

LUCAS DANIEL BRUSON

**ANÁLISE DE IMAGENS AUTOMATIZADA APLICADA A BAUXITA
NODULAR DE PORTO TROMBETAS, PA**

São Paulo

2010

LUCAS DANIEL BRUSON

**ANÁLISE DE IMAGENS AUTOMATIZADA APLICADA A BAUXITA
NODULAR DE PORTO TROMBETAS, PA**

Trabalho de Formatura em Engenharia de
Minas do curso de graduação do
Departamento de Engenharia de Minas e
de Petróleo da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Orientação: Prof. Dr. Henrique Kahn

Co-orientadora: M.Sc. Carina Ulsen

São Paulo

2010

TF-2010
888a
21/09/15

FICHA CATALOGRÁFICA

M2010e

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700008347

Bruson, Lucas Daniel

**Análise de imagens automatizada aplicada a bauxita nodular de
Porto Trombetas, PA / L.D. Bruson. São Paulo, 2010.
42 p.**

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.**

**1. Caracterização tecnológica de minérios (métodos) 2. Bauxita
Porto Trombetas (PA) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu professor e orientador Henrique Kahn e à minha co-orientadora Carina Ulsen por confiarem este projeto às minhas mãos. Agradeço por todo o apoio e aprendizado obtidos não somente com este trabalho, mas em todo o tempo de estágio no LCT.

Agradeço ao pessoal do laboratório: Manu, André, Mari, Ju, Freud, Giuliana, Rose e Ilda por toda a ajuda durante a execução do projeto e principalmente ao Daniel, por ter tido a paciência necessária para me ensinar o passo-a-passo do MLA.

Aos técnicos do laboratório Vavá, Carlos, Rafão, Rafael, Ailton, Juscelino, Lino e Erílio, por todo o trabalho braçal e, em especial, ao Erílio, por longas horas de desaglomeração.

Aos colegas tanto da Geo quanto da Poli que ajudaram de alguma maneira: Rafael, Vivi, Renata, Renato Higa, Renato Iwamoto, Gustav, Jaime e Caio. Obrigado por tudo.

A todo o povo da Minas e do Petróleo por terem feito os últimos 4 anos de Poli bem mais divertidos.

Agradeço à minha irmã, por sua disposição de me ajudar em diferentes momentos da minha vida.

Finalmente, agradeço aos meus pais, por me ensinarem desde pequeno o valor de uma boa educação e pelo apoio incondicional e carinho ao longo de toda minha vida. Jamais chegaria aqui sem vocês.

RESUMO

A bauxita nodular de Porto Trombetas apresenta altos teores de alumina aproveitável, porém não é explorada atualmente devido aos elevados teores de sílica reativa, que inviabilizam sua utilização para produção de alumina através do Processo Bayer. Neste trabalho procurou-se definir as associações mineralógicas de amostras de bauxita nodular, por meio de um sistema de análise de imagens automatizada conjugado a um microscópio eletrônico de varredura.

Foi efetuada uma análise por agrupamento de 69 amostras de bauxita, com distintas litologias e composições. Dos grupos gerados, foram selecionados dois deles que eram compostos por amostras de bauxita nodular para os estudos seqüenciais de análise de imagens automatizada ao MEV-MLA. Após a coleta das imagens, realizou-se a classificação das fases constituintes em diversos minerais, as imagens resultantes foram processadas, gerando informações de composição mineralógica, composição química calculada, distribuição de elementos químicos de interesse, associações e espectro de liberação e partição de Al, Si e Fe nos minerais portadores.

Os grupos estudados ao MEV-MLA são constituídos essencialmente por gibbsita, classificadas em diferentes fases, conforme o teor de sílica presente. A alumina aproveitável concentrou-se no agrupamento gibbsita+gibbsita-2-3, enquanto que a sílica reativa concentrou-se essencialmente na fase denominada gibbsita-4; ambas as fases apresentaram elevado grau de liberação, com exceção observada para o grupo 2A, no qual os dois óxidos concentram-se na fase gibbsita-4. Não foi observado incremento de liberação para as frações mais finas.

A caracterização das associações mineralógicas indica que a possibilidade de exploração da bauxita nodular, para os grupos 1A, 1B e 2B, com produção de um concentrado com alto teor de alumina aproveitável e alta recuperação metalúrgica, mediante o emprego de operações de tratamento de minérios.

Palavras-chave: Caracterização tecnológica; Bauxita; Análise de imagens Automatizada; Mineralogia quantitativa; Análise por agrupamento.

ABSTRACT

The nodular bauxite of Porto Trombetas presents high grades of profitable alumina, yet it is not currently exploited due to the high grades of reactive silica, which makes infeasible its utilization in the production of alumina through the Bayer process. The aim of this work was the definition of the mineral locking of nodular bauxite samples, by means of an automated image analysis system conjugated with a scanning electron microscope.

A cluster analysis was made comprehending 69 bauxite samples, from distinct lithologies and composition. From the generated clusters, the two consisting of nodular bauxite samples were selected to the following study by automated image analysis by SEM-MLA. Once the image was collected from the microscope, the constituted phases were classified in a number of minerals and then the images were processed, generating data of modal mineralogy, calculated assay, elemental distribution, mineral locking, mineral liberation by free surface and Al, Si and Fe partition in the bearing minerals.

The studied clusters consist, essentially, of gibbsite which were grouped in different phases according to the silica grade. Profitable alumina is mainly associated to the grouping gibbsite+gibbsite-2-3, while reactive silica is concentrated in the gibbsite-4 phase; both are highly liberated, indicating the possibility to separate them by mineral processing. Exception is made to the cluster 2A, in which both oxides are associated to the gibbsite-4 phase. There is no liberation increase towards the finer fractions.

The mineral locking characterization indicates that there is a possibility of exploiting the nodular bauxite, for the clusters 1A, 1B and 2B, producing a concentrate with high profitable alumina grade and high metallurgical recovery, by means of mineral processing operations.

Key-words: Technological characterization; Bauxite; Automated Image analysis; Quantitative Mineralogy; Cluster analysis.

SUMÁRIO

	pag.
1 INTRODUÇÃO.....	7
1.1 OBJETIVOS.....	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 ALUMÍNIO	8
2.1.1 <i>Histórico e aplicações</i>	8
2.2 BAUXITA.....	9
2.2.1 <i>Bauxita de Porto Trombetas</i>	10
2.2.2 <i>Lavra e beneficiamento de bauxita</i>	11
2.3 METALURGIA DO ALUMÍNIO	11
2.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	12
2.4.1 <i>Análise por agrupamento a partir de difração de raios X</i>	13
2.5 MINERALOGIA QUANTITATIVA AUTOMATIZADA	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE POR AGRUPAMENTO	18
4.2 RESULTADOS DE MINERALOGIA QUANTITATIVA POR MLA.....	19
4.2.1 <i>Análise granuloquímica</i>	19
4.2.2 <i>Composição mineralógica</i>	21
4.2.3 <i>Formas de associações da gibbsita</i>	23
4.2.4 <i>Espectros de liberação das fases portadoras de alumina</i>	28
4.2.5 <i>Recuperação de alumina aproveitável</i>	29
5 SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	31
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

Apêndice 1 - Composição química média do banco de dados usado

Apêndice 2 - Análise por agrupamento

Apêndice 3 - Principais feições de associações minerais

Apêndice 4 - Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de alumina aproveitável

1 INTRODUÇÃO

A bauxita é a principal matéria prima utilizada na produção de alumínio metálico. Também apresenta outros usos não metalúrgicos, como produção de abrasivos, cimentos, produtos químicos e refratários, em menor escala. Sua composição é de um ou mais minerais de hidróxido de alumínio, sendo os principais a gibbsita, a bohemita e o diásporo, além de argilominerais, sílica (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de titânio (TiO_2) e outras impurezas em menores proporções.

A produção de alumínio metálico a partir da bauxita passa por dois processos: o Processo Bayer, no qual ocorre a lixiviação da bauxita em soda cáustica, dando origem à alumina; e o Processo Hall-Héroult, no qual ocorre a eletrólise da alumina, dando origem ao alumínio metálico. Para o Processo Bayer ser economicamente viável, dentre outras especificações, tem-se que o teor de alumina aproveitável deve ser superior a 50% e o de sílica reativa inferior a 4%. Alumina aproveitável é a parcela de alumina com propriedades tais que pode ser solubilizada pela soda cáustica, sendo oriunda principalmente da gibbsita. Já a sílica reativa é a parcela de sílica que reage com a soda cáustica, aumentando o consumo e o custo da produção, sendo oriunda dos argilominerais, essencialmente caulinita.

O depósito de bauxita de Porto Trombetas é caracterizado por apresentar três camadas distintas: a primeira, no topo, é denominada de argila Belterra; a segunda, zona mineralizada, é subdividida em outras três partes: bauxita nodular, laterita ferruginosa e bauxita maciça; a terceira é denominada zona saprolítica. Atualmente, a Mineração Rio do Norte lavra somente a camada de bauxita maciça, pelos elevados teores de alumina aproveitável e baixos teores de sílica reativa.

A bauxita denominada nodular, objeto do presente estudo, apresenta também elevados teores de alumina aproveitável; em contrapartida teores de sílica reativa são elevados e inviabilizam sua utilização como matéria-prima para a produção de alumina. Dessa forma, os estudos de caracterização neste material trazem a possibilidade de se avaliar a separação da sílica reativa ou a concentração da alumina aproveitável por meio de técnicas de tratamento de minérios.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é definir as associações mineralógicas de amostras de bauxita nodular por meio de um sistema de análise de imagens automatizada conjugado a um microscópio eletrônico de varredura. Os resultados permitem quantificar as associações das principais fases constituintes, com foco na alumina aproveitável e na sílica reativa, facilitando a previsão se há ou não a possibilidade de efetuar uma concentração visando adequação aos teores requeridos pelo processo Bayer.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Alumínio

2.1.1 Histórico e aplicações

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre, representando aproximadamente 8% em massa (Ramos, 1982). Porém, só foi isolado pela primeira vez no ano de 1825 e levado ao público em 1855, numa exposição em Paris. Essa contradição deve-se ao fato de o alumínio não ocorrer naturalmente na forma metálica, mas sim combinado com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma a alumina, Al_2O_3 .

O primeiro processo comercial de produção de alumínio, embora ainda dispendioso, foi criado em 1854, por H. Saint Claire Deville, produzindo alumínio pela reação direta do sódio sobre cloreto de alumínio anidro. Este foi, na realidade, um aprimoramento do método criado por Friedrich Wohler em 1827, pois substituiu o potássio pelo sódio, mais barato. Assim, a busca por um processo menos dispendioso capaz de produzir alumínio em quantidades comerciais continuava, recebendo, inclusive, patrocínio de Napoleão III, que sonhava em equipar seu exército com elementos e armaduras de alumínio (Ramos, 1982).

O processo de produção da alumina a partir da bauxita foi desenvolvido em 1888 pelo cientista Karl Bayer, razão pela qual hoje é denominado de processo Bayer. O processo utilizado para produção de alumínio metálico, a partir da alumina, denominado Hall-Héroult, deve seu nome a dois cientistas – Charles Martin Hall e Paul L.T. Héroult – que em 1886, independente e simultaneamente descobriram o processo eletrolítico de produção de alumínio, utilizado até hoje.

Os principais insumos para a produção de alumínio são a bauxita e a energia elétrica. Não é de se estranhar, portanto, que a evolução do alumínio acompanhe a da energia elétrica. A popularização do processo Hall-Héroult só ocorreu com a construção de grandes usinas hidroelétricas. A primeira delas, a de Niagara Falls, tinha a empresa fundada por Hall, como um dos primeiros clientes.

Dentre as diversas aplicações do alumínio, são destacadas por Ramos (op. cit.):

- *Aplicações elétricas*: utilizado em linhas de transmissão de alta voltagem em substituição ao cobre.
- *Transportes*: utilizado em substituição ao aço na fabricação de automóveis, possibilita a redução do peso e logo no consumo de combustível.
- *Indústria de construção*: na construção de edifícios e outras estruturas é recomendado devido à sua leveza e alta resistência à corrosão.
- *Embalagens*: reduzida quantidade do material por embalagem, reciclável. Setor que mais consome alumínio no Brasil (ABAL, 2006).
- *Diversas*: bens de consumo duráveis devido à sua densidade baixa, resistência à corrosão e condutividade térmica, equipamentos agrícolas e industriais, na indústria química e metalúrgica, no tratamento de água, na confecção de utensílios de cozinha e na medicina, na forma de compostos.

2.2 Bauxita

A bauxita foi descoberta em 1825 por P. Berthier nos arredores da vila de Les Baux, próxima a Marselha, na França. Tratava-se de um material de aspecto argiloso, não plástico, com a seguinte composição: 52% de alumina, 27% de óxido férrico e 20% de água combinada (Ramos, op. cit.). Foi denominado “*beauxite*” por A. Dufrenoy em 1847 e modificado para “*bauxite*” por H. St. Claire Deville em 1861.

A bauxita é formada pelo intemperismo de rochas sílico-aluminosas, que ao longo do tempo e sob condições favoráveis como clima quente e úmido, alternância de estações secas e chuvosas e drenagem adequada, promove a lixiviação da sílica e forma minerais ricos em alumínio. É composta tipicamente por hidróxidos de alumínio, hematita, goethita, argilominerais tais como caulinita e haloisita, óxidos de titânio e sílica.

A alumina aproveitável (aquela aproveitada no processo Bayer) provém de três diferentes minerais: gibbsita, bohemita e diásporo. O primeiro é um hidróxido trihidratado ($\text{Al}(\text{OH})_3$), enquanto os outros dois são monohidratados (AlOOH). Todos podem ser utilizados no processo Bayer, porém apresentam propriedades físicas e químicas diferentes, com destaque para a temperatura de desidratação que influi diretamente no consumo energético do processo e que é menor para a gibbsita. O diásporo é encontrado em bauxitas geologicamente mais antigas, como as da Grécia, Rússia, leste europeu e China. No restante do mundo, é mais comum a gibbsita e em quantidades menores, a bohemita (Ramos, op. cit.).

De acordo com Hill e Sehnke (Hill e Sehnke, 2006) de toda bauxita minerada no mundo, aproximadamente 85% se destina à produção de alumínio, 10% a usos não-metálicos e os 5% restantes a aplicações não-metalúrgicas. Assim, a grande maioria da bauxita produzida no mundo é usada na manufatura de alumina através do processo Bayer, e subsequentemente, a maioria da alumina resultante é usada na produção de alumínio. São necessárias, aproximadamente, de 4 a 6 t de bauxita para produzir 2 t de alumina, que por sua vez, produzem 1 t de alumínio metálico. Em 2008, 1 t de cada produto valia como segue: US\$35,70 para bauxita, US\$335,96 para alumina e US\$2590,50 para alumínio (DNPM).

As reservas mundiais de bauxita alcançaram o valor de 38 bilhões de toneladas em 2008. As reservas brasileiras somaram 2,6 bilhões, equivalente a 6,8% do total. A bauxita do tipo metalúrgica corresponde a 95% e a refratária, 5%. A produção de bauxita em 2008 cresceu 2,6% em relação a 2007 e o Brasil foi o terceiro maior produtor, responsável por 13,5% da produção mundial. A Tabela 1 apresenta dados de reserva e produção de bauxita, segundo o sumário mineral de 2009 (Dnmp, 2010).

Tabela 1 - Reservas e produção mundial de bauxita¹

Países	Reservas (10 ⁶ t)		Produção (10 ³ t)		
	2008	%	2007	2008	%
Brasil	2.607	6,8	25.877	28.098	13,5
Austrália	7.900	20,7	62.400	63.000	30,1
China	2.300	6	30.000	32.000	15,4
Grécia	650	1,7	2.220	2.200	1,1
Guiana	900	2,4	1.600	1.600	0,8
Guiné	8.600	22,6	18.000	18.000	8,6
Índia	1.400	3,7	19.200	20.000	9,6
Jamaica	2.500	6,6	14.600	15.000	7,2
Rússia	600	1,6	6.400	6.400	3,1
Suriname	600	1,6	4.900	4.500	2,2
Venezuela	320	0,8	5.900	5.900	2,8
Vietnam	5.400	14,2	30	30	0
Outros	4.290	11,3	11.950	11.600	5,6
Total	38.067	100	203.077	208.345	100

2.2.1 Bauxita de Porto Trombetas

O depósito de bauxita de Porto Trombetas, junto com os depósitos de Paragominas, Nhamundá, Almerim-Mazagão e outros menores, ocorre em uma faixa que margeia as rochas proterozóicas do norte do Brasil, das Guianas e da Venezuela (Biondi, 2003). O perfil de alteração é desenvolvido a partir de rochas sedimentares argilo-arenosas, recobertas por uma espessa camada de argila caulínica (argila Belterra), com espessura de até 20 m.

Esses depósitos são denominados tipo plataforma, pois os horizontes de bauxitas ficam situados no topo de platôs, sobre camadas de argilitos. Porto Trombetas, com reserva estimada em 600 milhões de toneladas de minério a 49,5% de teor médio de Al₂O₃, é um exemplo-tipo (Biondi, op. cit.).

O depósito é estruturado da seguinte maneira, do topo para a base: cobertura de Argila de Belterra; zona mineralizada, subdividida em bauxita nodular, laterita ferruginosa e bauxita maciça; zona saprolítica ou argilosa. A Figura 1 a seguir mostra essa estruturação.

¹ Fontes: DNPM, (USGS) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries – 2008, (IAI) International Aluminium Institute, (ABAL) Associação Brasileira do Alumínio.

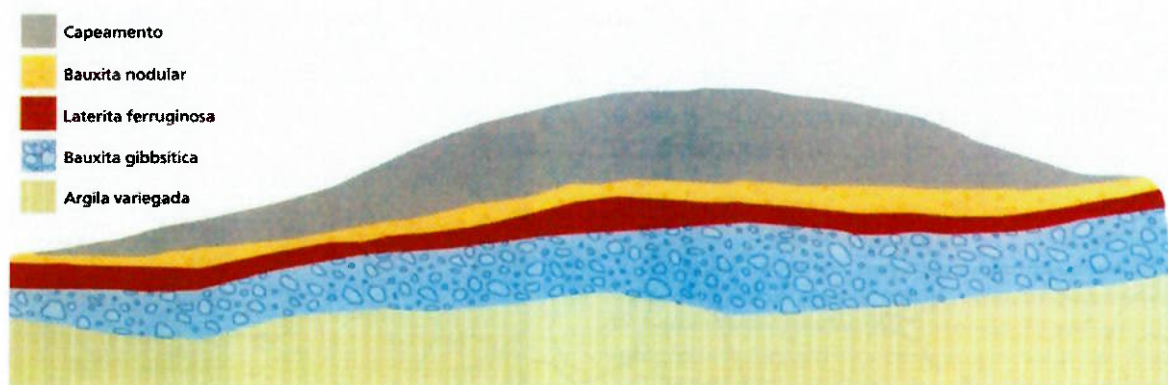


Figura 1 - Seção geológica-tipo dos depósitos de bauxita de Porto Trombetas, Pará (Biondi, 2003)

2.2.2 Lavra e beneficiamento de bauxita

De acordo com Hill e Sehnke (op. cit.), cerca de 85-90% da bauxita produzida no mundo é lavrada a céu-aberto, sendo a lavra por tiras o método mais comum. Nesse método, a faixa de capeamento é retirada, expondo o minério. Esse minério é escavado e encaminhado à usina, sendo o rejeito juntamente com o capeamento depositado na tira anterior, já exaurida. Os 10-15% restantes são lavrados em minas subterrâneas, principalmente na China, no leste e no sul europeu e na Rússia.

O beneficiamento de bauxita pode ser resumido a britagem, escrubagem, separação por tamanho, deslamagem e, se necessário, concentração da gibbsita (Chaves et al., 2007). A britagem visa cominuir o minério o suficiente para liberar minerais argilosos, sendo os britadores de impacto os equipamentos clássicos, porém estão sendo substituídos por *sizers*. A escrubagem (atrição das superfícies das partículas) é feita para remover argila e limonita aderidas às partículas de gibbsita, em grandes tambores giratórios denominados *scrubbers*. A separação por tamanho pode ser feita em peneiras vibratórias circulares ou retilíneas, de alta frequência ou em ciclones, dependendo da granulometria de classificação. A deslamagem, feita normalmente em ciclones, retira as partículas mais finas de argila e limonita.

Por último e menos utilizada, a concentração de gibbsita pode envolver métodos densitários, como jigagem e espiral de Reichert (a porosidade da gibbsita diminui sua densidade, sendo possível separá-la do quartzo; minerais de ferro e titânio também são facilmente separados por densidade), separação magnética (minerais de ferro e titânio apresentam baixas susceptibilidades magnéticas) e flotação (podendo ser direta, flotando a gibbsita ou reversa, flotando o quartzo contido). É importante ressaltar que o tratamento da bauxita, aparentemente, só é feito no Brasil. Nos outros países produtores, costuma-se alimentar os minérios mais ricos diretamente na refinaria (Chaves et al., op. cit.)

2.3 Metalurgia do alumínio

Conforme dito anteriormente, para produzir alumínio, primeiramente obtém-se alumina a partir da bauxita através do processo Bayer, para em seguida reduzir esta a alumínio metálico, pelo processo Hall-Héroult. Estes dois processos são descritos a seguir.

O processo Bayer, sinteticamente, consiste na digestão da bauxita em soda cáustica, feita em alta temperatura e pressão, para solubilizar a alumina e precipitar as impurezas. A solução de aluminato de sódio é então resfriada, separada dos constituintes insolúveis e enviada para tanques para cristalizar e precipitar a alumina, que é calcinada em seguida (Ramos, 1982).

A alumina que pode ser solubilizada pela soda cáustica é dita aproveitável e provém principalmente da gibbsita. A sílica ocorre de duas maneiras, como quartzo, insolúvel, e como sílica reativa. Esta, oriunda de argilominerais, como a caulinita, reage com a soda cáustica, formando um composto insolúvel chamado bayerita. Como resultado, tem-se um aumento no consumo de soda cáustica e perda de alumina. Por esta razão, é comum restringir-se o teor de sílica reativa em 4% (Ramos, op. cit.).

No processo Hall-Hérault, o alumínio é produzido através da eletrólise de alumina num banho de criolita. Esta, fundida, atua como eletrólito e solvente da alumina. Com a passagem de corrente elétrica contínua pela solução, a alumina é decomposta, com o oxigênio migrando para o anodo de carbono, deixando a superfície anódica na forma de CO_2 e o alumínio migrando para o catodo, surgindo na forma metálica (Ramos, op. cit.).

2.4 Análise mineralógica por difratometria de raios X

A difração de raios X permite a identificação de fases minerais a partir do espectro gerado por sua estrutura cristalina. Cada composto apresenta um padrão difratométrico característico, sendo assim possível identificar inúmeros minerais de acordo com a posição angular e intensidade relativa dos picos difratados.

Raios X são incididos sobre a amostra, interagindo com os elétrons e fazendo-os vibrar e irradiar em todas as direções, sendo que parte dela é espalhada elasticamente, sem perda de energia. Quando os átomos que geram o espalhamento estão arranjados sistematicamente numa estrutura cristalina, a relação de fases entre os espalhamentos torna-se periódica e uma radiação difratada é gerada (Formoso, 1984).

A interação do feixe de raios X incidente com a estrutura cristalina da amostra ocorre segundo a lei de Bragg, que estabelece uma relação entre o ângulo de incidência, o comprimento de onda da radiação incidente e a distância interplanar da estrutura, conforme a equação 1: (Formoso, op. cit.)

$$n\lambda = 2d.\text{sen}\theta \quad (\text{equação 1})$$

Onde: n = número inteiro referente à ordem da difração; λ = comprimento de onda do feixe incidente; d = distância interplanar para o conjunto de planos hkl da estrutura cristalina; θ = ângulo de incidência dos raios X

O feixe difratado é coletado por um difratômetro, que gera um gráfico de intensidade versus ângulo 2θ , compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, permitindo a identificação das fases minerais por comparação com um banco de dados (Formoso, op. cit.).

2.4.1 Análise por agrupamento a partir de difração de raios X

A análise por agrupamento ou *cluster analysis* é uma ferramenta estatística que permite ordenar uma coleção de dados em grupos de semelhança e dissimilaridades, de tal maneira que o grau de similaridade seja maior quando os objetos estão no mesmo grupo e menor quando estão em grupos diferentes. No entanto, não há a necessidade de conhecimento prévio dos objetos para a ordenação (X'Pert, 2008; Eletronic, 2008 apud Antoniassi, 2010).

Através de um tratamento matemático, cada amostra é definida com um ponto no espaço, descrito pelas variáveis escolhidas no estudo. A partir disso, pode-se então calcular as distâncias desses pontos no espaço. Isso equivale a calcular o grau de similaridade das amostras (Moita Neto e Moita, 1998 apud Shimizu, 2009).

A aglomeração é feita quando se tem uma matriz com todas as distâncias entre as amostras. Há várias maneiras de se fazer a aglomeração, sendo a hierárquica a mais comum. Nesse método, as amostras são inicialmente consideradas individuais, sendo progressivamente combinadas de acordo com suas similaridades até que todas estejam dentro do mesmo grupo.

A maneira usual de se ilustrar o agrupamento é o dendograma. Nele, as amostras são representadas como nós e os passos do agrupamento pela junção dos ramos no dendograma. Portanto, a distância entre os subgrupos é dada pelo comprimento do ramo. Assim, duas amostras próximas no dendograma devem ter valores semelhantes para a variável estudada.

No caso de análise por agrupamento de difratogramas de raios X, o software X'Pert High Score Plus, da marca PANalytical, permite o processamento direto de inúmeros espectros sem o prévio tratamento dos mesmos ou identificação/conhecimento das assembléias mineralógicas presentes.

O procedimento de classificação considera tanto a posição de picos difratados quanto as intensidades difratadas, sendo que os agrupamentos resultantes retratam não só variações de assembléias mineralógicas, mas também a proporção dos minerais presentes. Pode-se ainda identificar os espectros mais representativos de cada grupo e também padrões anômalos, que não se encaixam dentre as classes definidas (Marcchiarola, 2008 apud Antoniassi, op. cit.).

2.5 Mineralogia quantitativa automatizada

Nos últimos 15 anos, as ferramentas de mineralogia quantitativa baseadas em microscopia eletrônica de varredura (MEV) evoluíram rapidamente, em função dos avanços crescentes da computação, melhores hardwares de MEV e o desenvolvimento de métodos de análise de imagens sofisticados (Fandrich et al, 2007).

Sistemas comerciais como MLA e QEMSCAN permitem a obtenção de uma grande quantidade de dados mineralógicos e texturais em curto intervalo de tempo. Tais dados incluem composição mineralógica e química, distribuição de elementos de interesse, espectros de liberação, distribuição de partículas mistas, dentre outros (Shimizu, op. cit.).

O processo da análise de imagens envolve algumas etapas, como aquisição e tratamento da imagem, identificação dos minerais, segmentação das fases, desaglomeração das partículas, manipulação dos dados e interpretação dos resultados (Petruck, 1989, apud Shimizu, op. cit.).

Uma imagem de alta resolução e baixo ruído é um pré-requisito para a identificação adequada e a quantificação de minerais. As imagens são obtidas a partir de seções polidas ou delgadas de material desagregado. A preparação das seções requer cuidados especiais como amostragem adequada, utilização de resina específica, bom polimento e distribuição aleatória dos minerais na seção (Fandrich et. al., op. cit., Sutherland e Gottlieb, 1991).

O software mais utilizado mundialmente é o MLA (Mineral Liberation Analyser). O MLA foi desenvolvido pelo Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre (JKMRC), da Universidade de Queensland e apresentado em 1997, como um novo desenvolvimento no campo de ferramentas de mineralogia quantitativa automatizadas baseadas em MEV. Trazia como grande vantagem o fato de poder combinar análise de imagens de elétrons retroespalhados (BSE) com identificação de minerais por raios X (Fandrich et. al., op. cit.).

A análise de imagens de BSE feita pelo MLA permite discriminar precisamente as diferentes fases minerais presentes em cada partícula. Isso, graças às imagens de alta resolução geradas pelos sinais estáveis dos BSE de um MEV moderno. As principais funções de análise de imagens usadas pelo MLA são conhecidas como desaglomeração de partículas e segmentação de fases (Fandrich et. al., op. cit.).

A seção polida utilizada para análise ao MEV deve, idealmente, conter partículas separadas umas das outras, em frações granulométricas estreitas. No entanto, mesmo tomadas as precauções necessárias, algumas partículas irão se tocar. Se não forem reconhecidas e tratadas apropriadamente, essas aglomerações podem levar a resultados de liberação enviesados. Para isso, a desaglomeração deve ser sempre conduzida com cautela, podendo ser automática de acordo com parâmetros pré-determinados ou manualmente, partícula por partícula (Fandrich et. al., op. cit.).

A segmentação de fases consiste na identificação das fases minerais e da definição de seus contornos para cada partícula da seção. Essa função delimita as regiões onde o nível de cinza é homogêneo e corresponde a um só mineral, visto que nas imagens de elétrons retroespalhados, o tom de cinza de cada pixel é proporcional ao número atômico médio daquele ponto. Essa distinção pode ser suficiente para diferenciar os minerais presentes, porém quando os minerais possuem um número atômico médio semelhante, os tons de cinza são muito parecidos e a identificação é baseada em microanálises químicas por EDS (dispersão de energia). A segmentação de fases também envolve o reconhecimento e a eliminação de feições de uma partícula que não representam uma fase independente, como fraturas, sombras, vazios ou o perímetro escuro que aparece ao redor de muitas partículas (Fandrich et. al., op. cit.).

Além dos diferentes níveis de cinza, os minerais também podem ser identificados por análises dos raios X característicos, que podem ser feitas de três formas diferentes (Fandrich et. al., op. cit.):

- *Pontual*: um espectro é coletado no centro de cada região homogênea identificada, para evitar contaminação com as fases da borda. Os espectros coletados são então comparados com um banco de dados de espectros padrão para completar o procedimento de identificação e produzir uma imagem classificada. É a análise típica feita pelo MLA.
- *Área*: são coletados espectros por toda a área de uma região homogênea, exceto em sua borda, novamente para evitar contaminação com as fases da borda. Pode ser utilizada quando há a possibilidade de dois ou mais minerais associados terem o mesmo número atômico médio, o que levaria a níveis de cinza muito próximos e provavelmente à identificação de uma fase *só onde deveria haver* duas ou mais.
- *Mapeamento*: é criada uma rede por toda a partícula e um espectro é coletado em cada ponto da rede, para identificar o mineral. este tipo de análise requer muito mais tempo do que as duas anteriores, já que são coletados um número muito maior de espectros.

A análise por BSE juntamente com os três tipos de análise de raios X dão ao programa variados modos de medida possíveis, sendo os principais descritos brevemente a seguir (Fandrich et. al., op. cit.).

- *Análise de liberação padrão (BSE)*: é o modo mais básico, no qual uma série de imagens é coletada para posterior processamento, que produz dados de liberação. A discriminação de minerais é feita por contraste de níveis de cinza e os dados de liberação são gerados exclusivamente por análise de imagens.
- *Análise de liberação estendida (XBSE)*: análise de raios X por área em amostras com contraste de BSE suficientes para assegurar uma segmentação efetiva. É o método ideal para a maioria dos minerais, devido à alta resolução das imagens de BSE e à velocidade de identificação dos raios X.
- *Análise por mapeamento de raios X em grãos (GXMAP)*: conjugação de mapeamento de raios X para as fases que não podem ser segmentadas somente pelos níveis de cinza e de análise por área para as fases que são facilmente segmentadas.
- *Análise de liberação de fases esparsas (SPL)*: este modo busca nas imagens de BSE partículas contendo fases de interesse, usando uma faixa de nível de cinza e então executa uma análise XBSE nestas. O processamento é idêntico ao do modo XBSE e gera os mesmos dados de liberação e associação mineral.
- *Análise modal por raios X (XMOD)*: utilização da imagem de BSE para discriminar as partículas de fundo (background) e então coletar um espectro de raios X de cada ponto da rede sobre a partícula. Os resultados permitem apenas quantificar a proporção de cada fase na amostra.
- *Busca por fases raras (RPS)*: este modo busca nas imagens de BSE fases de interesse, usualmente traços (Au, Pt, U,..) e coleta o espectro de raios X correspondente. Para cada grão encontrado, o sistema salva a imagem da partícula contendo o grão, a localização e o espectro de raios X. O operador pode então voltar à localização do grão encontrado e investigar com mais detalhes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram estudadas amostras de bauxita provenientes de Porto Trombetas. A coleta de amostras e o procedimento de amostragem para obtenção de alíquotas representativas foram realizados pela equipe técnica da Mineração Rio do Norte (MRN), as quais foram encaminhadas para os estudos laboratoriais.

As atividades podem ser descritas em duas etapas:

- Análise por agrupamento por difração de raios X de 69 amostras com definição de grupos para posterior detalhamento;
- Caracterização das associações mineralógicas por análise de imagens automatizada (MEV-MLA) nos grupos compostos por amostras de bauxita nodular e definidos na análise por agrupamento.

A preparação das amostras para a análise por agrupamento (*cluster analysis*) foi conduzida segundo o mesmo procedimento de preparação de amostras para difratometria de raios X - método do pó, sendo cominuição em granulometria apropriada e montagem de pastilhas prensadas (Figura 2).

A coleta dos difratogramas foi efetuada em equipamento da marca PANalytical, modelo XPert Pro, com as seguintes configurações: tubo de Cu, radiação $\text{K}\alpha$, 45 kV, 40 mA; detector X'Celerator; fenda fixa; e coleta de 5 a 70° (2θ), passo $0,02^\circ$, (2θ), tempo por passo 10 s. Os resultados permitiram classificar as amostras nos grupos por tipologia, sendo: bauxita nodular, bauxita maciça e laterita.

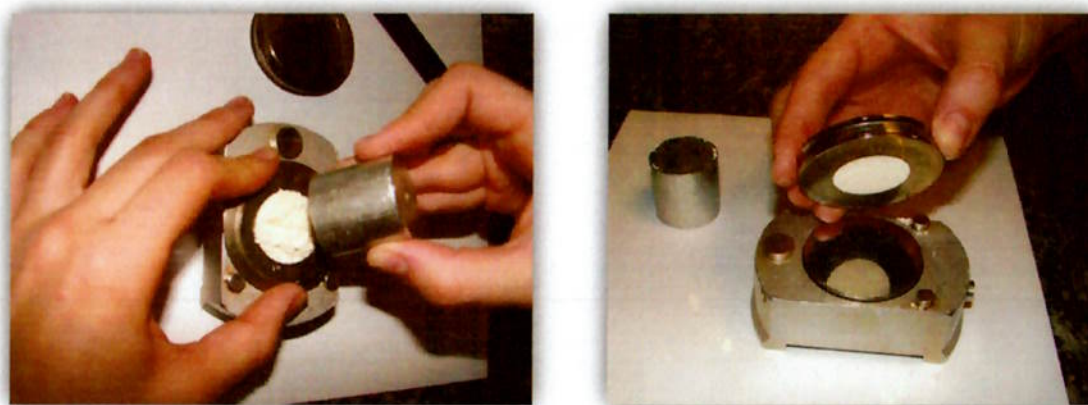


Figura 2 - Montagem da amostra moída em pastilhas prensadas para DRX

Dos grupos ou *clusters* gerados foram selecionados dois (subdivididos em outros dois) para os estudos ao MEV-MLA. As frações retidas em 0,037 mm das amostras de cada grupo foram compostas com massas iguais e então cominuídas abaixo de 0,42 mm e peneiradas a úmido em peneiras com as seguintes aberturas: 0,30; 0,21; 0,15; 0,074; 0,037 e 0,020 mm.

Todas as frações granulométricas foram objeto de análises químicas por fluorescência de raios X para determinação dos teores de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 ; também foram determinados os conteúdos de Al_2O_3 aproveitável e SiO_2 reativa por via úmida pelo laboratório químico da MRN.

Alíquotas representativas de todas as frações granulométricas acima de 0,037 mm foram obtidas para a confecção de seções polidas. Estas foram levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV, marca FEI modelo Quanta 600 FEG - Figura 3) para o estudo mineralógico detalhado das formas de ocorrência e associação mineralógica, de forma automatizada utilizando o software MLA - Mineral Liberation Analyser, acoplado ao MEV, e sistema de microanálise por EDS (Energy Dispersion Spectrometry - espectrometria por dispersão de energia) com detector Bruker Quantax 4030.

Após a coleta das imagens e espectros de raios X, as fases foram classificadas em gibbsita (com variados teores de sílica), caulinita (com variados teores de ferro), oxi-hidróxidos de ferro, quartzo, minerais de titânio, zircão, mica e diopsídio. A composição química média desses minerais considerados no banco de dados para análise de imagens encontra-se no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

As imagens digitais obtidas foram processadas para obtenção das seguintes informações:

- Composição mineralógica;
- Composição química calculada;
- Distribuição de elementos químicos de interesse;
- Associações e espectro de liberação das variedades de gibbsita;
- Partição de Al, Si e Fe nos minerais portadores.



Figura 3 - MEV utilizado nos estudos de caracterização e detalhe do porta-amstras para MLA

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da análise por agrupamento

A análise por agrupamento a partir dos difratogramas de raios X (fração $>0,037\text{mm}$) de todas as amostras estudadas (69 no total) resultou em seis grupos, conforme dendograma e tabela expostos no Apêndice 2.

Os grupos 1 e 2 são constituídos basicamente por amostras de bauxita nodular com variações nos conteúdos de ferro, de tal forma que os mesmos foram divididos em subgrupos "A" e "B" em função do teor de Fe_2O_3 . O grupo 3 é constituído por bauxita maciça e os grupos 5 e 6 por lateritas; o grupo 4 é composto por apenas duas amostras com teores intermediários de alumina aproveitável e óxido de ferro. Conforme anteriormente descrito, apenas dois grupos com os mais elevados teores de sílica reativa foram sujeitos a análise de imagens automatizada: os grupos 1 e 2 e seus subgrupos.

Os grupos caracterizados são resultantes da composição proporcional das frações retidas em $0,037\text{ mm}$ das amostras constituintes, cujos detalhes são apresentados no Apêndice 2. Os teores médios de cada grupo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química e distribuição média dos principais teores de cada grupo ($+0,037\text{mm}$)

Grupo	Teores $+0,037\text{ mm}$ (%)						Distribuição na amostra (%)			Massa (%)
	Al_2O_3	$\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{ap}}$	Fe_2O_3	SiO_2	SiO_2_{re}	TiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3_{\text{ap}}$	SiO_2_{re}	Fe_2O_3	$+0,037\text{ mm}$
1A	56,8	50,8	5,50	5,81	5,14	1,41	93,2	32,4	64,7	72,1
1B	54,9	46,7	9,19	6,73	5,79	1,28	90,5	27,3	67,9	64,8
2A	56,3	47,9	3,14	8,69	7,05	1,53	72,9	13,5	28,3	39,4
2B	53,3	43,4	10,3	8,93	7,17	1,10	94,5	37,3	69,0	67,4
3	52,0	47,7	15,7	3,97	3,05	1,33	93,5	33,7	71,1	78,1
4	43,8	37,4	26,1	6,75	4,41	1,14	92,6	26,8	79,1	68,8
5	39,6	32,4	36,3	4,75	3,76	1,06	93,1	48,3	82,8	78,8
6	31,3	50,8	5,50	6,26	5,14	1,00	89,1	45,1	85,1	76,3

Nota-se que os grupos 1 e 2, compostos majoritariamente de bauxita nodular, apresentam teores elevados de alumina aproveitável (de 43 a 50%), porém também apresentam teores elevados de sílica reativa ($>5\%$). Quanto ao ferro, os subgrupos A possuem teores mais baixos, enquanto nos subgrupos B, eles chegam a 10%.

4.2 Resultados de mineralogia quantitativa por MLA

4.2.1 Análise granuloquímica

Os resultados de análise granuloquímica com a respectiva distribuição de teores e massa por fração dos grupos 1A, 1B, 2A e 2B são expostos, respectivamente, nas Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 3 - Resultados de análise granuloquímica – Grupo 1A

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)							Distrib. no ensaio (%)		
	fração	acum.	Al ₂ O _{3T}	Al ₂ O _{3AP}	Fe ₂ O ₃	SiO _{2T}	SiO _{2RE}	TiO ₂	PF	Al ₂ O _{3AP}	SiO _{2RE}	Fe ₂ O ₃
-0,42+0,30	17,0	17,0	57,7	48,9	5,10	5,98	4,49	1,31	29,8	17,2	15,1	14,1
-0,30+0,21	20,2	37,2	55,2	48,3	5,33	8,27	4,55	1,26	30,0	20,3	18,2	17,5
-0,21+0,15	13,9	51,2	56,1	49,6	5,82	7,50	4,56	1,29	29,3	14,3	12,6	13,2
-0,15+0,074	16,4	67,5	56,3	49,9	6,16	6,70	4,62	1,32	29,5	17,0	15,0	16,4
-0,074+0,037	10,1	77,6	56,0	47,5	7,43	6,15	4,37	1,24	29,2	9,9	8,7	12,2
-0,037+0,020	3,99	81,6	56,8	51,2	6,61	5,37	4,00	1,07	29,6	4,2	3,2	4,3
-0,020	18,4	100,0	54,1	44,5	7,50	8,86	7,47	1,68	27,7	17,0	27,2	22,4
Total calculado	100,0		55,9	48,2	6,16	7,29	5,05	1,35	29,3	100,0	100,0	100,0
Total +0,037	77,6		56,2	48,9	5,82	7,02	4,53	1,29	29,6	78,8	69,6	73,3
Total +0,020	81,6		56,3	49,0	5,85	6,94	4,50	1,27	29,6	83,0	72,8	77,6

Os teores médios do grupo 1A são de 48,2% de Al₂O₃ aproveitável, 5,05% de SiO₂ reativa, 6,16% de Fe₂O₃ e 1,35% de TiO₂.

A cominuição do material gerou 18,4% em massa passante em 0,020 mm, aos quais estão associados 17% do total de Al₂O₃ aproveitável, 27% da sílica reativa e 22% dos óxidos de ferro. Verifica-se que nessa fração há uma redução expressiva nos teores de Al₂O₃ aproveitável (44,5%) e enriquecimento marcante de sílica reativa (7,47%). O material deslamado (total +0,020 mm) apresenta teores de 49,0% de Al₂O₃ aproveitável, 4,5% de sílica reativa e 5,8% de Fe₂O₃.

Tabela 4 - Resultados de análise granuloquímica – Grupo 1B

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)							Distrib. no ensaio (%)		
	retid	acum.	Al ₂ O _{3T}	Al ₂ O _{3AP}	Fe ₂ O ₃	SiO _{2T}	SiO _{2RE}	TiO ₂	PF	Al ₂ O _{3AP}	SiO _{2RE}	Fe ₂ O ₃
+0,30	15,2	15,2	54,4	47,9	8,79	6,75	4,04	1,15	28,8	16,2	10,9	13,3
-0,30+0,21	18,4	33,6	51,6	47,3	8,93	9,64	4,99	1,10	28,6	19,4	16,4	16,4
-0,21+0,15	13,6	47,1	54,3	47,2	9,58	6,91	4,98	1,16	28,6	14,2	12,0	13,0
-0,15+0,074	15,9	63,1	52,8	44,8	9,93	7,54	4,89	1,14	28,5	15,9	13,8	15,8
-0,074+0,037	12,1	75,1	53,4	43,1	10,7	6,24	4,57	1,08	28,4	11,6	9,8	12,9
-0,037+0,020	4,5	79,6	55,1	48,7	9,76	5,52	4,28	0,92	28,7	4,8	3,4	4,4
-0,020	20,4	100,0	49,7	39,4	11,8	10,6	9,25	1,70	25,6	17,9	33,6	24,1
Total calculado	100,0		52,6	44,9	10,0	8,10	5,61	1,23	28,0	100,0	100,0	100,0
Total +0,037	75,1		53,2	46,2	9,52	7,57	4,70	1,13	28,6	77,3	63,0	71,5
Total +0,020	79,6		53,3	46,3	9,53	7,46	4,68	1,12	28,6	82,1	66,4	75,9

Os teores médios do grupo 1B são de 44,9% de Al_2O_3 aproveitável, 5,61% de SiO_2 reativa, 10,0% de Fe_2O_3 e 1,23% de TiO_2 .

A cominuição do material gerou 20,4% em massa passante em 0,020 mm, aos quais estão associados 18% do total de Al_2O_3 aproveitável, 34% da sílica reativa e 24% dos óxidos de ferro. Verifica-se que nessa fração há uma redução expressiva nos teores de Al_2O_3 aproveitável (39,4%) e enriquecimento marcante de sílica reativa (9,25%). O material deslamado (total +0,020 mm) apresenta teores de 46,3% de Al_2O_3 aproveitável, 4,7% da sílica reativa e 9,5% de Fe_2O_3 .

Tabela 5 - Resultados de análise granulométrica – Grupo 2A

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)							Distrib. no ensaio (%)		
	retid	acum.	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{t}$	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{AP}$	Fe_2O_3	SiO_2t	SiO_2RE	TiO_2	PF	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{AP}$	SiO_2RE	Fe_2O_3
+0,30	19,4	19,4	56,9	48,7	3,09	9,29	5,99	1,36	29,0	20,7	17,5	15,8
-0,30+0,21	19,6	39,0	56,1	48,0	3,25	10,5	6,06	1,36	28,9	20,6	17,9	16,8
-0,21+0,15	14,7	53,7	57,0	47,8	3,41	9,78	5,98	1,44	28,9	15,4	13,2	13,2
-0,15+0,074	16,7	70,4	57,0	48,1	3,59	9,20	6,17	1,64	29,1	17,6	15,5	15,8
-0,074+0,037	10,2	80,5	55,8	46,2	4,64	8,38	5,86	1,61	28,9	10,3	9,0	12,5
-0,037+0,020	2,2	82,8	57,3	-	4,62	7,28	-	1,23	30,2	-	-	2,7
-0,020	17,2	100,0	53,4	41,0	5,13	12,1	10,3	1,72	27,2	15,5	26,8	23,3
Total calculado	100,0		56,1	45,7	3,80	9,93	6,63	1,50	28,7	100,0	100,0	100,0
Total +0,037	80,5		56,6	47,9	3,49	9,54	6,02	1,46	28,9	84,5	73,2	74,0
Total +0,020	82,8		56,6	46,6	3,52	9,48	5,86	1,45	29,0	84,5	73,2	76,7

Os teores médios do grupo 2A são de 45,7% de Al_2O_3 aproveitável, 6,63% de SiO_2 reativa, 3,80% de Fe_2O_3 e 1,50% de TiO_2 .

A cominuição do material gerou 17,2% em massa passante em 0,020 mm, aos quais estão associados 15,5% do total de Al_2O_3 aproveitável, 27% da sílica reativa e 23% dos óxidos de ferro. Verifica-se que nessa fração há uma redução expressiva nos teores de Al_2O_3 aproveitável (41,0%) e enriquecimento marcante de sílica reativa (10,3%). O material deslamado (total +0,020 mm) apresenta teores de 46,6% de Al_2O_3 aproveitável, 5,9% da sílica reativa e 3,5% de Fe_2O_3 .

Tabela 6 - Resultados de análise granulométrica – Grupo 2B

Fração (mm)	% Massa		Teores (%)							Distrib. no ensaio (%)		
	retid	acum.	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{t}$	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{AP}$	Fe_2O_3	SiO_2t	SiO_2RE	TiO_2	PF	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{AP}$	SiO_2RE	Fe_2O_3
+0,30	17,1	17,1	51,0	45,2	8,84	8,21	6,10	1,02	30,8	18,1	16,2	13,9
-0,30+0,21	17,9	35,0	52,3	45,4	10,2	9,07	6,08	1,05	27,3	19,0	16,8	16,7
-0,21+0,15	13,6	48,6	52,6	44,7	10,4	8,45	4,57	1,06	27,6	14,2	9,6	12,9
-0,15+0,074	16,2	64,7	51,7	42,9	11,2	8,87	6,07	1,11	27,1	16,3	15,2	16,6
-0,074+0,037	10,2	74,9	50,9	41,5	12,7	8,28	5,24	1,07	27,1	10,0	8,3	11,9
-0,037+0,020	3,5	78,4	51,3	44,0	13,0	7,75	6,31	0,92	26,7	3,6	3,4	4,2
-0,020	21,6	100,0	48,7	37,1	12,1	13,3	9,14	1,48	24,6	18,8	30,5	23,9
Total calculado	100,0		51,1	42,6	10,9	9,60	6,46	1,15	27,3	100,0	100,0	100,0
Total +0,037	74,9		51,7	44,2	10,5	8,61	5,69	1,06	28,1	77,6	66,1	71,9
Total +0,020	78,4		51,7	44,2	10,6	8,57	5,72	1,06	28,0	81,2	69,5	76,1

Os teores médios para o grupo 2B são de 42,6% de Al_2O_3 aproveitável, 6,46% de SiO_2 reativa, 10,9% de Fe_2O_3 e 1,15% de TiO_2 .

A cominuição do material gerou 21,6% em massa passante em 0,020 mm, aos quais estão associados 19% do total de Al_2O_3 aproveitável, 30,5% da sílica reativa e 24% dos óxidos de ferro. Verifica-se que nessa fração há uma redução expressiva nos teores de Al_2O_3 aproveitável (37,1%) e enriquecimento marcante de sílica reativa (9,14%). O material deslamado (total +0,020 mm) apresenta teores de 44,2% de Al_2O_3 aproveitável, 5,7% da sílica reativa e 10,6% de Fe_2O_3 .

4.2.2 Composição mineralógica

A estimativa da composição mineralógica dos grupos 1A, 1B, 2A e 2B, obtida a partir de análise de imagens é apresentada nas Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10, respectivamente.

Tabela 7 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Grupo 1A

Mineral	Fração (mm)					Total +0,037 mm
	-0,42+0,30	-0,30+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,037	
gibbsita	33	33	36	35	31	33
gibbsita_2-3	37	34	22	24	27	29
gibbsita_4	22	23	32	30	27	26
caulinita-gibbsita	2	2	2	2	1,8	2
caulinita	tr	tr	tr	tr	tr	tr
caulinita_Fe	0,7	1,1	1,1	1,1	0,7	1,0
caulinita-goethita	3	4	4	5	6	4
oxi-hidroxi_Fe	2	2	2	3	5	3
quartzo	0,5	0,6	0,5	0,6	tr	0,5
min titânio	tr	tr	tr	tr	tr	tr
zircão + outros sil	tr	tr	tr	tr	1,3	tr
Total	100	100	100	100	100	100

Tabela 8 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Grupo 1B

Mineral	Fração (mm)					Total +0,037 mm
	-0,42+0,30	-0,30+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,037	
gibbsita	36	38	35	33	37	36
gibbsita_2-3	21	19	24	20	18	21
gibbsita_4	27	26	25	27	25	26
caulinita-gibbsita	3	3	3	3	1,9	3
caulinita	tr	tr	tr	tr	tr	tr
caulinita_Fe	1,2	1,4	0,8	1,3	2	1,3
caulinita-goethita	7	7	7	9	9	8
oxi-hidroxi_ferro	4	5	5	6	6	5
quartzo	0,6	0,6	0,6	0,9	tr	0,6
min titânio	tr	tr	tr	tr	tr	tr
zircão + outros sil	tr	tr	tr	tr	0,5	tr
Total	100	100	100	100	100	100

Tabela 9 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Grupo 2A

Mineral	Fração (mm)					Total +0,037 mm
	-0,42+0,30	-0,30+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,037	
gibbsita	22	22	21	23	25	22
gibbsita_2-3	20	16	18	18	15	18
gibbsita_4	47	49	49	48	47	48
caulinita-gibbsita	6	6	6	5	4	5
caulinita	tr	tr	tr	tr	tr	tr
caulinita_Fe	0,8	1,3	1,5	1,1	1,3	1,2
caulinita-goethita	1,4	1,4	1,8	1,3	3	1,6
oxi-hidro_x_Fe	1,0	1,3	1,3	1,4	3	1,4
quartzo	2	1,9	1,8	1,4	1,0	1,7
min titânio	tr	tr	tr	tr	0,5	tr
zircão + outros sil	tr	tr	tr	tr	0,7	tr
Total	100	100	100	100	100	100

Tabela 10 - Composição mineralógica por fração granulométrica (MLA) – Grupo 2B

Mineral	Fração (mm)					Total +0,037 mm
	-0,42+0,30	-0,30+0,21	-0,21+0,15	-0,15+0,074	-0,074+0,037	
gibbsita	37	36	35	35	34	36
gibbsita_2-3	20	22	23	22	22	22
gibbsita_4	21	19	19	19	18	20
caulinita-gibbsita	4	4	3	4	3	4
caulinita	tr	tr	tr	tr	tr	tr
caulinita_Fe	2	2	2	3	1,9	2
caulinita-goethita	11	12	13	13	16	12
oxi-hidro_x_Fe	3	3	3	3	4	3
quartzo	1,2	1,1	1,0	0,7	tr	0,9
min titânio	tr	tr	tr	tr	tr	tr
zircão + outros sil	tr	tr	tr	tr	tr	tr
Total	100	100	100	100	100	100

Todos os grupos são constituídos essencialmente por gibbsita, com diferentes constituições químicas: em uma massa homogênea (gibbsita) ou em agregados intimamente associados com caulinita em uma massa microcristalina que mostra contraste de número atômico ligeiramente maior devido à presença de sílica (variedades gibbsita_2-3 e gibbsita_4).

Secundariamente, tem-se caulinita-goethita, oxi-hidróxidos de ferro e a caulinita-gibbsita, também em todos os grupos, sendo os dois primeiros mais presentes nos subgrupos B, e o último no grupo 2A. Os outros minerais são minoritários, chegando no máximo a 2%.

As distribuições de Al_2O_3 , SiO_2 e Fe_2O_3 nos minerais constituintes de cada grupo são apresentadas nas Tabela 11 e Tabela 12.

Nota-se que a sílica reativa e a alumina não aproveitável estão associadas principalmente com a fase gibbsita_4, enquanto que a alumina aproveitável está associada à fase gibbsita. Já o óxido de ferro associa-se principalmente às fases caulinita-goethita e oxi-hidróxidos de ferro. Exceções são a alumina aproveitável no grupo 2A, que se concentra na gibbsita_4 e a alumina não aproveitável no grupo 2B, que se concentra na caulinita-goethita.

Tabela 11 - Distribuição dos principais óxidos nas fases minerais – Grupo 1A e 1B

Fases minerais identificadas	GRUPO 1A						GRUPO 1B					
	Massa (%)	Al ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Fe ₂ O ₃ (%)	Massa (%)	Al ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Fe ₂ O ₃ (%)
		AP	NAP	R	NR			AP	NAP	R	NR	
gibbsita	33	42	1	1		1	36	48	1	1		<1
gibbsita 2-3	29	32	24	28	3	17	21	24	14	18	1	8
gibbsita 4	26	25	40	46	40	10	26	26	35	44	33	6
caulinita-gibbsita	2	1	7	8	5	1	3	2	8	10	5	1
caulinita	tr		<1	<1		<1	tr		1	1		<1
caulinita_Fe	1,0		6	7		2	1,3		7	9		2
caulinita-goethita	4		18	8	10	35	8		29	14	16	42
oxi-hidro_x_ferro	3		3	1	5	34	5		6	3	11	40
quartzo	0,5				30		0,6				31	
zircão+ outros silic.	tr				6		tr		<1		2	
Total		100	100	100	100	100		100	100	100	100	100

AP=aproveitável, NAP= não aproveitável, R=reativa, NR=não reativa

Tabela 12 - Distribuição dos principais óxidos nas fases minerais – Grupo 2A e 2B

Fases minerais identificadas	GRUPO 2A						GRUPO 2B					
	Massa (%)	Al ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Fe ₂ O ₃ (%)	Massa (%)	Al ₂ O ₃ (%)		SiO ₂ (%)		Fe ₂ O ₃ (%)
		AP	NAP	R	NR			AP	NAP	R	NR	
gibbsita	22	29	1	1		1	36	50	1	1		<1
gibbsita 2-3	18	20	12	12	1	16	22	26	13	18	1	8
gibbsita 4	48	48	59	62	36	27	20	21	22	30	22	4
caulinita-gibbsita	5	3	15	15	7	5	4	2	10	13	7	1
caulinita	tr		<1	<1		<1	tr		1	2		<1
caulinita_Fe	1,2		6	6		4	2		11	14		3
caulinita-goethita	2		6	2	2	21	12		39	21	22	60
oxi-hidro_x_ferro	1		1	1	2	27	3		3	2	6	24
quartzo	2				51		0,9				41	
zircão+ outros silic.	tr		<1		2		tr		<1		1	
Total		100	100	100	100	100		100	100	100	100	100

AP=aproveitável, NAP= não aproveitável, R=reativa, NR=não reativa

4.2.3 Formas de associações da gibbsita

As principais feições de associações minerais são detalhadas no Apêndice 3, ao passo que as formas de associação dos minerais portadores de alumina são apresentadas a seguir.

4.2.3.1 Grupo 1A

As formas de associações das fases portadoras de Al₂O₃ entre livres e mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases) para o intervalo granulométrico considerado (-0,42+0,037 mm) são apresentadas na Tabela 13. **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Pela distribuição das formas das associações minerais verifica-se que as principais fases de gibbsita (gibbsita e gibbsita 2-3) apresentam cerca de 70% de suas partículas livres, ou seja, mais de 95% de sua área não associada a qualquer outro mineral. As partículas mistas referem-se, essencialmente, a associações entre as variedades de gibbsita na forma de partículas binárias.

Considerando-se o agrupamento da gibbsita+gibbsita 2-3, a parcela de partículas livres alcança 86%. As associações da gibbsita por fração granulométrica (Apêndice 4) não indicam incremento de liberação para as frações mais finas.

A liberação da caulinita-gibbsita é da ordem de 73% e suas partículas mistas referem-se principalmente a associações com as variedades de gibbsita. A caulinita é rara e apresenta uma liberação de cerca de 15%, sendo associada principalmente com caulinita-goethita. A variedade caulinita_Fe mostra liberação de cerca de 63%, com suas partículas mistas ocorrendo principalmente com caulinita-goethita.

Tabela 13 - Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de Al_2O_3 (em massa; fração +0,037 mm) - Grupo 1A

Associações das fases minerais	gibbsita	gibbsita 2-3	gibbsita 4	caulinita/ gibbsita	caulinita	caulinita-Fe	gibbsita + gibbs. 2-3
Massa (%)	33	29	26	2,0	tr	1,0	63
Livre (%)	70	68	76	73	15	63	86
Mista binárias (%)	20	24	16	17	20	18	12
Mista ternárias (%)	10	7,7	8,0	9,9	65	19	2,2
Detalhe binárias							
gibb	-	21	12	12	1,4	3,9	-
gibb_2-3	13	-	2,3	0,7	0,1	0,3	-
gibb_4	4,7	2,2	-	3,0	1,1	1,0	9,7
caulin-gibb	0,3	0,1	0,4	-	-	1,3	0,4
caulin					-	0,3	
caulin_Fe	0,2		0,1	0,5	1,3	-	0,2
caulin- goethita	0,6	0,5	0,3		15	9,4	0,8
ox-hid_Fe	0,7	0,6	0,5	0,2	0,8	0,7	1,0
quartzo	0,1				0,2	0,3	0,1
min titânio	0,1	0,1	0,1	0,3			0,1
zircão + sil.	0,1	0,2	0,2	0,2		0,4	0,2
Detalhe ternárias							
gibb	-	3,9	4,2	4,0	8,8	4,4	-
gibb_2-3	4,4	-	2,4	1,7	1,4	2,0	-
gibb_4	4,2	2,2	-	2,9	6,1	3,4	0,7
caulin-gibb	0,3	0,2	0,3	-	0,3	1,7	0,2
caulin					-	0,2	
caulin_Fe	0,2	0,1	0,1	1,1	6,7	-	0,1
caulin- goethita	0,4	0,6	0,4	0,2	34	5,7	0,5
ox-hid_Fe	0,6	0,7	0,4	0,1	7,3	2,0	0,6
quartzo					0,1		
min titânio							
zircão + sil.							

Livre = partículas com mais de 95% do mineral em questão

4.2.3.2 Grupo 1B

As formas de associações das fases portadoras de Al_2O_3 entre livres e mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para o intervalo granulométrico considerado (-0,42+0,037 mm) são apresentadas na Tabela 14. **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 14 - Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de Al_2O_3 (em massa; fração +0,037 mm) - Grupo 1B

Associações das fases minerais	gibbsita	gibbsita 2-3	gibbsita 4	caulinita/gibbsita	caulinita	caulinita-Fe	gibbsita + gibbs. 2-3
Massa (%)	36	21	26	3,0	tr	1,3	56
Livre (%)	63	59	69	77	31	35	75
Mista binárias (%)	22	24	18	11	24	24	20
Mista ternárias (%)	15	18	13	12	45	41	5,1
Detalhe binárias							
gibb	-	16	11	5,2	4,7	1,7	-
gibb_2-3	12	-	3,3	0,2	0,4	0,5	-
gibb_4	6,2	3,5	-	2,8	1,1	2,0	15
caulin-gibb	0,2		0,6	-		1,3	0,2
caulin					-	0,9	
caulin_Fe	0,2	0,2	0,5	1,8	3,8	-	0,3
caulin- goethita	1,1	1,2	0,8	0,6	13	16	1,6
ox-hid_Fe	1,7	2,3	1,1	0,4	1,0	1,4	2,8
quartzo					0,2	0,4	
min titânio	0,1	0,1	0,1				0,1
zircão + sil.	0,1	0,1	0,1				0,1
Detalhe ternárias							
gibb	-	7,8	5,9	3,7	5,0	6,7	-
gibb_2-3	6,1	-	4,0	1,4	0,8	3,4	-
gibb_4	5,7	5,0	-	4,1	4,2	8,1	1,7
caulin-gibb	0,3	0,2	0,5	-	0,5	3,1	0,3
caulin					-	0,8	
caulin_Fe	0,4	0,3	0,6	1,5	6,1	-	0,4
caulin- goethita	0,9	1,9	0,9	0,7	24	13	1,2
ox-hid_Fe	1,1	2,5	1,0	0,3	4,1	5,6	1,4
quartzo							
min titânio						0,1	
zircão + sil.							

Livre = partículas com mais de 95% do mineral em questão

Pela distribuição das formas das associações minerais verifica-se que as principais fases de gibbsita (gibbsita e gibbsita 2-3) apresentam cerca de 60% de suas partículas livres e que as partículas mistas referem-se, em sua maioria, a associações com outra variedade de gibbsita na forma de partículas binárias

Considerando-se o agrupamento da gibbsita + gibbsita 2-3 a parcela de partículas livres alcança 75%. As associações da gibbsita por fração granulométrica (Apêndice 4) não indicam incremento de liberação para as frações mais finas.

A liberação da caulinita-gibbsita é da ordem de 77% e suas partículas mistas referem-se principalmente a associações com as variedades de gibbsita. A caulinita é rara e apresenta uma liberação baixa (cerca de 31%), sendo associada principalmente com caulinita-goethita. A variedade caulinita_Fe mostra uma liberação de apenas 35%, com suas partículas mistas ocorrendo principalmente com caulinita-goethita e, secundariamente, com as distintas variedades de gibbsita

4.2.3.3 Grupo 2A

As formas de associações das fases portadoras de Al_2O_3 entre livres e mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para o intervalo granulométrico considerado ($-0,42+0,037$ mm) são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de Al_2O_3 (em massa; fração $+0,037$ mm) - Grupo 2A

Associações das fases minerais	gibbsita	gibbsita 2-3	gibbsita 4	caulinita/ gibbsita	caulinita	caulinita-Fe	gibbsita + gibbs. 2-3
Massa (%)	22	18	48	5,0	tr	1,2	40
Livre (%)	75	73	87	87	54	53	83
Mista binárias (%)	17	17	9,9	8,4	14	18	13
Mista ternárias (%)	7,8	9,4	3,5	4,9	32	29	3,7
Detalhe binárias							
gibb	-	11	6,4	4,2	2,3	2,2	-
gibb_2-3	7,4	-	1,7	0,2	0,2	0,4	-
gibb_4	6,9	4,3	-	2,7	1,8	2,8	9,8
caulin-gibb	0,4	0,1	0,5	-	0,4	3,9	0,3
caulin					-	0,1	
caulin_Fe	0,4	0,1	0,2	0,7	2,4	-	0,3
caulin- goethita	0,6	0,7	0,3	0,3	4,5	5,6	0,8
ox-hid_Fe	1,2	1,2	0,3	0,1	0,9	1,1	1,8
quartzo					1,9	1,2	
min titânio	0,1		0,3	0,1			
zircão + sil.	0,1	0,2	0,3	0,1		0,8	0,1
Detalhe ternárias							
gibb	-	3,3	1,2	1,4	8,5	3,3	-
gibb_2-3	3,1	-	1,2	0,4	2,1	3,1	-
gibb_4	3,0	3,2	-	1,6	6,7	6,7	1,4
caulin-gibb	0,3	0,2	0,2	-	1,0	2,4	0,3
caulin					-	0,1	
caulin_Fe	0,3	0,2	0,3	0,8	3,1	-	0,3
caulin- goethita	0,5	1,1	0,4	0,4	6,4	8,5	0,8
ox-hid_Fe	0,5	1,4	0,3	0,2	1,8	4,2	0,9
quartzo					2,5	0,1	
min titânio							
zircão + sil.							

Livre = partículas com mais de 95% do mineral em questão

Pela distribuição das formas das associações das fases minerais verifica-se que as principais fases de gibbsita (gibbsita e gibbsita 2-3) apresentam cerca de 75% de suas partículas livres. Quando ocorrem em partículas mistas, estas são preferencialmente em associações com outra variedade de gibbsita e secundariamente com óxido de ferro.

Considerando-se o agrupamento da gibbsita + gibbsita 2-3 a parcela de partículas livres alcança 83%. As associações da gibbsita por fração granulométrica (Apêndice 4) não indicam incremento de liberação para as frações mais finas.

A liberação da caulinita-gibbsita é da ordem de 87% e suas partículas mistas referem-se principalmente a associações com as variedades de gibbsita. A caulinita é rara e apresenta uma liberação de 54%, sendo associada principalmente com as variedades de gibbsita e com a

caulinita-goethita. A variedade caulinita_Fe mostra uma liberação de 53%, com suas partículas mistas ocorrendo principalmente com a caulinita-goethita e com as variedades de gibbsita.

4.2.3.4 Grupo 2B

As formas de associações das fases portadoras de Al_2O_3 entre livres e mistas em partículas binárias (2 fases minerais) e ternárias (3 ou mais fases), para o intervalo granulométrico considerado ($-0,42+0,037$ mm) são apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de Al_2O_3 (em massa; fração $+0,037$ mm) - Grupo 2B

Associações das fases minerais	gibbsita	gibbsita 2-3	gibbsita 4	caulinita/ gibbsita	caulinita	caulinita-Fe	gibbsita + gibbs. 2-3
Massa (%)	36	22	20	4,0	tr	2,0	57
Livre (%)	71	57	62	64	9,4	30	85
Mista binárias (%)	20	35	28	24	23	34	12
Mista ternárias (%)	8,4	8,3	10	12	68	36	2,8
Detalhe binárias							
gibb	-	32	24	19	1,3	7,0	-
gibb_2-3	12	-	1,6	0,3	0,1	0,6	-
gibb_4	5,2	1,3	-	2,1	0,9	1,2	8,5
caulin-gibb	0,5	0,1	0,6	-	0,2	1,3	0,5
caulin			0,1		-	0,9	
caulin_Fe	0,4	0,4	0,6	2,0	3,9	-	0,6
caulin- goethita	0,6	0,5	0,2	0,3	16	21	0,8
ox-hid_Fe	1,1	0,6	0,3		0,8	1,9	1,4
quartzo					0,1	0,3	
min titânio	0,1	0,2					0,1
zircão + sil.	0,1	0,1	0,1	0,3			0,1
Detalhe ternárias							
gibb	-	4,2	5,2	4,2	2,5	5,1	-
gibb_2-3	3,1	-	2,8	1,0	0,5	2,1	-
gibb_4	2,9	2,4	-	3,3	4,1	3,9	0,8
caulin-gibb	0,4	0,2	0,7	-	0,6	2,5	0,3
caulin			0,1		-	1,0	
caulin_Fe	0,4	0,3	0,7	2,1	14	-	0,3
caulin- goethita	0,7	0,5	0,5	0,8	43	16	0,7
ox-hid_Fe	0,8	0,7	0,4	0,2	3,7	5,1	0,6
quartzo					0,1		
min titânio							
zircão + sil.							

Livre = partículas com mais de 95% do mineral em questão

Pela distribuição das formas das associações minerais verifica-se que as principais fases de gibbsita (gibbsita e gibbsita 2-3) apresentam cerca de 57 a 71% de suas partículas livres e que as partículas mistas referem-se, essencialmente, a associações com outras variedades de gibbsita na forma de partículas binárias.

Considerando-se o agrupamento da gibbsita + gibbsita 2-3 a parcela de partículas livres alcança 85%. As associações da gibbsita por fração granulométrica (Apêndice 4) não indicam incremento de liberação para as frações mais finas.

A liberação da caulinita-gibbsita é da ordem de 64% e suas partículas mistas referem-se principalmente a associações com as variedades de gibbsita. A caulinita é rara e apresenta uma liberação baixa (9,4%), sendo associada principalmente com caulinita-goethita. A variedade caulinita_Fe também apresenta uma liberação baixa, de cerca de 30%, com suas partículas mistas ocorrendo preferencialmente com a caulinita-goethita e, secundariamente, com as variedades de gibbsita.

4.2.4 Espectros de liberação das fases portadoras de alumina

O processamento das imagens digitais (MLA) permite determinar a distribuição do mineral de interesse segundo a sua fração em perímetro exposto (fração exposta do mineral no perímetro da partícula). As curvas de espectro de liberação para cada uma das variedades de gibbsita e para o agrupamento da gibbsita+gibbsita 2-3 (parcela do mineral exposta no perímetro de cada partícula) são expostas na Figura 4 e na Figura 5 e os resultados sumarizados na Tabela 17.

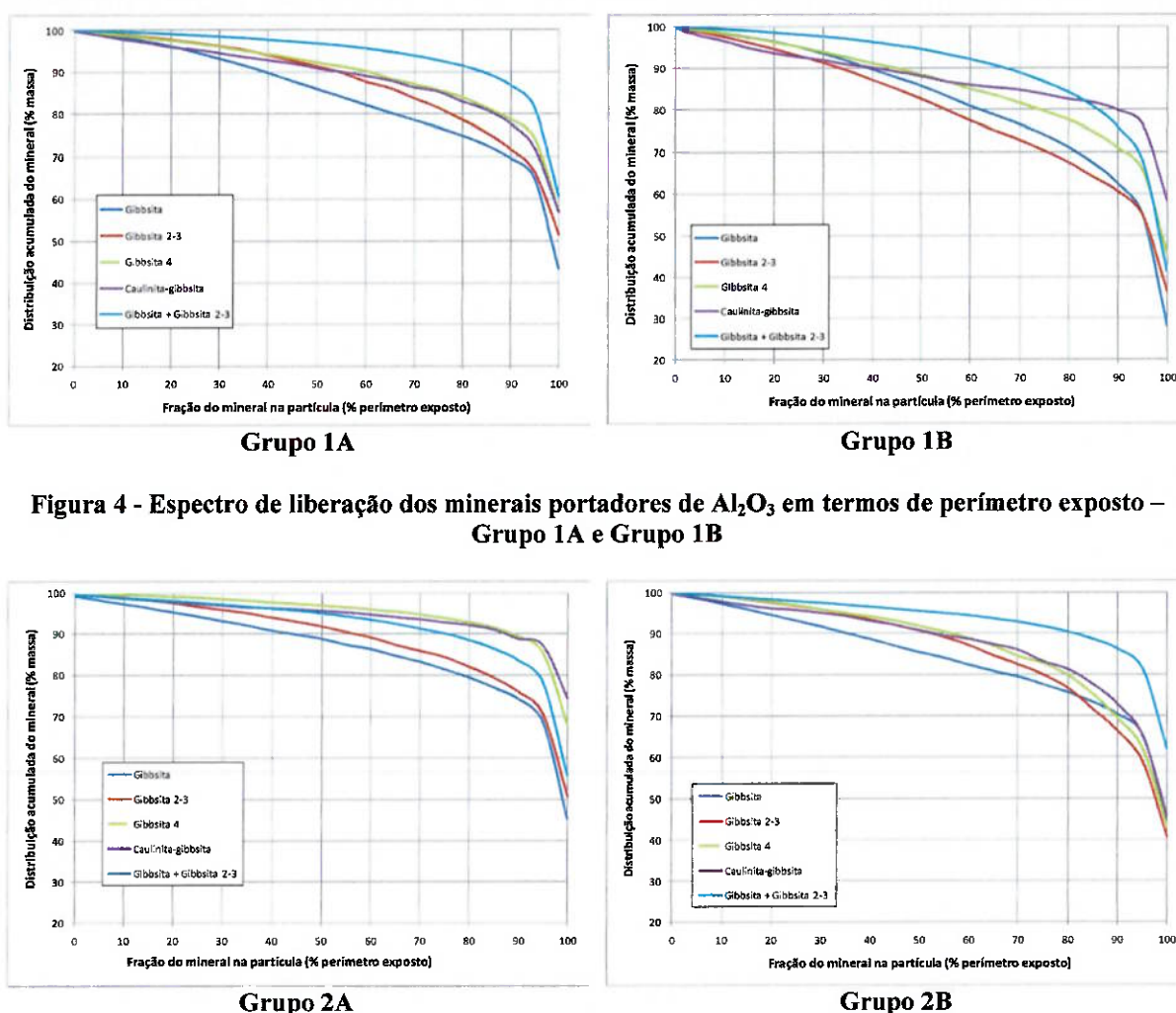


Figura 4 - Espectro de liberação dos minerais portadores de Al_2O_3 em termos de perímetro exposto – Grupo 1A e Grupo 1B

Figura 5 - Espectro de liberação dos minerais portadores de Al_2O_3 em termos de perímetro exposto – Grupo 2A e Grupo 2B

Tabela 17 - Liberação em perímetro para partículas com diferentes proporções de cada fase

Fração de cada fase nas partículas (%)	Grau de liberação (%) - Grupo 1A			Grau de liberação (%) - Grupo 1B		
	gibb+gibb 2-3	gibbsita 4	caul-gibb	gibb+gibb 2-3	gibbsita 4	caul-gibb
≥ 40	98	94	93	96	91	90
≥ 80	91	84	83	84	78	83
≥ 90	87	79	78	76	71	80
100	61	57	57	41	45	58
Fração de cada fase nas partículas (%)	Grau de liberação (%) - Grupo 2A			Grau de liberação (%) - Grupo 2B		
	gibb+gibb 2-3	gibbsita 4	caul-gibb	gibb+gibb 2-3	gibbsita 4	caul-gibb
≥ 40	96	98	96	96	94	93
≥ 80	88	93	92	90	80	81
≥ 90	84	89	89	86	69	73
100	56	68	74	62	43	46

As partículas que têm o agrupamento gibbsita+gibbsita2-3 como principal componente (>90%), apresentam uma liberação na faixa de 85% para os grupos 1A, 2A e 2B e de 76% para o grupo 1B. Já as partículas compostas principalmente por gibbsita4 a liberação é da ordem de 70% para os grupos 1B e 2B, 80% para o grupo 1A e 90% para o grupo 2A.

Estas são as fases mais importantes, já que a primeira concentra a maior parte da alumina aproveitável e a segunda a maior parte da sílica reativa, e como apresentam um grau de liberação alto, pode-se dizer que as duas fases não estão diretamente associadas. Dessa forma, , nos grupos 1A,1B e 2B os resultados de caracterização tecnológica indicam a possibilidade de que as fases sejam separadas mediante operações de cominuição e concentração; já que no grupo 2A, mesmo com alta liberação de todas as fases de gibbsita, tanto a alumina aproveitável quanto a sílica reativa concentram-se na fase gibbsita-4.

4.2.5 Recuperação de alumina aproveitável

As curvas de distribuição acumulada de alumina aproveitável versus teor de alumina aproveitável para as várias frações granulométricas e total -0,42+0,037 mm, obtidas a partir de imagens 2D do sistema MLA, são apresentadas na Figura 6.

De acordo com os gráficos apresentados verifica-se que com uma recuperação de 95% de alumina aproveitável na fração -0,42+0,037 mm tem-se um produto com teor de 57% para os grupos 1A e 1B e de 54% e 58% para os grupos 2A e 2B, respectivamente. Além disso, nota-se que não há um incremento de teores de Al_2O_3 aproveitável para um dado valor de recuperação acumulada (não se tem aumento da liberação da gibbsita para as frações mais finas).

Os resultados sugerem a possibilidade de uma etapa de concentração produzir um concentrado de bauxita nodular com alto teor de Al_2O_3 aproveitável (>52) aliado a elevadas recuperações metalúrgica (>90%), para frações granulométricas abaixo de 0,42 mm.

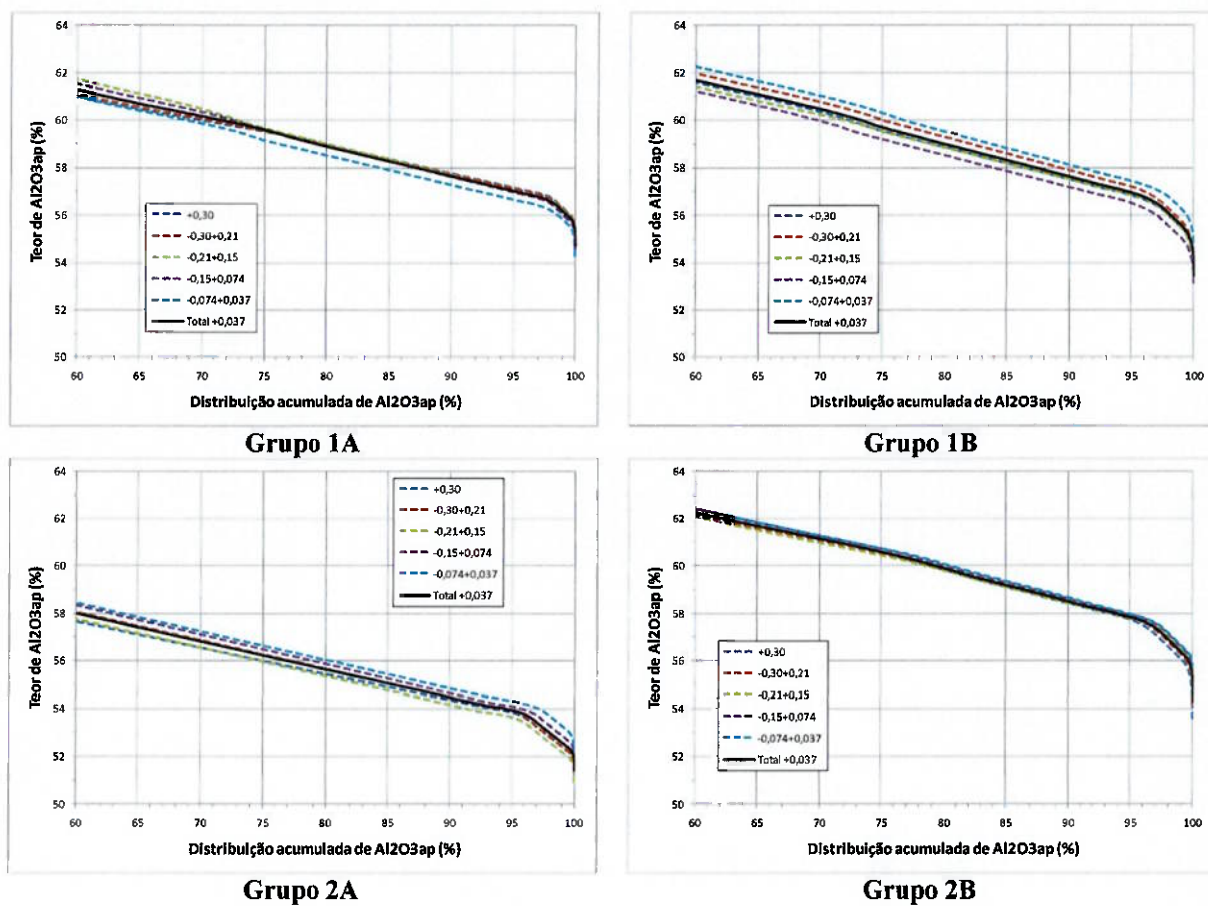


Figura 6 - Distribuição acumulada de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{ap}$ versus teor de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{ap}$ para frações granulométricas e total $-0,42+0,037$ mm

5 SUMÁRIO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise por agrupamento a partir dos difratogramas de raios X de todas as amostras estudadas (69 no total) resultou em seis grupos. Os grupos 1 e 2, constituídos basicamente por bauxita nodular com elevados teores de sílica reativa, foco deste estudo, foram subdivididos em subgrupos "A" e "B" em função dos teores de Fe_2O_3 . Estes dois grupos foram submetidos a caracterização por análise de imagens automatizada por MEV-MLA.

Análises químicas mostraram que os grupos 1 e 2 apresentam teores elevados de alumina aproveitável (de 43 a 50%), porém também apresentam teores elevados de sílica reativa (>5%). Quanto ao ferro, os subgrupos A possuem teores mais baixos, enquanto nos subgrupos B, eles chegam a 10%.

A análise granulométrica mostrou que na fração -0,020 mm há uma redução expressiva nos teores de alumina aproveitável e um enriquecimento marcante de sílica reativa. O material deslamado (total +0,020 mm) apresenta teores de 44 a 49% de alumina aproveitável e 4,5 a 5,9% de sílica reativa. Os óxidos de ferro não apresentam mudanças significativas de teores para o material deslamado.

Os grupos definidos são constituídos essencialmente por gibbsita, em suas diferentes associações denominadas: gibbsita, gibbsita-2-3 e gibbsita-4, conforme o teor de sílica associado. Secundariamente, tem-se caulinita-goethita, oxi-hidróxidos de ferro e caulinita-gibbsita, sendo os dois primeiros mais presentes nos subgrupos B, e o último no grupo 2A. Os outros minerais são minoritários, chegando no máximo a 2%.

Para os grupos 1A, 1B e 2B, a alumina aproveitável concentra-se principalmente no agrupamento gibbsita+gibbsita-2-3, enquanto que a sílica reativa está associada principalmente com a fase gibbsita-4. Já o óxido de ferro associa-se principalmente às fases caulinita-goethita e oxi-hidróxidos de ferro. O grupo 2A mostra características um pouco diferentes, já que concentra tanto a alumina aproveitável quanto a sílica reativa na fase gibbsita-4.

Quanto às associações, as partículas mistas das principais fases de gibbsita ocorrem principalmente com as diferentes fases de gibbsita. Caulinita-gibbsita se associa principalmente com as variedades de gibbsita. Já caulinita e caulinita-Fe se associam principalmente com caulinita-goethita e, secundariamente, com as variedades de gibbsita.

A liberação das partículas que são compostas majoritariamente (>90%) pelo agrupamento gibbsita+gibbsita-2-3 é da ordem de 85% para os grupos 1A, 2A e 2B e de 76% para o grupo 1B. Já as partículas com gibbsita-4 como o principal componente, a liberação é de cerca de 70% para os grupos 1B e 2B, 80% para o grupo 1A e 90% para o grupo 2A. Como estas duas fases apresentam grau de liberação altos, pode-se dizer que não estão diretamente associadas.

As curvas de Teor x Distribuição de Al_2O_3 apresentadas mostram que é possível obter uma recuperação de 95% de alumina aproveitável na fração -0,42 + 0,074 mm, com teores acima de 52%. Além disso, nota-se que não há incremento da liberação da gibbsita para as frações mais finas.

A bauxita nodular de Porto Trombetas não é lavrada devido aos seus altos teores de sílica reativa (>5%), mesmo apresentando teores de alumina aproveitável da faixa de 43% a 50%. A alumina aproveitável concentra-se no agrupamento gibbsita+gibbsita2-3, enquanto que a sílica reativa concentra-se na fase gibbsita-4, e ambas as fases apresentam altos graus de liberação, sendo fisicamente possível separá-las, com exceção do grupo 2A, no qual tanto alumina aproveitável quanto sílica reativa concentram-se na mesma fase.

Dessa forma, a caracterização das associações mineralógicas da bauxita nodular de Porto Trombetas indica a possibilidade de aproveitamento desse tipo litológico, para os grupos 1A, 1B e 2B, devendo serem realizados estudos complementares de flotação para efetiva avaliação das possibilidades de obtenção de concentrados de bauxita com baixos teores de sílica reativa.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIASSI, J.L. **A difração de raios X com o método de Rietveld aplicada a bauxitas de Porto Trombetas, PA.** 2010. 102 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

Associação Brasileira do Alumínio. **Anuário estatístico 2006.** ABAL, 2006.

BIONDI, J.C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros.** São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

CHAVES, A.P.; MASSOLA, C.P.; ANDRADE, C.F.; ABREU, C.A.V. **The practice of bauxite ores processing**, XXII Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa – Volume I. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p.187-192. 2007

DNPM. **Sumário Mineral 2009 – Alumínio.** Disponível em: https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4544. Acesso em 19/09/2010.

FANDRICH, R.; GU, Y.; BURROWS, D.; MOELLER, K. **Modern SEM-Based mineral liberation analysis.** International Journal of Mineral Processing, v. 84, n. 1-4, p. 310-320, 2007.

FORMOSO, M. L. L. Difractometria de raios X. In: FORMOSO, M. L. L. et al. **Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia.** São Paulo: Edgard Blücher / Próminério, 1984. p. 1-43.

HILL, V. G.; SEHNKE, E. D. Bauxite. In Klogal, J. [et al.]. **Industrial Mineral & Rocks: Commodities, Markets and Uses.** Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, 2006. p. 227-262.

RAMOS, C.R. **Perfil analítico do alumínio.** Brasília: Departamento nacional da Produção Mineral, Boletim nº55, 152p. 1982.

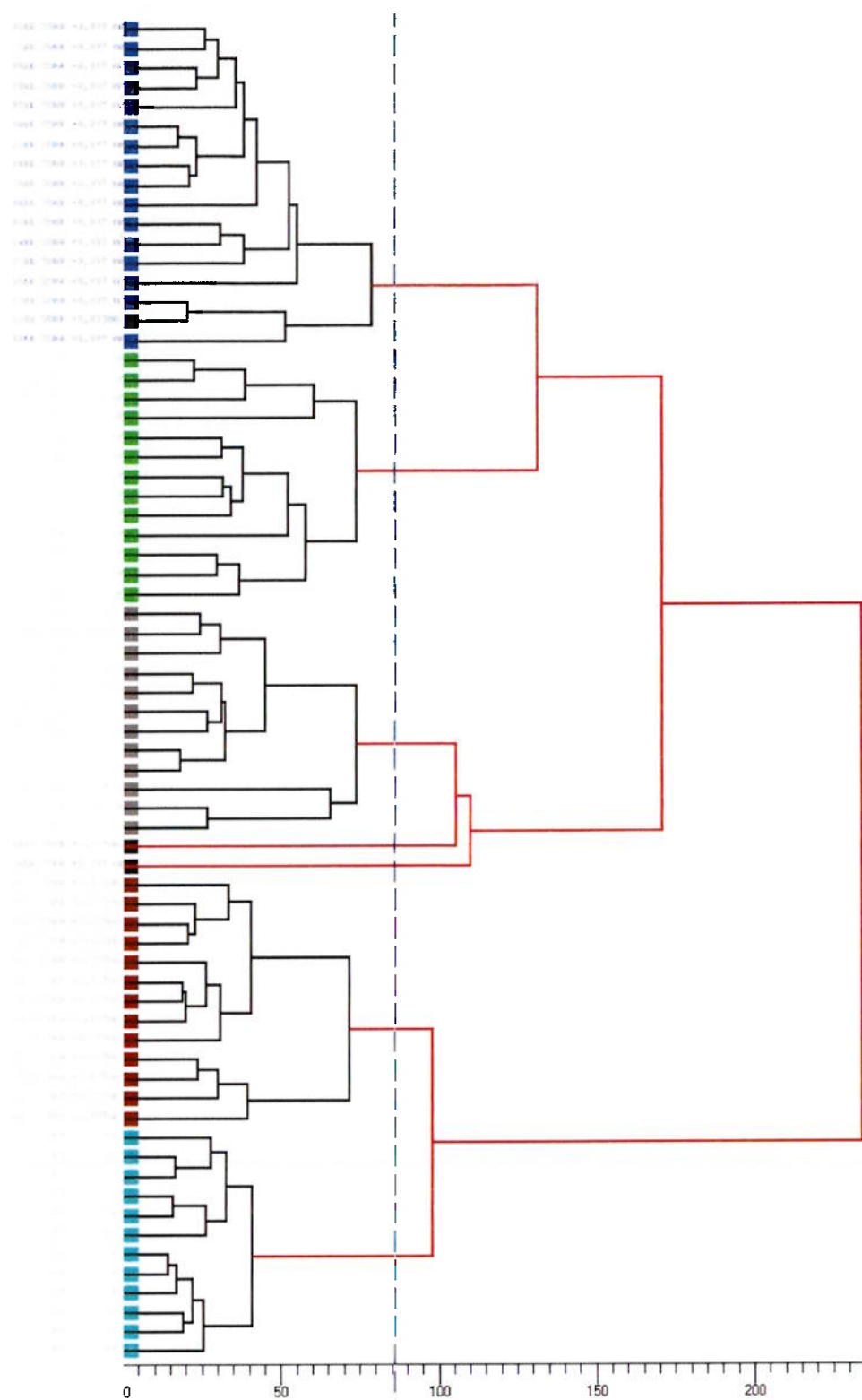
SHIMIZU, V.K. **Definição e caracterização de tipos de minério da mina do Sossego, região de Carajás.** 2009. 48 p. Monografia (Trabalho de Formatura) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

APÊNDICE 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO BANCO DE DADOS USADO

Composição química média de cada mineral considerado no banco de dados para análise de imagens automatizada (MLA)

Mineral / variedade	massa específica	Teores (%)													
		Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ AP	CaO	Fe ₂ O ₃	FeO	H ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	Nb ₂ O ₅	SiO ₂	SiO ₂ RE	TiO ₂	ZrO ₂
gibbsita															
gibbsita	2,34	0,19	65,0		0,09	34,4							0,22	0,05	
gibb_Si1	2,35	2,77	59,2		1,35	32,0							3,18	1,57	
gibb_2-3															
gibb_Si2	2,36	3,80	55,8		4,00	30,0							4,36	2,00	
gibb_Si3	2,39	5,92	53,7		1,88	29,1						0,80	6,80	1,87	
gibb_Si4	2,43	7,84	48,9		2,26	28,0						2,50	9,00	1,50	
caulinita-gibbsit (gibb 5)	2,48	17,4	30,0		3,54	21,9						4,00	20,0	3,15	
caulinita	2,60	37,9			4,80	13,8							43,5		
caulinita_Fe															
caulinita_FeTi	2,70	32,6			11,9	12,8							37,6	5,14	
caulinita_TiFe	2,60	34,6			7,22	12,9							39,4	5,92	
caulinita_Fe	2,80	29,2			22,7	12,8							34,0	1,28	
caulinita-goethita	2,90	21,9			51,0	12,0						4,00	10,0	1,08	
Ox_Fe															
ox_Fe	4,70	2,00			90,0	8,00									
ox_FeAl	4,00	7,83			71,3	10,8						5,23	4,00	0,88	
quartzo	2,65											100,0			
min titânio															
anatásio	3,90										3,80			96,2	
ilmenorutilo	4,50				26,1				2,47					71,4	
zircão + outros silicatos															
zircão	4,70											32,8			67,2
mica	3,00	11,8				8,29	3,64	10,9	23,2			42,2			
Diopsídio	3,40			25,9					18,6			55,5			

APÊNDICE 2 - ANÁLISE POR AGRUPAMENTO

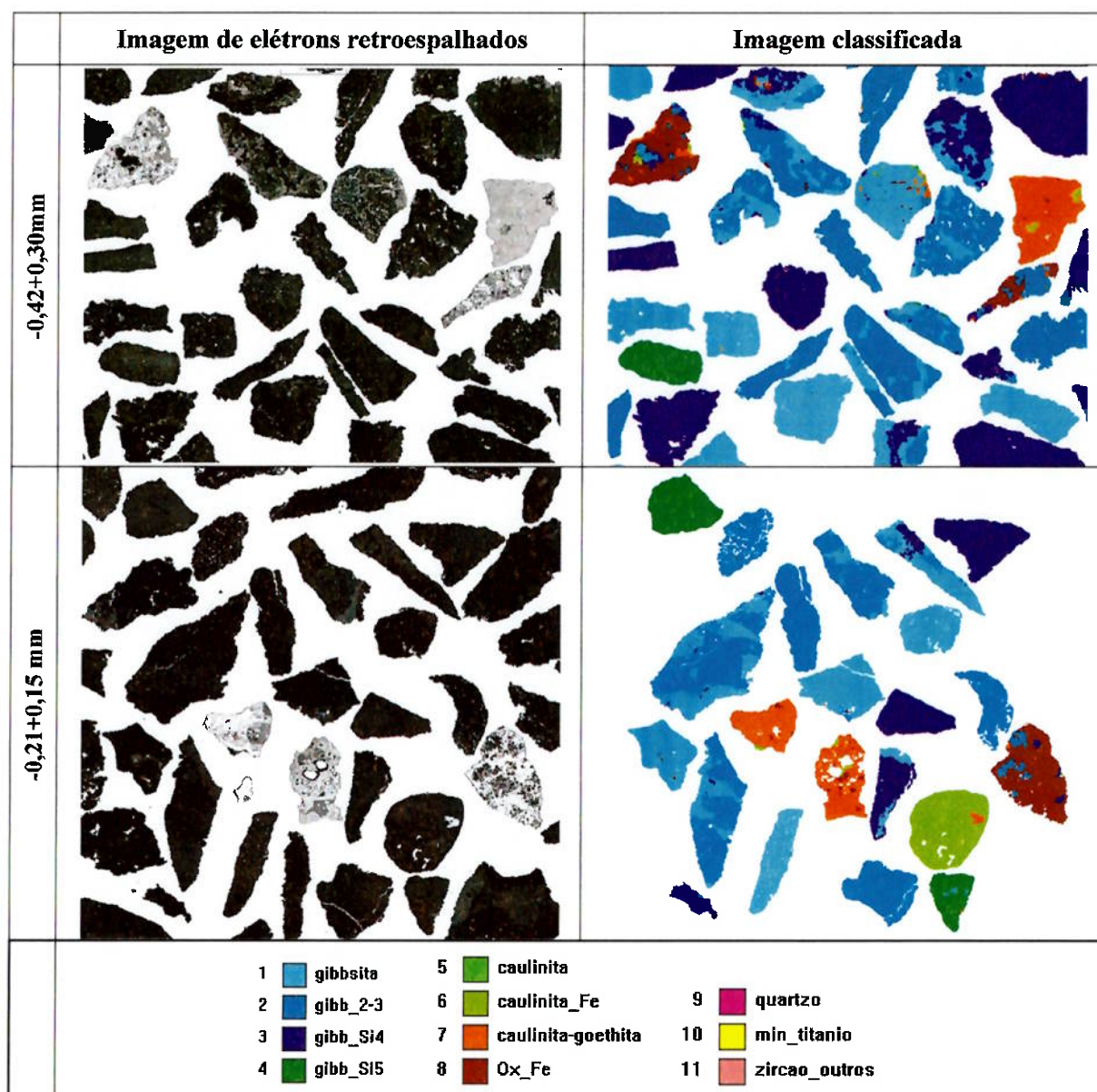


Dendograma da análise por agrupamento, fração +0,037mm

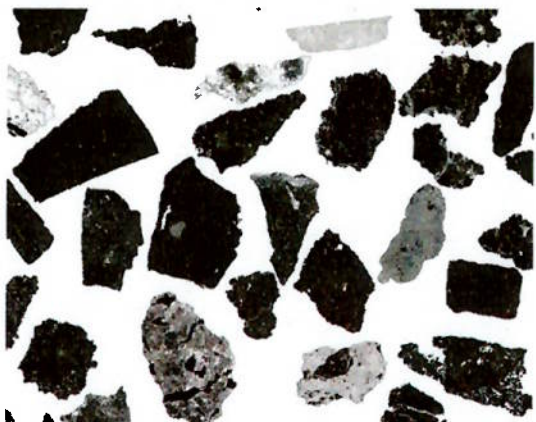
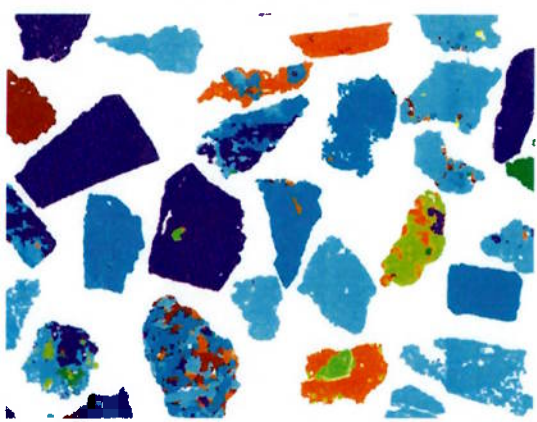
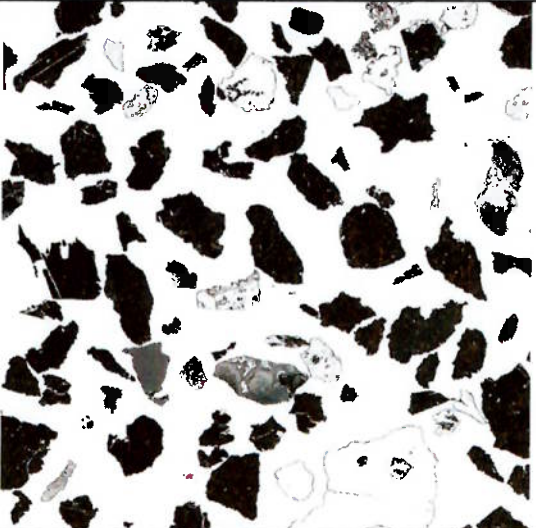
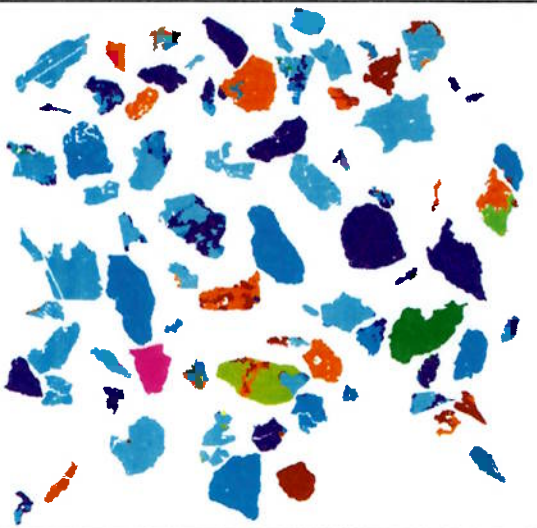
Relação das Amostras constituintes de cada grupo

Grupo 1A	Grupo 1B	Grupo 2A	Grupo 2B	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
PK-17-BX	PK-01-ND	PK-13-ND	PK-19-ND	PK-18-BX	PK-24-BX	PK-25-BX	PK-05-LT
PK-21-BX	PK-02-ND	PK-16-ND	PK-23-ND	PK-19-BX	PK-28-ND	PK-01-LT	PK-06-LT
PK-04-ND	PK-05-ND	PK-17-ND	PK-24-ND	PK-20-BX		PK-02-LT	PK-09-LT
PK-09-ND	PK-06-ND	PK-20-ND	PK-25-ND	PK-22-BX		PK-04-LT	PK-12-LT
PK-10-ND	PK-07-ND	PK-21-ND	PK-26-ND	PK-23-BX		PK-07-LT	PK-15-LT
PK-11-ND	PK-08-ND		PK-27-ND	PK-26-BX		PK-08-LT	PK-18-LT
PK-15-ND	PK-12-ND		PK-29-ND	PK-27-BX		PK-10-LT	PK-19-LT
PK-18-ND	PK-14-ND		PK-30-ND	PK-28-BX		PK-11-LT	PK-20-LT
	PK-22-ND			PK-29-BX		PK-14-LT	PK-22-LT
				PK-30-BX		PK-24-LT	PK-23-LT
				PK-03-LT		PK-26-LT	PK-27-LT
				PK-03-ND		PK-30-LT	PK-28-LT
							PK-29-LT
ND	ND	ND	ND	BX	BX	LT	LT

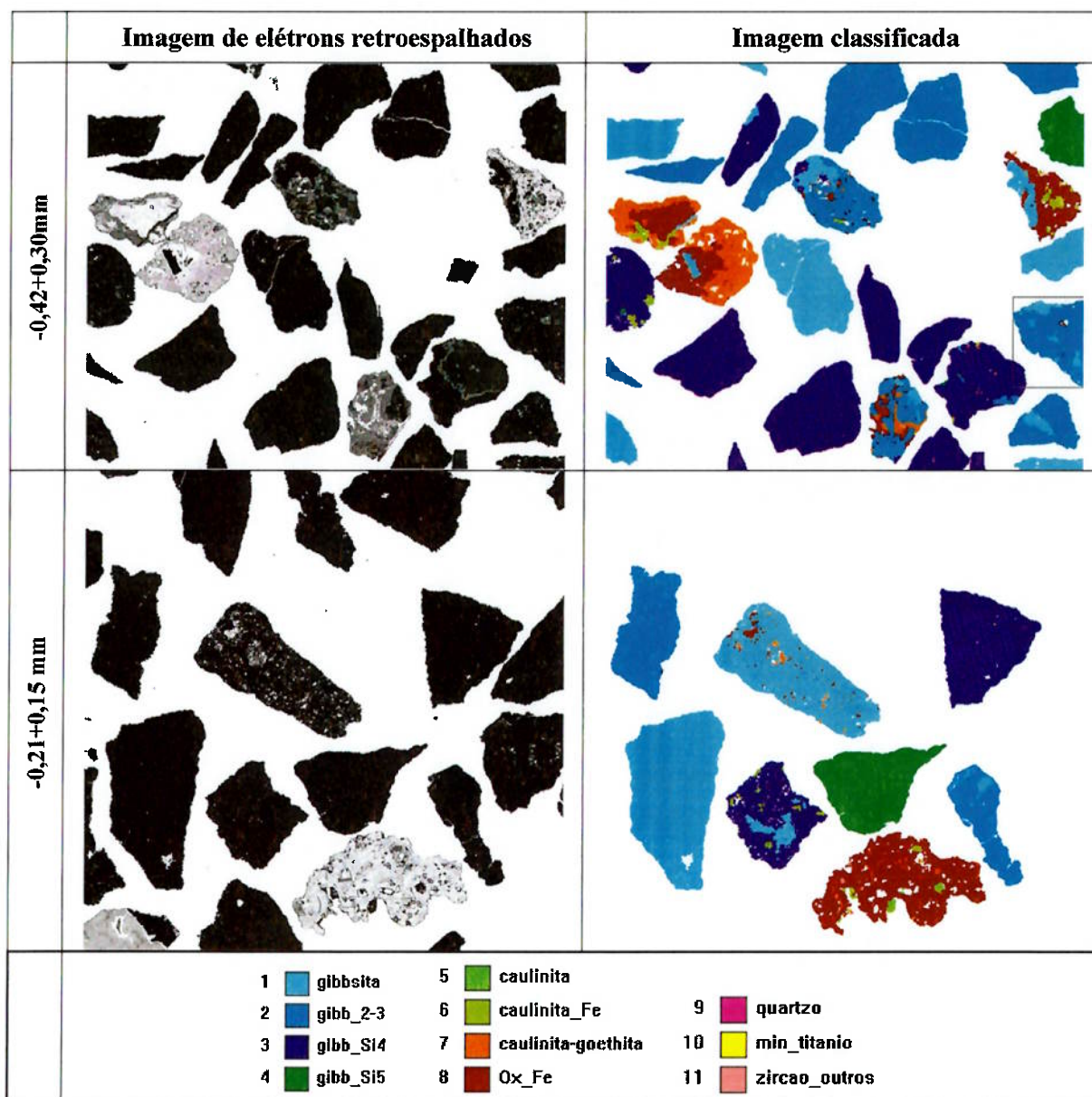
APÊNDICE 3 - PRINCIPAIS FEIÇÕES DE ASSOCIAÇÕES MINERAIS



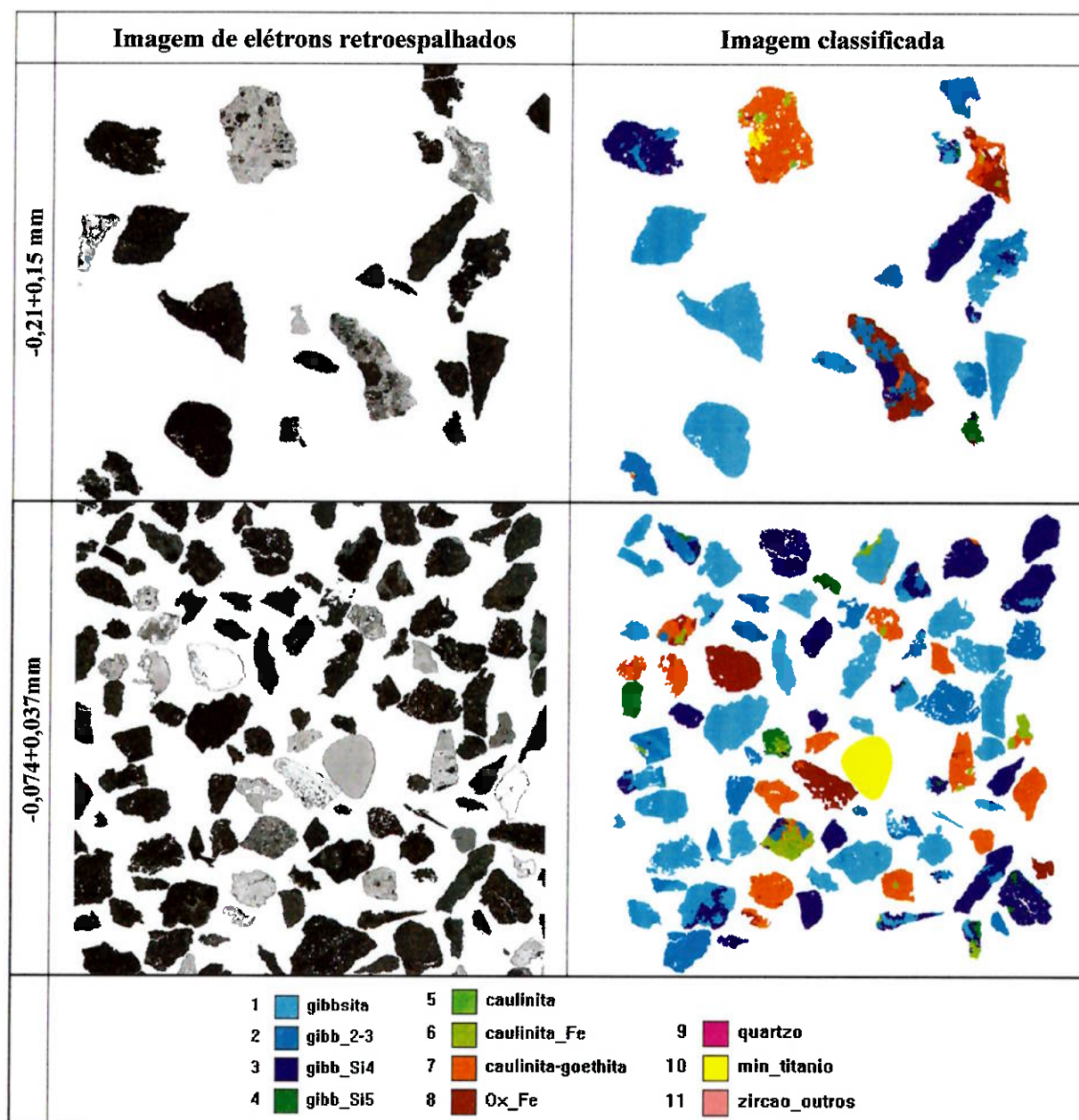
Principais feições de associações minerais observadas - Grupo 1A

	Imagem de elétrons retroespalhados	Imagem classificada
-0,42+0,30mm		
-0,074+0,037mm		
	1  gibbsita 2  gibb_2-3 3  gibb_Si4 4  gibb_Si5 5  caulinita 6  caulinita_Fe 7  caulinita-goethita 8  Ox_Fe 9  quartzo 10  min_titanio 11  zircao_outros	

Principais feições de associações minerais observadas - Grupo 1B

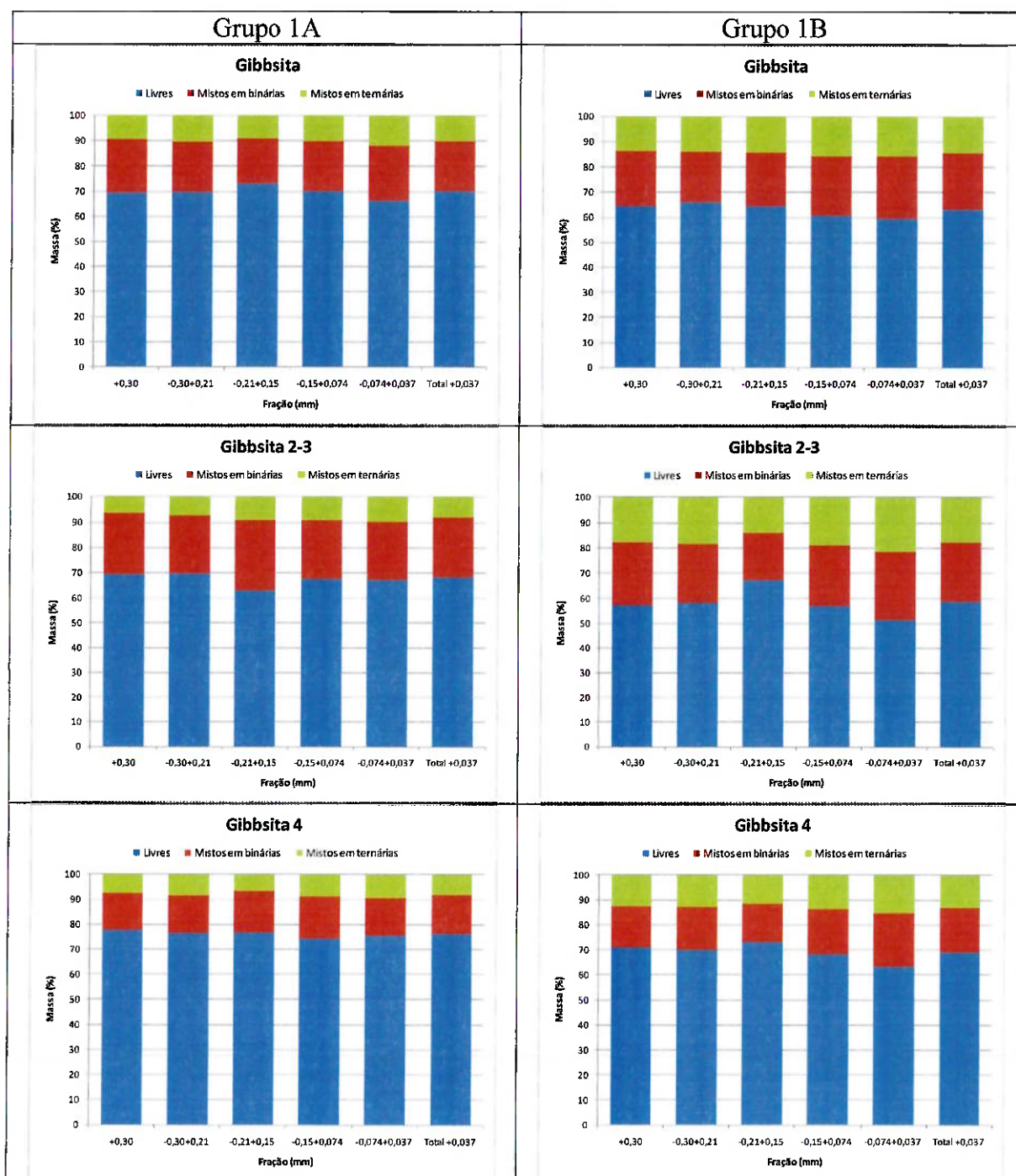


Principais feições de associações minerais observadas - Grupo 2A

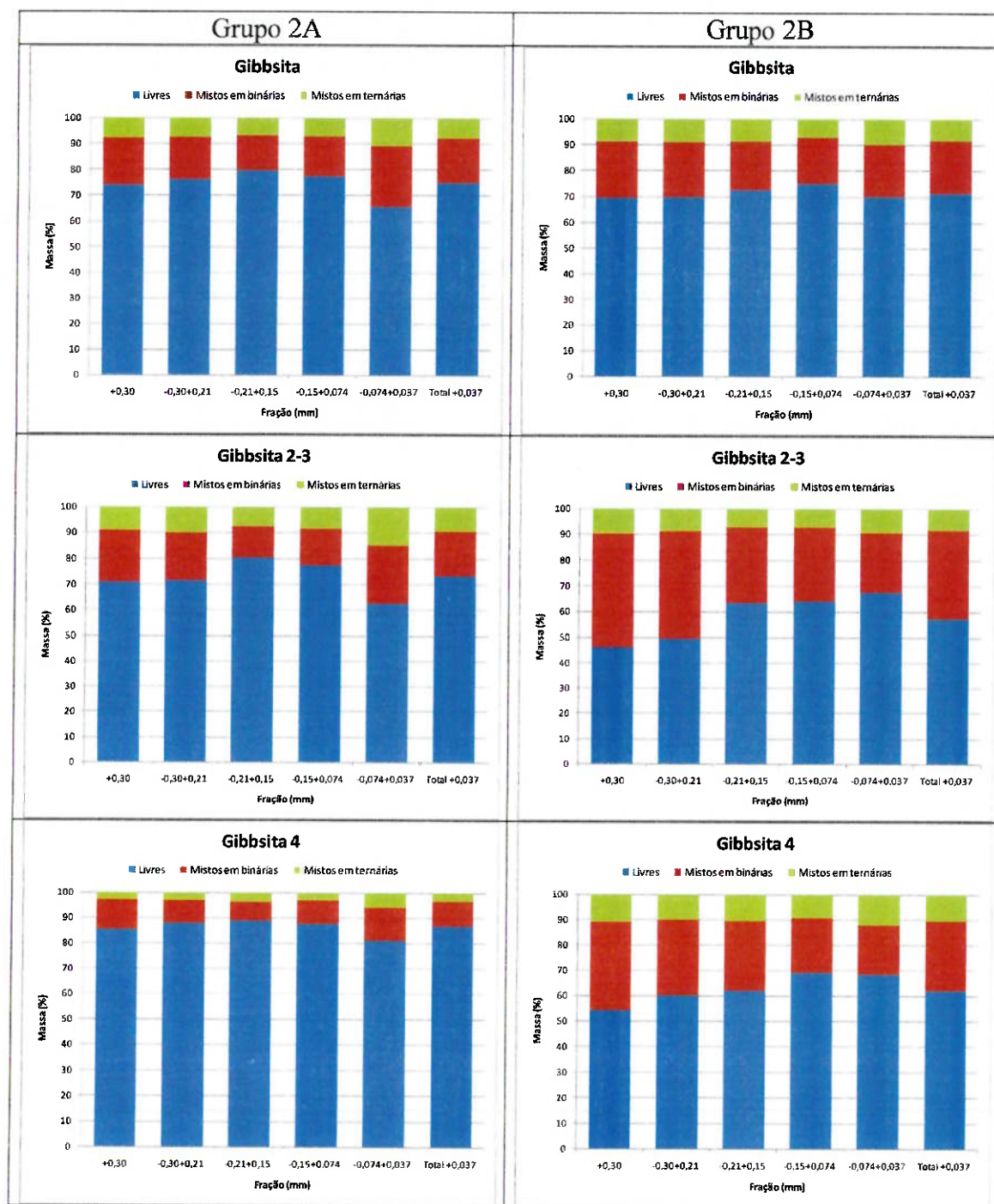


Principais feições de associações minerais observadas - Grupo 2B

APÊNDICE 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS FORMAS DE ASSOCIAÇÃO DOS MINERAIS PORTADORES DE ALUMINA APROVEITÁVEL



Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de alumina aproveitável - Grupo 1A e 1B



Distribuição das formas de associação dos minerais portadores de alumina aproveitável - Grupo 2A e 2B