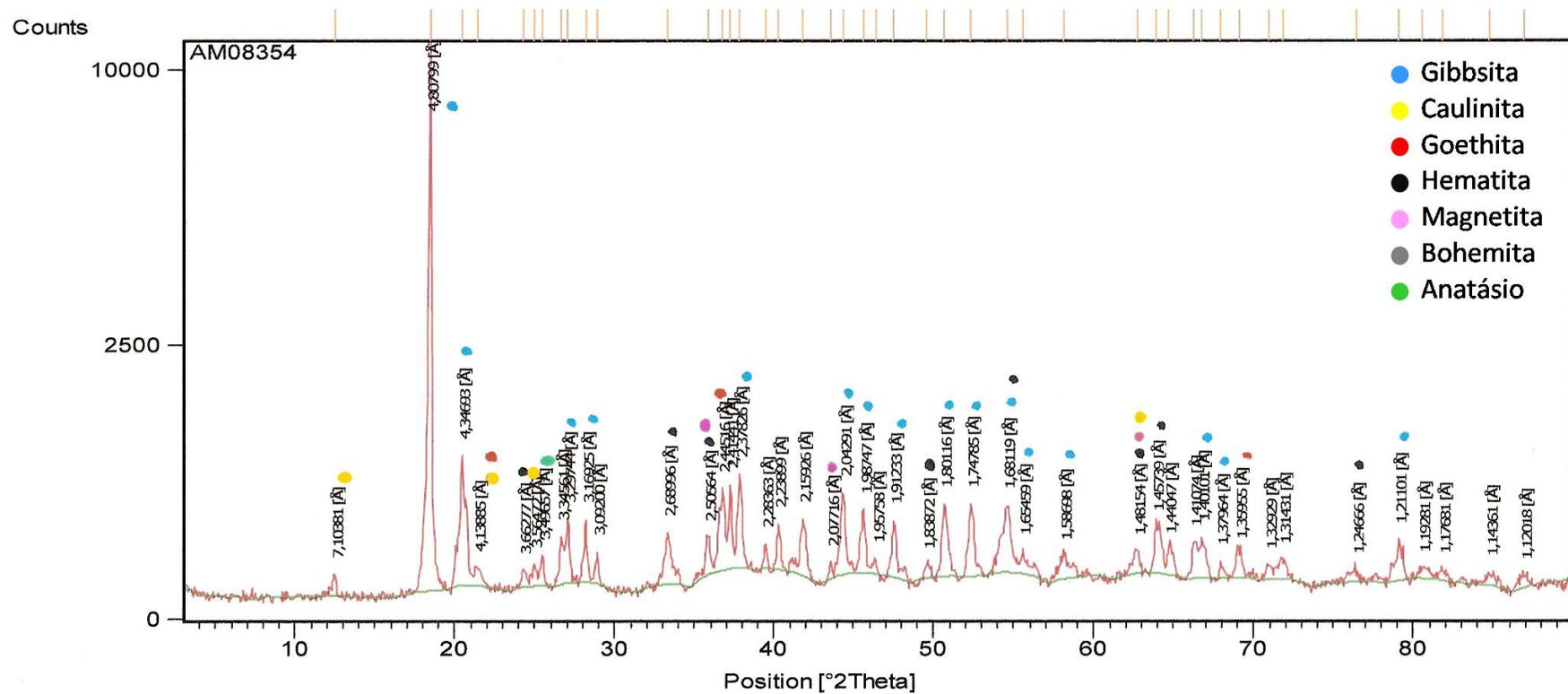




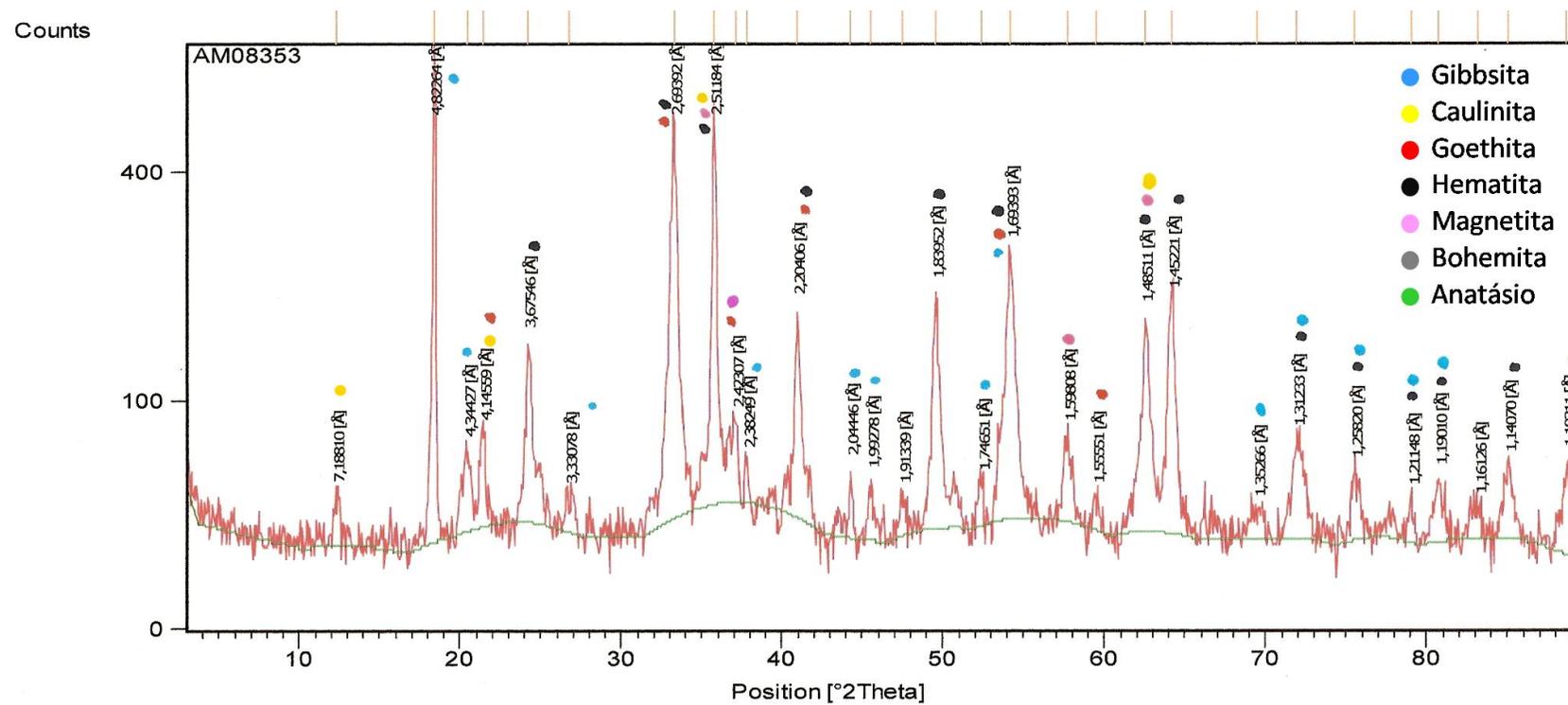
Difratograma amostra Laterita (Global)



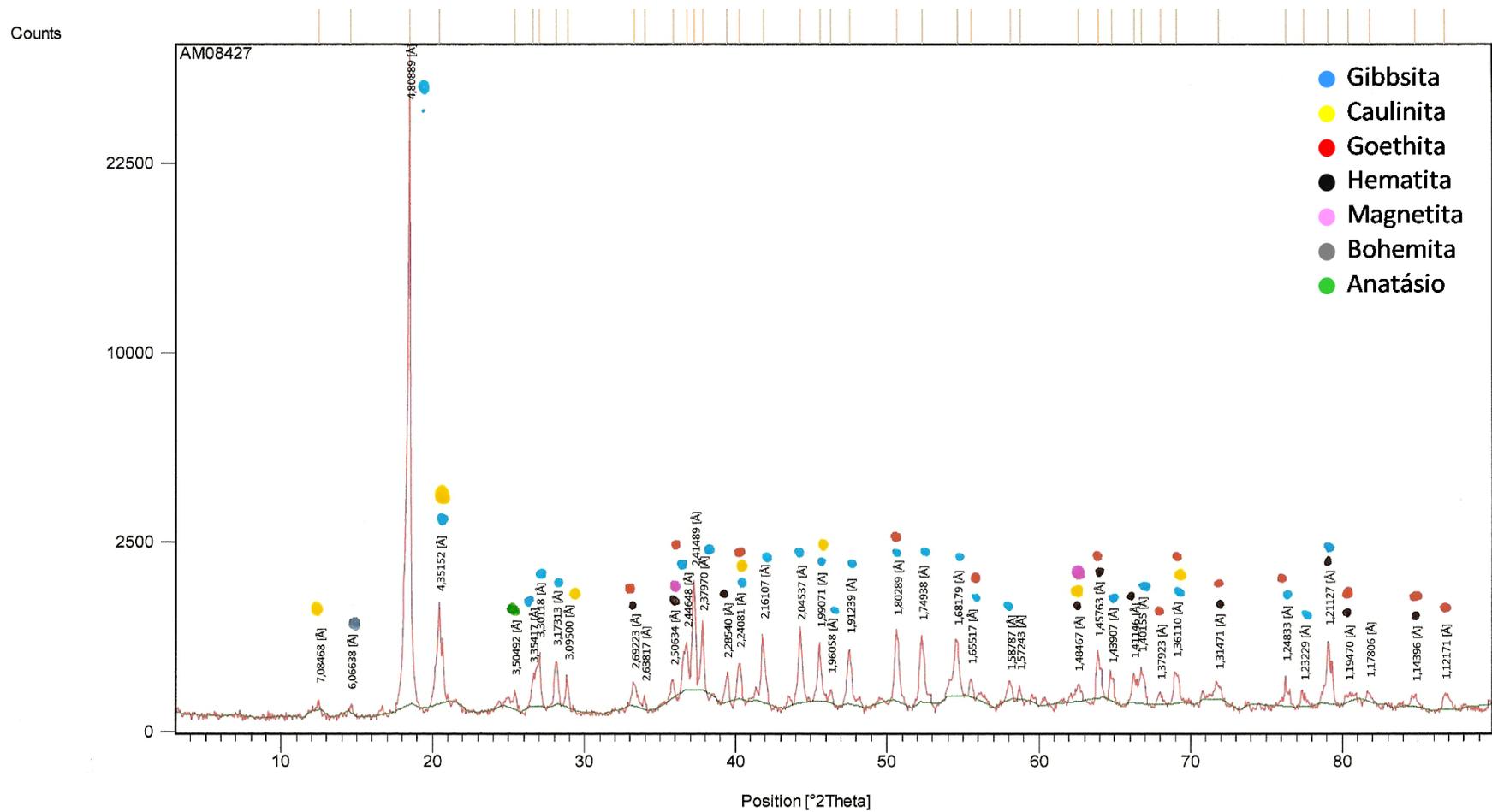
Difratograma amostra Laterita (0,075mm)



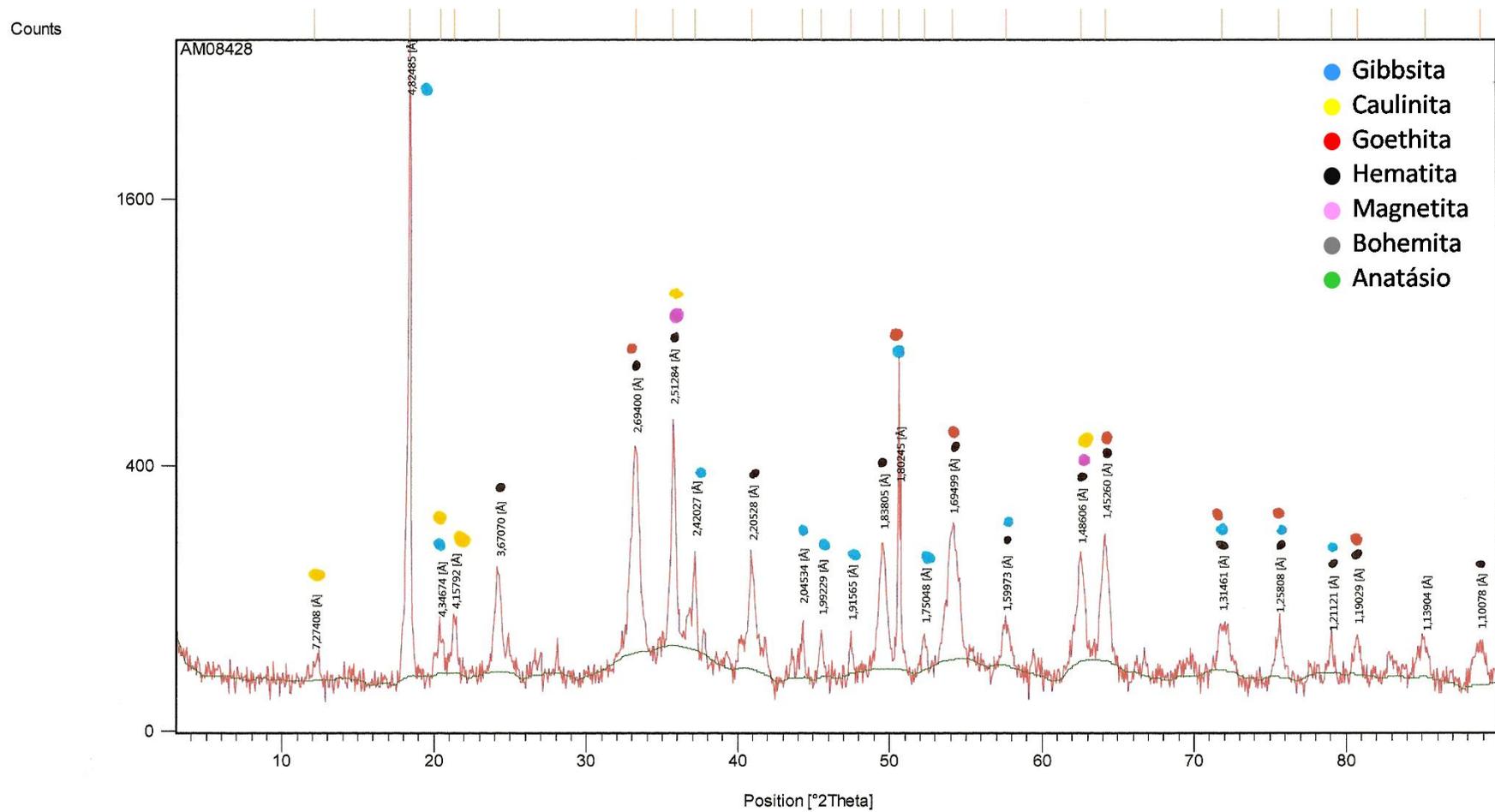
Difratograma amostra Laterita (-0,425 +0,075mm – Produto Não Magnético)



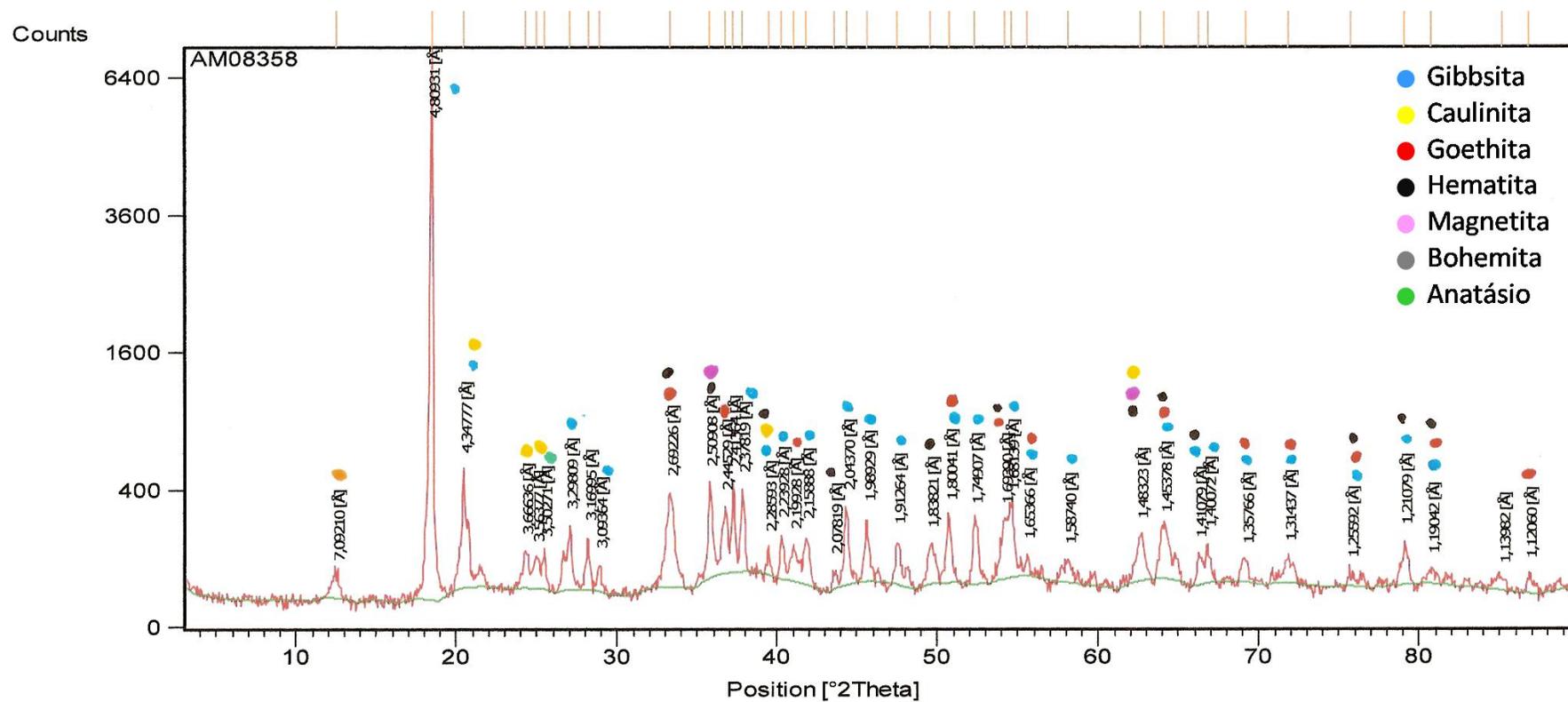
Difratograma amostra Laterita (-0,425 + 0,075mm – Produto Magnético)



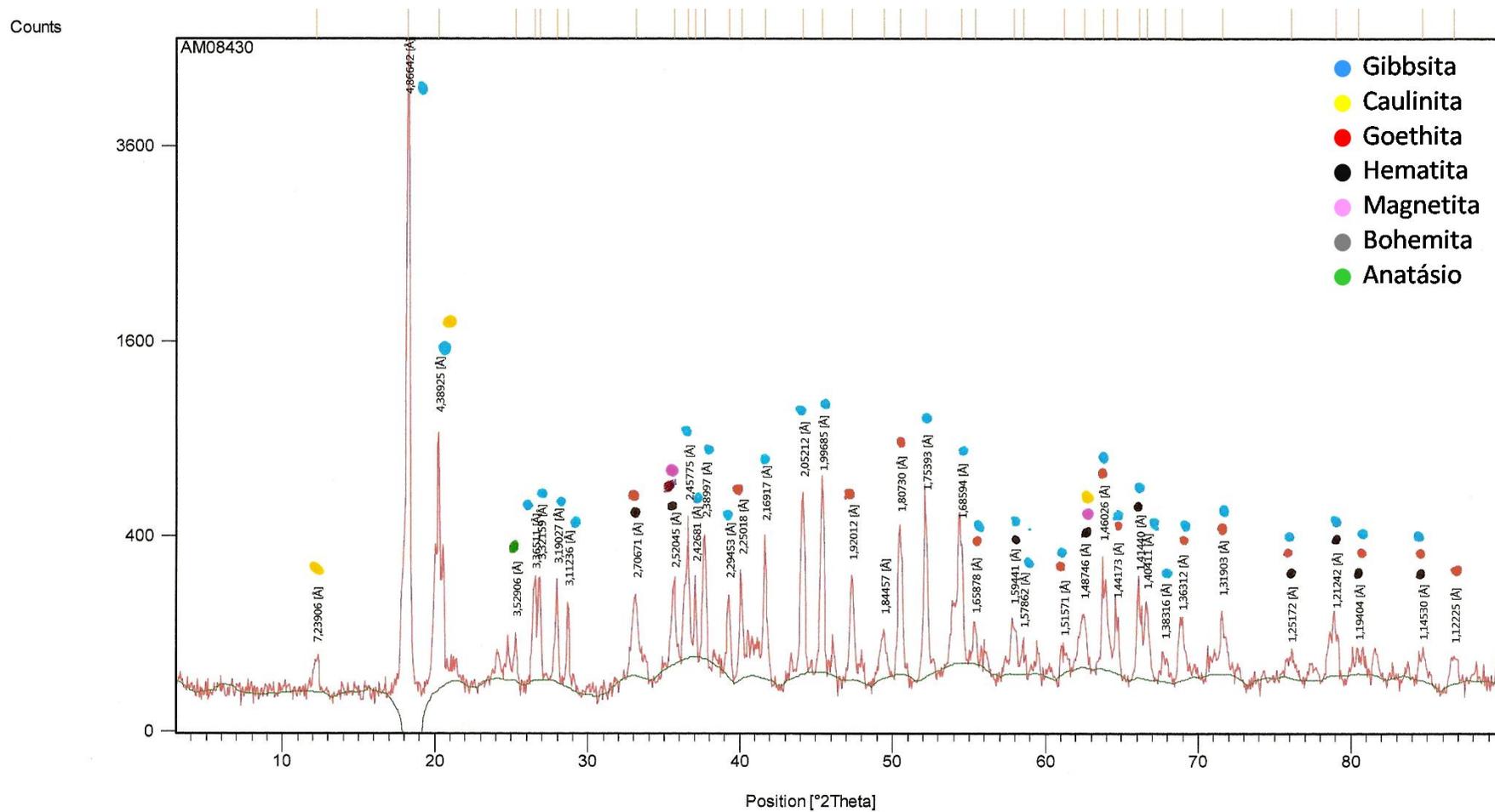
Difratograma amostra Laterita(-0,840+0,212mm – Produto Não Magnético)



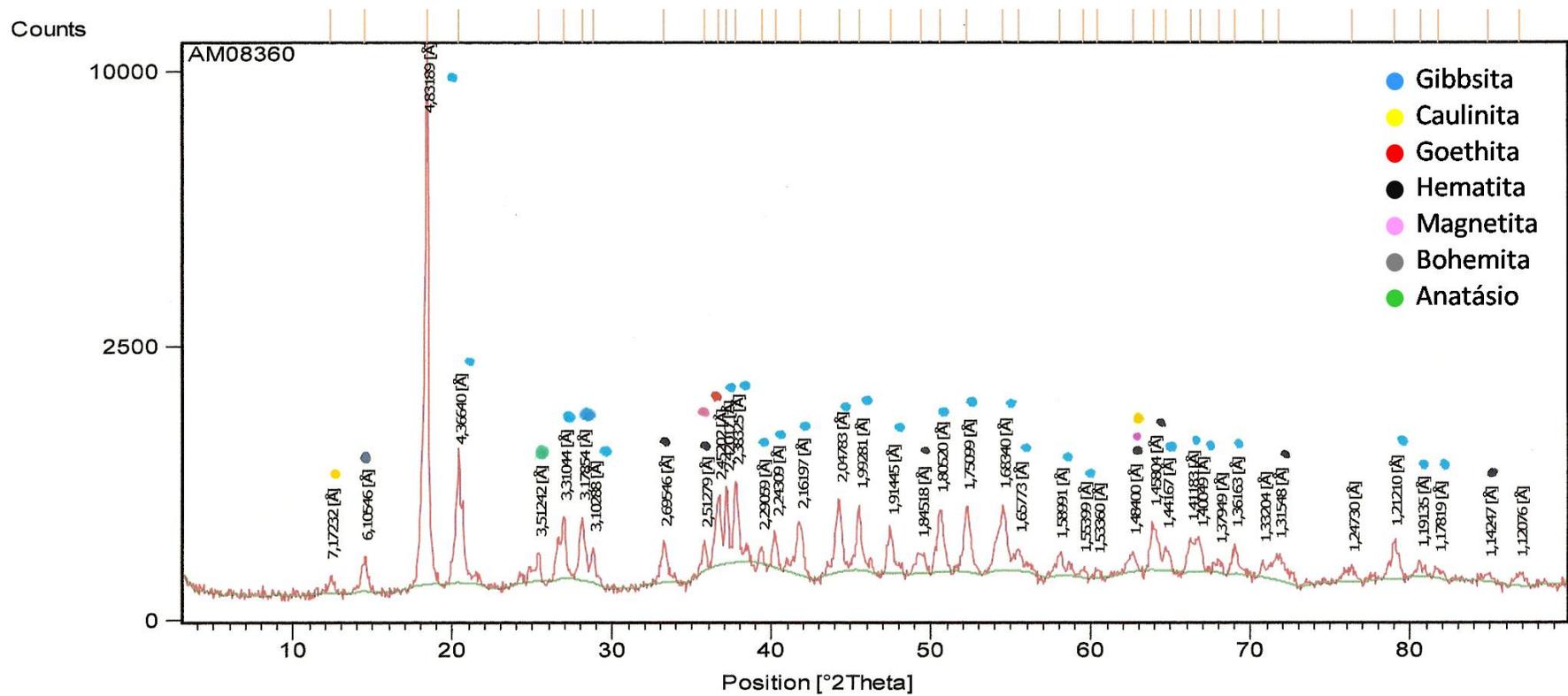
Difratograma amostra Laterita (-0,840+0,212mm – Produto Magnético)



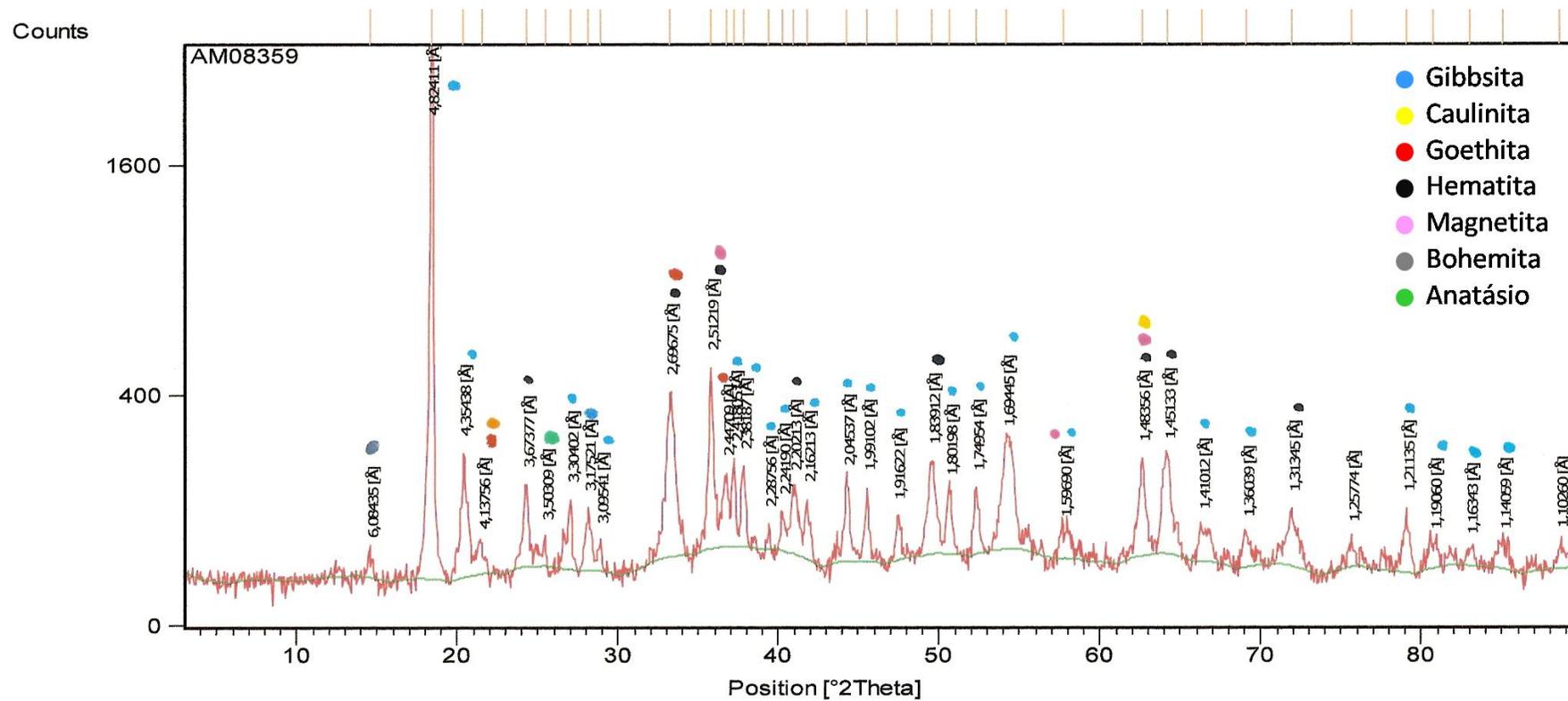
Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (Global)



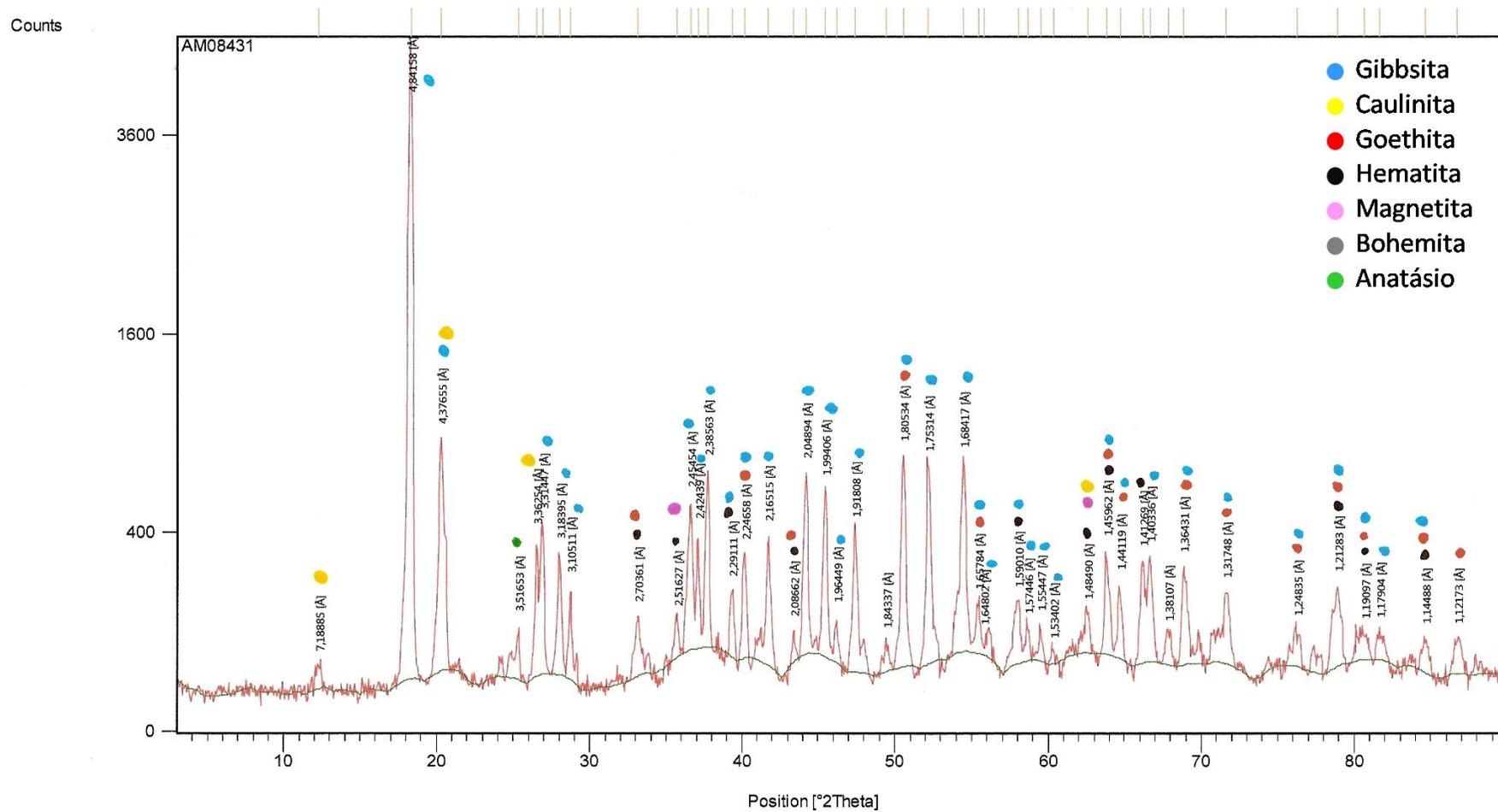
Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (-0,075mm)



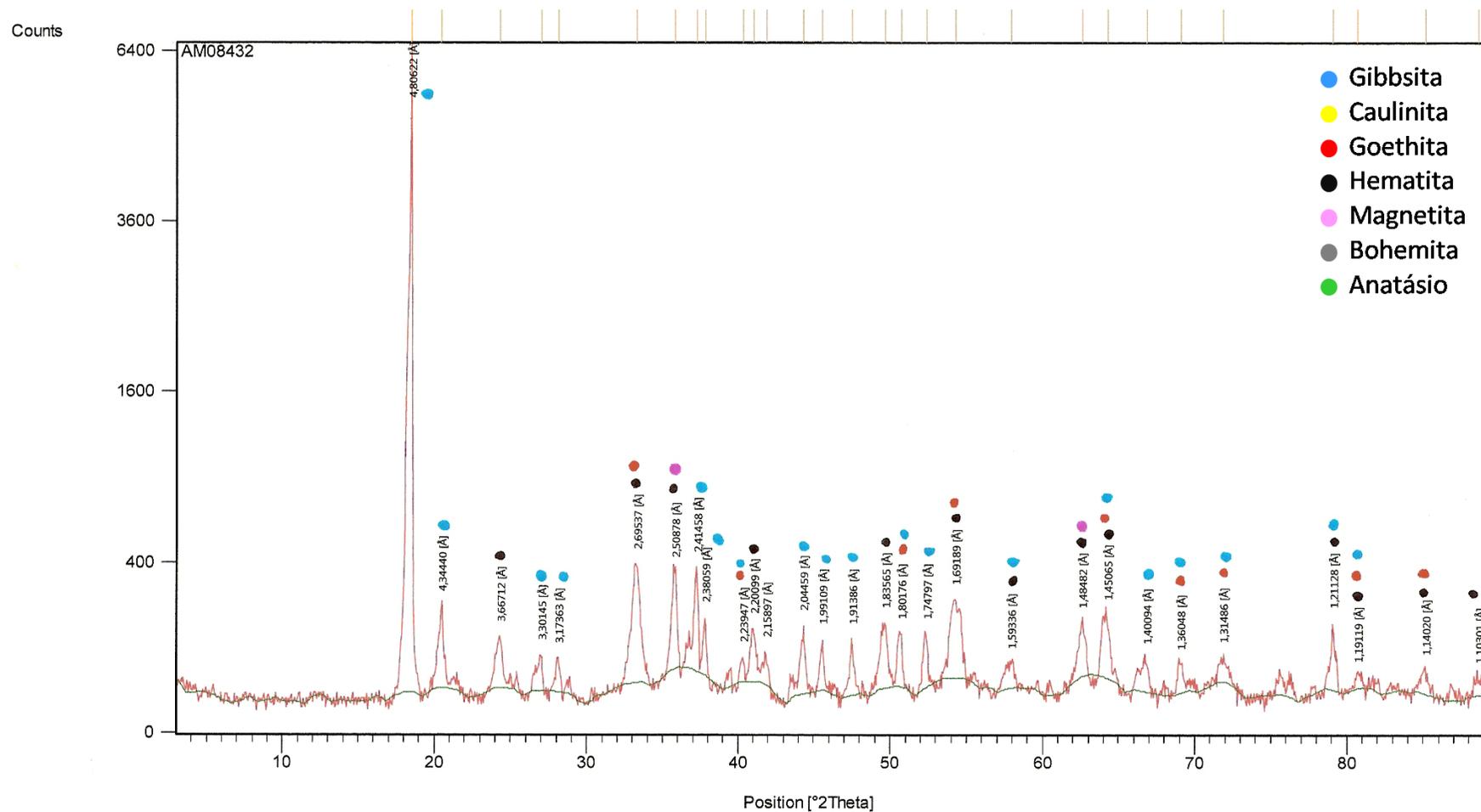
Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (-0,425 +0,075mm – Produto Não Magnético)



Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (-0,425 +0,075mm – Produto Magnético)



Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (-0,840 + 0,212mm – Produto Não Magnético)



Difratograma amostra Bauxita Maciça in Natura (-0,840 + 0,212mm – Produto Magnético)