

JAIME IJICHI MACHADO

10
10

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAUXITA NODULAR DE
PORTO TROMBETAS, PA – MINERAÇÃO RIO DO NORTE**

EPMI
TF-2009
M18c

SÃO PAULO
2009

JAIME IJICHI MACHADO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAUXITA NODULAR DE
PORTO TROMBETAS, PA – MINERAÇÃO RIO DO NORTE**

SÃO PAULO
2009

JAIME IJICHI MACHADO

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAUXITA NODULAR DE
PORTO TROMBETAS, PA – MINERAÇÃO RIO DO NORTE**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Engenheiro de Minas

Orientador:
Prof. Dr. Henrique Kahn

SÃO PAULO
2009

FICHA CATALOGRÁFICA

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Machado, Jaime Ijichi
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAUXITA NODULAR
DE PORTO TROMBETAS, PA – MINERAÇÃO RIO DO NORTE
São Paulo, 2009.

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica/USP

Orientador: Kahn, Henrique

TF-2009
M18c
Lyons 182 294C

ATLANTICA / ATLANTICA

UNIVERSAL DEPT. F.
FMS DE ESTUDOS F.

ESTR.

CONVENCION
FONTE

ABTO
DO

M20096

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005908

AGRADECIMENTOS

Impossível começar a escrever este trabalho sem agradecer ao Prof. Dr. Henrique Kahn. É espantoso observar o tempo dedicado aos alunos orientados por ele: dias, noites, sábados e domingos foram dedicados à elaboração deste trabalho, e sempre com o total apoio do Professor. Dedicção esta comparável a um pai ensinando o filho a andar de bicicleta.

É possível dizer o mesmo da M.Sc. Carina Ulsen. Realizar e gerenciar o projeto de caracterização tecnológica de quase 7 toneladas de minério seria impossível sem a ajuda dela, principalmente durante o período de aulas.

Agradeço também o companheiro de projeto Caio Santos, sem o qual a execução do projeto seria muito menos divertida.

Aos funcionários do Laboratório de Caracterização Tecnológica, em especial àqueles que atuaram diretamente no projeto: Os técnicos de laboratório Edvaldo Pinto Braga, Erilio Santos Soares, Juscelino Santana Rocha, Ailton S. de Azevedo, e em especial Carlos José do Nascimento, que nos ensinou praticamente tudo em relação às técnicas de laboratório. Os mestrandos Daniel Uliana pelas tardes divertidas na separação magnética, e Juliana Livi Antoniassi por ter pacientemente ensinado a respeito da difração.

Aos colegas da Geologia e da Poli que trabalharam neste projeto conosco, Gustav Hawlitschek, Lucas Daniel Bruson, Rafael França, Renato Augusto Tenguan Higa, Viviane Kotani Shimizu, e especialmente Renata Pereira Martins Gomes pela grande ajuda com relação aos dados de microscopia eletrônica.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus pais por terem me sustentado durante os 5 longos anos de Escola Politécnica.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAUXITA NODULAR DE PORTO TROMBETAS, PA – MINERAÇÃO RIO DO NORTE

Jaime Ijichi Machado
jaimemachado1986@yahoo.com.br

RESUMO

A Mineração Rio do Norte, localizada ao norte do estado brasileiro do Pará, atualmente explora somente o horizonte de bauxita maciça dos depósitos lateríticos de Porto Trombetas. Dois outros horizontes, a bauxita nodular e a laterita, são considerados estéril devido, respectivamente, aos teores de sílica reativa e ferro-associado.

Neste trabalho são apresentados os estudos de caracterização tecnológica da bauxita nodular com o objetivo de avaliar a composição química e mineralógica de amostra de bauxita nodular de Porto Trombetas, bem como os teores e recuperações de alumina aproveitável, sílica reativa e óxido de ferro nos produtos de separações minerais realizadas. Para tanto, foram estudadas 30 amostras de aproximadamente 100 kg através da análise granuloquímica, separação de minerais (separação em líquidos densos e separações magnéticas em alta intensidade de campo) e definição de composição e associações mineralógicas.

Os resultados demonstraram que as separações empregadas não foram eficazes na separação da alumina aproveitável da sílica reativa. Através de imagens geradas no microscópio eletrônico de varredura, concluiu-se que, nas frações mais grossas, a gibbsita e a caulinita encontram-se intimamente associadas, enquanto que nas frações mais finas, observa-se maior grau de liberação entre estas.

PALAVRAS-CHAVE: Bauxita nodular, Porto Trombetas, caracterização tecnológica, alumínio.

ABSTRACT

Mineração Rio do Norte, located in the North side of Pará State, Brazil, extracts only the bauxitic layer from the lateritic deposit formation of Porto Trombetas. The other two layers, nodular bauxite and ferruginous nodule (*laterita*), are not considered ore, due to high concentration of reactive silica and iron oxide, respectively.

This paper presents the technological characterization studies about Porto Trombetas nodular bauxite in order to evaluate the chemical and mineralogical composition, as well as grades and recovery of recoverable alumina, reactive silica and iron oxide of the mineral separation products. To do that, 30 samples of nearly 100 kg were processed using mineral gradation and separation (heavy media separation and wet high intensity magnetic separation), mineral composition and association.

The analysis of the results shows that the separations were not profitable at recoverable alumina and reactive silica segregation. Images generated by the Scanning Electron Microscope shows that reactive silica and the recoverable alumina are intimately connected regarding coarse particles, and a bigger amount of free particles in the finer fraction.

KEY-WORDS: Nodular bauxite, Porto Trombetas, process mineralogy, aluminum.

SUMÁRIO

	pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1 O alumínio.....	1
2.2 Bauxita.....	2
2.2.1 Depósitos de bauxita.....	2
2.2.2 Bauxita de Porto Trombetas.....	2
2.3 Lavra e beneficiamento de bauxita.....	3
2.3.1 Bauxita da Mineração Rio do Norte (MRN).....	4
2.4 Metalurgia do alumínio.....	4
2.4.1 Processo Bayer.....	5
2.5 Oferta mundial de alumínio - 2007.....	5
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
3.1 Amostras.....	6
3.2 Procedimento experimental.....	6
3.3 Procedimentos analíticos.....	7
4 RESULTADOS.....	7
4.1 Composição mineralógica e agrupamento de amostras.....	7
4.2 Composição química.....	9
4.3 Análise granuloquímica.....	10
4.4 Separação em líquidos densos – fração -6,35+0,037 mm.....	11
4.5 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS) – fração -1,68 +0,105 mm.....	11
4.6 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS) – fração -0,60 +0,037 mm.....	12
4.7 Estudos com a fração de grossos moídos.....	12
4.7.1 Separação em líquidos densos.....	12
4.7.2 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS).....	13
4.8 Discussão de resultados.....	13
4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	13
5 CONCLUSÕES.....	15
6 REFERÊNCIAS.....	16

ANEXOS:

ANEXO 1 – Composição química das amostras de bauxite nodular

ANEXO 2 – Teores, distribuição de massa de alumina aproveitável e sílica reativa para o material retido em 0,037 mm.

ANEXO 3 – Histogramas representativos dos teores de alumina aproveitável, sílica reativa e Fe₂O₃ por fração granulométrica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção geológica-tipo dos depósitos de bauxita de Porto Trombetas (Biondi, 2003).....	pág 3
Figura 2 – Operações envolvidas na extração e processamento de bauxita da MRN (MRN, op. cit.).....	4
Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental.....	6
Figura 4 – Dendrogramas da análise por agrupamento de difração de raios X das amostras tal qual e da fração +0,037 mm	8
Figura 5 – Difrátogramas comparativos das amostras representativas de cada grupo, amostras tal qual e fração +0,037 mm	9
Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura das frações -3,36+1,68 e -0,60+0,105.....	14
Figura 7 – Microanálises químicas por EDS em agregados de gibbsita das frações -3,36+1,68 mm e -0,60+0,105 mm (Gomes, 2009).....	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reservas e produção mundial de bauxita.....	pág 5
Tabela 2 – Composição química média dos agrupamentos obtidos das amostras TQ e +0,037 mm.....	10
Tabela 3 – Granuloquímica das amostras representativas de cada cluster da fração +0,037 mm.....	10
Tabela 4 – Teores e distribuição do produto flutuado, fração -6,35+0,037 mm, para cada classe do agrupamento.....	11
Tabela 5 – Teores e distribuição do produto não-magnético do WHIMS, fração -1,68+0,105 mm, para cada classe do agrupamento.....	11
Tabela 6 – Teores e distribuição do produto não magnético do WHIMS, fração -0,60+0,037 mm, para cada classe do agrupamento.....	12
Tabela 7 – Teores e distribuição do produto flutuado, fração grosso moído, para cada classe do agrupamento.....	12
Tabela 8 – Teores e distribuição do produto não magnético do WHIMS, produto grosso moído, para cada classe do agrupamento	13
Tabela 9 – Valores médios dos produtos obtidos nos distintos ensaios de separações minerais	13

1 INTRODUÇÃO

A bauxita foi descoberta em 1821 na região francesa de *Les Baux*. Este material continha 52% de alumina, 27% de óxido de ferro e 20% de água combinada (Ramos, 1982). No entanto, não havia aplicação prática para este material, gerado a partir do enriquecimento combinado de alumínio, ferro e titânio devido à lixiviação do potássio, sódio, silício e outros minerais solúveis das rochas fonte durante o processo de laterização (Hutchison, 1983). Isto pois não havia processo economicamente viável para a redução do óxido de alumínio encontrado na bauxita ao alumínio metálico.

Somente após a desenvolvimento do processo Bayer, por Karl Josef Bayer em 1888, e do processo Hall-Heroult, por Charles Martin Hall e Paul T. Heroult em 1886, que foi possível a produção de alumínio metálico em escala industrial. O processo Bayer produz a alumina a partir da lixiviação da bauxita em soda cáustica. Esta lixiviação apresenta restrições em relação ao teor de argilominerais (sílica reativa), pois a soda também é consumida por esses. Portanto, quanto maior o teor de argilominerais na bauxita, maior o consumo de soda e maior o custo de produção. O processo Hall-Heroult, por sua vez, produz o alumínio a partir da eletrólise da alumina

Na Mineração Rio do Norte (MRN), localizada na formação Porto Trombetas no Estado do Pará, existem três subhorizontes na camada bauxítica: bauxita nodular, laterita ferruginosa e bauxita maciça. Somente a bauxita maciça é explotada por apresentar teores adequados de alumina aproveitável e sílica reativa.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a composição química e mineralógica de amostras de bauxita nodular de Porto Trombetas, bem como os teores e recuperações de alumina aproveitável, sílica reativa e ferro nos produtos de separações minerais realizadas (separações em líquidos densos e separações magnéticas em alta intensidade de campo).

Amostras da bauxita nodular de platôs que não estão atualmente em exploração foram coletadas pela equipe da Mineração Rio do Norte e encaminhadas para o Laboratório de Caracterização Tecnológica. No total, foram enviadas 30 amostras de aproximadamente 100 kg cada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O alumínio

Segundo Ramos (1982), o alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre (8,1%), porém sua extração somente atingiu a escala comercial no final do século XIX. Isso porque o alumínio não ocorre naturalmente na forma metálica, mas sim em combinação com outros elementos, particularmente o oxigênio, formando a alumina. A redução do óxido para metal exige grande quantidade de eletricidade, razão pela qual o processo só se popularizou com a construção das grandes usinas hidroelétricas, como a de *Niagara Falls* em 1895.

O alumínio metálico foi isolado pela primeira vez em 1825 e levado a público em 1855, em uma exposição em Paris. Até sua produção em grande escala, o metal era considerado semiprecioso e mais valioso que o ouro. Em muitas ocasiões, Napoleão III, grande patrocinador das pesquisas do então novo metal, utilizava talheres de alumínio enquanto seus convidados utilizavam talheres de prata. Em 1884, para coroar o Grande Obelisco de Washington, uma pirâmide de 30 quilos de alumínio foi construída e exposta na vitrine da joalheria *Tiffany's*, em Nova York.

Hoje em dia, o alumínio deixou de ser uma curiosidade da nobreza. Suas características intrínsecas de leveza e resistência a corrosão tornaram o metal um material essencial da civilização moderna. Menos de 50 toneladas do metal foram produzidas até 1885, enquanto que somente no ano de 2007 a produção mundial atingiu 38 milhões de toneladas de alumínio metálico.

Entre seus usos, podem se destacar: (Ramos, op. cit.)

- **Aplicações elétricas:** o alumínio tem substituído o cobre em linhas de transmissão de eletricidade de alta voltagem devido à eficiência elétrica, combinada com a leveza do metal, permitindo um espaçamento maior entre as torres. Mesmo considerando que o alumínio tem 60% da condutibilidade do cobre, um fio de alumínio pesa menos que a metade de um fio de cobre de mesma condutibilidade.
- **Transportes:** a utilização do alumínio como um substituto do aço na construção de automóveis e outros meios de transporte permite diminuição de peso e, conseqüentemente, redução no consumo de combustível.
- **Indústria da construção:** a utilização do alumínio tanto na estrutura quanto no acabamento de edificações é justificada pela leveza e alta resistência a corrosão.

- **Embalagens:** alumínio compete com o aço, vidro, papel e plásticos. Sua competitividade está na espessura da embalagem, com redução muito grande no consumo de material por embalagem. Além disso, têm-se menor pressão por parte de órgãos ambientais, pois são facilmente recicladas.
- **Bens de consumo duráveis:** o alumínio apresenta numerosas aplicações neste segmento. Eletrodomésticos e eletrônicos vêm incorporando o alumínio tanto na parte estrutural quanto na parte estética devido a suas propriedades físicas.

2.2 Bauxita

Segundo Hutchinson (1983) a bauxita é a principal matéria prima utilizada na indústria de alumínio e é formada pelo intemperismo de rochas aluminosas, que mobiliza minerais, elementos e substâncias químicas (Biondi, 2003). As transformações pelas quais passam as rochas podem levar a concentração residual de certos elementos, gerando depósitos minerais.

2.2.1 Depósitos de bauxita

O processo de intemperismo varia conforme o meio no qual se desenvolve (tipo e composição da rocha, clima, vegetação e relevo), assim como os seus produtos (Biondi, op. cit.). Ambientes de clima tropical com épocas de chuva e seca concentradas em períodos separados são propícios para intemperismo físico-químico avançado e, conseqüente, geração de depósitos lateríticos, dentre os quais se incluem os de bauxita.

As bauxitas são caracterizadas pelo enriquecimento combinado de alumínio e ferro devido à lixiviação do potássio, sódio, cálcio, magnésio e silício das rochas fonte (Hutchison, op. cit.). Bauxitas de alto teor geralmente apresentam de 40 a 50% de Al_2O_3 e de 10 a 24% de Fe_2O_3 .

Mais de 170 minerais foram identificados nas bauxitas, mas somente 10 ocorrem em quantidades significativas: gibbsita, boehmita, diasporo, corindon, goethita, hematita, caulinita, haloisita, anastásio e rutilo. Gibbsita é o principal mineral de alumínio (Hutchison, op. cit.) e a caulinita é a principal responsável pela sílica reativa.

Segundo Biondi (op. cit.), existem dois tipos principais de depósitos de bauxita:

- **Depósitos derivados de rochas alumino-silicatadas (*laterite type bauxite*):** os mais comuns. Quando as bauxitas se desenvolvem sobre rochas desprovidas de ferro, a duricrosta é aluminosa ou pisolítica. Quando se formam sobre rochas ricas em ferro, forma-se uma duricrosta ferruginosa na superfície, que se superpõe à duricrosta aluminosa. Em ambos os casos, os depósitos são estratificados, com superfícies planas e contatos inferiores muito irregulares e gradacionais.
- **Depósitos derivados de rochas carbonatadas (*karst type bauxite*):** as rochas carbonatadas formam depósitos de bauxita devido à facilidade que os carbonatos são lixiviados, concentrando o alumínio residualmente.

2.2.2 Bauxita de Porto Trombetas

Segundo o trabalho de Boulangé & Carvalho (1997), os depósitos de Porto Trombetas foram descobertos na década de 50 no município de Oriximiná, nas proximidades da margem do Rio Trombetas e a cerca de 900 km a oeste da cidade de Belém, Estado do Pará, Brasil.

Porto Trombetas, assim como os depósitos de Paragominas, Nhamundá e Almerin-Mazagão, é derivado do intemperismo de rochas alumino-silicatadas (Biondi, op. cit.) que ocorrem em uma faixa que margeia as rochas proterozóicas do norte do Brasil, das Guianas e da Venezuela. Todos têm perfis de alteração semelhantes, desenvolvidas a partir de rochas sedimentares argilo-arenosas das formações Ipixuna, Itapecuru e/ou Alter do Chão (Serra das Barreiras), consideradas do Cretáceo Superior ou Terciário Inferior, e recobertas por uma espessa camada de argila caulinitica denominada "Argila de Belterra", com até 20 metros de espessura.

Esses depósitos são denominados tipo "plataforma". Os horizontes de bauxita ocorrem no topo de platôs, sobre camadas de argilitos. Porto Trombetas é um exemplo-tipo com reservas de 600 Mt de minério com teor médio de 49,5% de Al_2O_3 e 5% de sílica reativa (Biondi, op. cit.).

A Figura 1 apresenta a estruturação geral do depósito do topo para base:

- Capeamento, com horizonte de argila caulínica (Belterra)
- Zona mineralizada ou zona de laterita concrecionária, subdividida em bauxita nodular, sobre laterita ferruginosa, sobre bauxita maciça gibbsítica
- Zona saprolítica ou argilosa na base

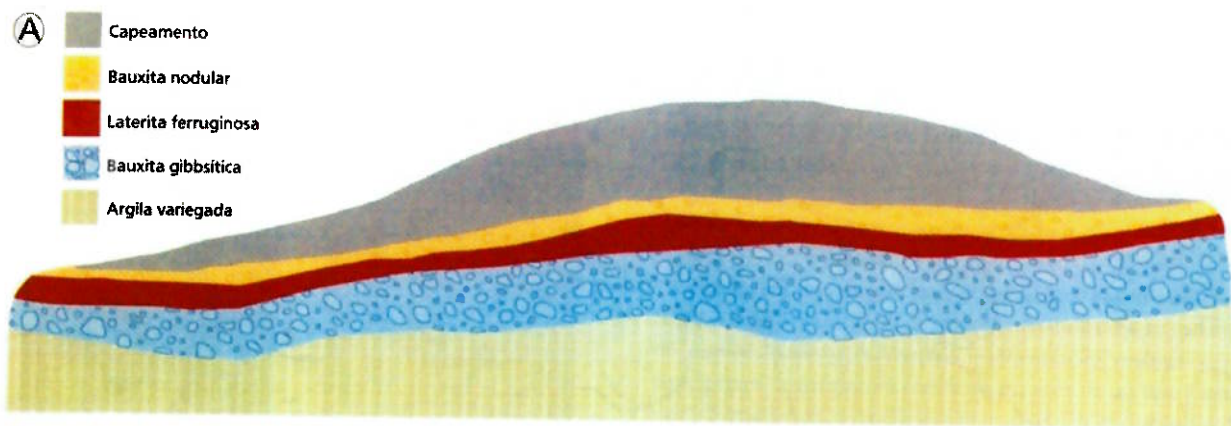


Figura 1 – Seção geológica-tipo dos depósitos de bauxita de Porto Trombetas (Biondi, 2003)

A bauxita nodular, objeto deste estudo, é caracterizada pelo elevado estado de alteração causado pelo processo de laterização com neoformação de caulinita (sílica reativa) sobre os nódulos de gibbsita.

2.3 Lavra e beneficiamento de bauxita

De acordo com Hill e Sehnke (2006), de 85% a 90% da bauxita produzida no mundo atualmente é explotada a céu aberto. Entre elas, o método de lavra mais utilizado é a lavra em tiras, no qual uma faixa do capeamento é retirada expondo o minério. O minério é então escavado e levado para a usina, enquanto que o capeamento, junto com o rejeito da usina, é depositado na cava exaurida na faixa anterior (Figura 2). Nas tiras exauridas inicia-se o processo de recuperação ambiental, através do acerto da topografia e o plantio de mudas nativas. Esse método é favorecido tendo em vista a forma tabular dos corpos de minério bauxíticos, apresentando não mais que 10 metros de espessura.

De acordo com Chaves (2007), o estado da arte no beneficiamento da bauxita envolve a britagem do minério para sua liberação, atrição (escrubagem) da superfície para remoção de partículas finas de argila e limonita, peneiramento ou classificação do material de acordo com o teor de gibbsita em cada fração, deslamagem para retirada da argila e limonita, e, se necessário, remoção de minerais de ferro, titânio, quartzo e outros minerais de ganga. Estas operações unitárias são detalhadas a seguir:

Britagem: minérios de bauxita são demasiadamente argilosos e muito úmidos. Devido a estes fatores, britadores tipo *sizers* são geralmente utilizados.

Escrubagem: o material britado deve ser limpo para a remoção da argila impregnada às partículas de gibbsita. Isto é feito em grandes tambores giratórios com um sistema de levantamento do material, chamados *scrubbers*. O material geralmente tem um tempo de residência de 3 minutos, com uma proporção sólidos/água de meio a meio.

Classificação por tamanho: Junto com a operação de escrubagem, é comum a utilização de um *trommel* (espécie de peneira em forma de tambor). Esta não é a melhor opção, pois os equipamentos trabalham com eficiência ótima em rotações diferentes. Segundo Chaves (op. cit.), a melhor opção é separar as duas operações, utilizando *scrubber* e peneiras vibratórias. Para deslamagem, a classificação é efetuada em ciclones.

Desaguamento: o desaguamento do concentrado é feito através de operações mecânicas com peneiras e ciclones, seguidos por etapas de filtragem a vácuo.

Concentração da gibbsita: embora não usual as seguintes operações podem ser utilizadas na concentração da gibbsita:

- Concentração densitária: A gibbsita tem peso específico de aproximadamente 2,4. Porém, devido à alta porosidade, a sua densidade aparente é menor. Assim a separação densitária é viável; além disso, o ferro e o titânio podem ser separados facilmente através de métodos densitários, pois usualmente estão associados a minerais mais densos ($d > 4$).
- Separação magnética: minerais de ferro e, eventualmente, titânio (ilmenita) apresentam elevadas susceptibilidades magnéticas, podendo ser separados.
- Flotação: a viabilidade da flotação da bauxita tem sido estudada (Massola, 2008); a flotação pode ser direta, flotando a gibbsita, ou então reversa, flotando minerais portadores de sílica.

2.3.1 Bauxita da Mineração Rio do Norte (MRN)

A Mineração Rio do Norte atualmente está operando nas minas Saracá, Almeidas e Aviso (MRN, 2009). Nelas, o minério encontra-se a uma profundidade média de 8 metros, sendo coberto por uma vegetação densa e uma camada estéril composta de solo orgânico, argila, bauxita nodular e laterita ferruginosa. O método de lavra empregado é o de lavra em tiras.

Da lavra, o minério escavado é transportado em caminhões fora-de-estrada até as instalações de britagem, onde é reduzido a uma granulometria inferior a 3 polegadas. Dai segue em correias transportadoras para a unidade de beneficiamento (lavagem, ciclonagem e filtragem); as lamas, aproximadamente 27% de massa, são depositados em bacias de rejeitos em áreas já mineradas (platô Saracá).

A bauxita beneficiada é homogeneizada e transportada até o porto por ferrovia com 28 km. Como a bauxita pode ser comercializada tanto úmida quanto seca, na área do porto o minério pode ter dois destinos antes de embarcar em navios: ou alimenta fornos secadores ou segue úmida para o pátio de estocagem.

O sumário das várias operações envolvidas desde a extração até o embarque em navios é ilustrado na Figura 2.

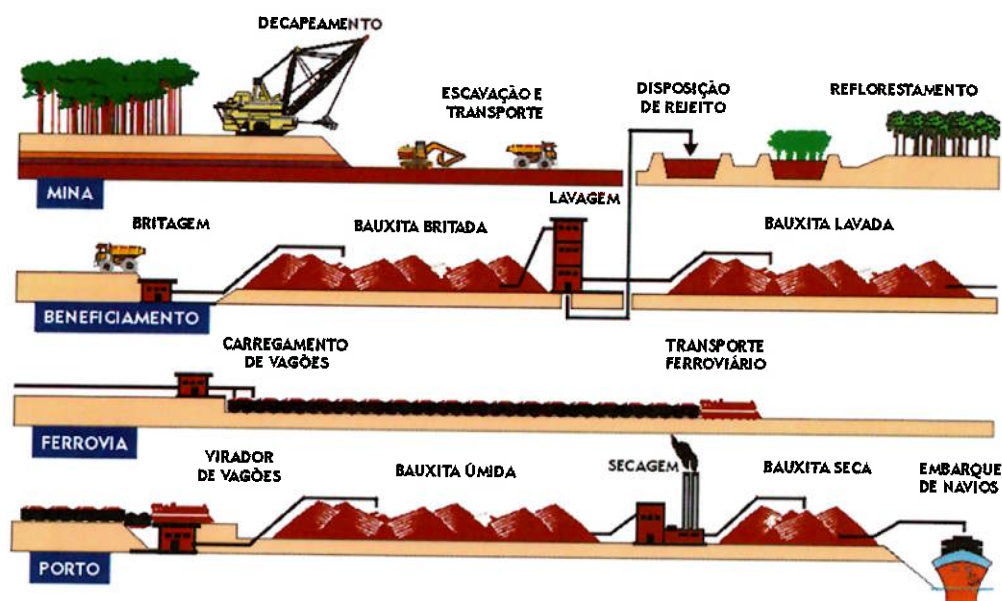


Figura 2 – Operações envolvidas na extração e processamento de bauxita da MRN (MRN, op. cit.)

2.4 Metalurgia do alumínio

Da bauxita até o alumínio metálico tem-se dois processos distintos: processo Bayer para produção do óxido de alumínio (alumina), e o processo Hall-Heroult que reduz a alumina para alumínio metálico.

O processo Hall-Heroult foi desenvolvido independentemente por dois químicos em países diferentes, o americano Charles Martin Hall e o francês Paul T. Heroult no ano de 1886. O processo consiste na eletrólise da alumina dissolvida em criolita líquida $[(NaF)_3AlF_3]$. Esta eletrólise demanda muita eletricidade, 1 kWh produz menos que 335 gramas de alumínio, portanto as metalúrgicas quase sempre se encontram próximas a fontes de energia barata.

O processo Bayer desenvolvido por Karl Josef Bayer em 1888 e aperfeiçoado em 1902. Este processo fechou o circuito necessário para a produção em larga escala de alumínio metálico, possibilitando produzir alumina pura suficiente a partir da bauxita para o processo Hall-Heroult.

2.4.1 Processo Bayer

Basicamente, o processo Bayer consiste na lixiviação da bauxita em soda cáustica para solubilizar a alumina e precipitar as impurezas (lama vermelha). A solução é resfriada e colocada em tanques para precipitação. O produto precipitado é o hidróxido de alumina, que é separado da solução e calcinado em fornos rotativos, tendo como produto final a alumina praticamente pura (Hill & Sehnke, 2006).

As principais reações que ocorrem durante a lixiviação da bauxita são a solubilização dos minerais de alumínio (representado pela gibbsita) e a solubilização dos argilominerais (representado pela caulinita):

- Solubilização da gibbsita: $Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 2NaOH \rightarrow 2NaAlO_2 + 4H_2O$
- Solubilização da caulinita: $5[Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O] + Al_2O_3 \cdot 3H_2O + 12NaOH \rightarrow 2[3Na_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 5H_2O + 10H_2O]$

A soda alimentada no processo é consumida tanto pela solubilização dos minerais de alumínio quanto pela solubilização dos argilominerais. Portanto, quanto maior a quantidade de argilominerais presentes na bauxita, maior o consumo de soda e maior será o seu custo de produção.

Para que o processo Bayer seja economicamente viável, é usualmente necessário que a bauxita tenha no mínimo 45% de alumina aproveitável e no máximo 4% de sílica reativa (usualmente na forma de caulinita) (ALCOA, 2009).

2.5 Oferta mundial de alumínio - 2007

Segundo o sumário mineral de 2008 (DNPM, 2009), as reservas mundiais de bauxita em 2007 somaram 34 bilhões de toneladas. O Brasil detém 10,6% desse total, sendo 95% de bauxita tipo metalúrgica e 5% tipo refratária. As reservas brasileiras mais expressivas (95%) estão localizadas na região Norte (Estado do Pará), as quais têm como principais concessionárias, as empresas MRN, CBA e ALCOA.

A produção mundial de bauxita em 2007 foi 8,4% superior a de 2006, passando de 178 milhões de toneladas em 2006 para 194 milhões de toneladas em 2007. O Brasil voltou a ocupar o 3º lugar entre os principais produtores respondendo por 12,7%, sendo ultrapassado pela China que respondeu por 16,5% e teve sua produção elevada em 52% no período.

Tabela 1 – Reservas e produção mundial de bauxita

Discriminação	Reservas (milhões de toneladas)		Produção (milhões de toneladas)			
	Países	2007	%	2006	2007	%
Brasil		3.600	10,6	22,8	24,8	12,7
Austrália		7.900	23,3	62,3	64,0	33,0
China		2.300	6,8	21,0	32,0	16,5
Guiana		900	2,7	1,4	2,0	1,0
Guiné		8.600	25,4	14,4	14,0	7,2
Índia		1.400	4,1	12,7	13,0	6,7
Jamaica		2.500	7,4	14,9	14,0	7,2
Rússia		600	1,8	6,6	6,0	3,1
Suriname		600	1,8	4,9	5,0	2,6
Venezuela		350	1,0	5,5	5,5	2,7
Outros Países		5.100	15,1	12,7	14,1	7,3
Total		33.850	100,0	179,3	194,4	100,0

Fontes: DNPM, (USGS) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries–2007, (IAI) International Aluminium Institute; (ABAL) Associação Brasileira do Alumínio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Amostras

Foram recebidas 30 amostras de bauxita nodular de platôs que não estão em exploração com aproximadamente 100 kg, cada e granulometria inferior a 50 mm. Para facilitar o processo de identificação das amostras, foi adotada a sigla ND para a bauxita nodular. Exemplo:

01 ND 01 – Número da amostra, variando de 01 a 30
 ND – amostra de bauxita nodular

3.2 Procedimento experimental

As 30 amostras foram processadas de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 3 a seguir:

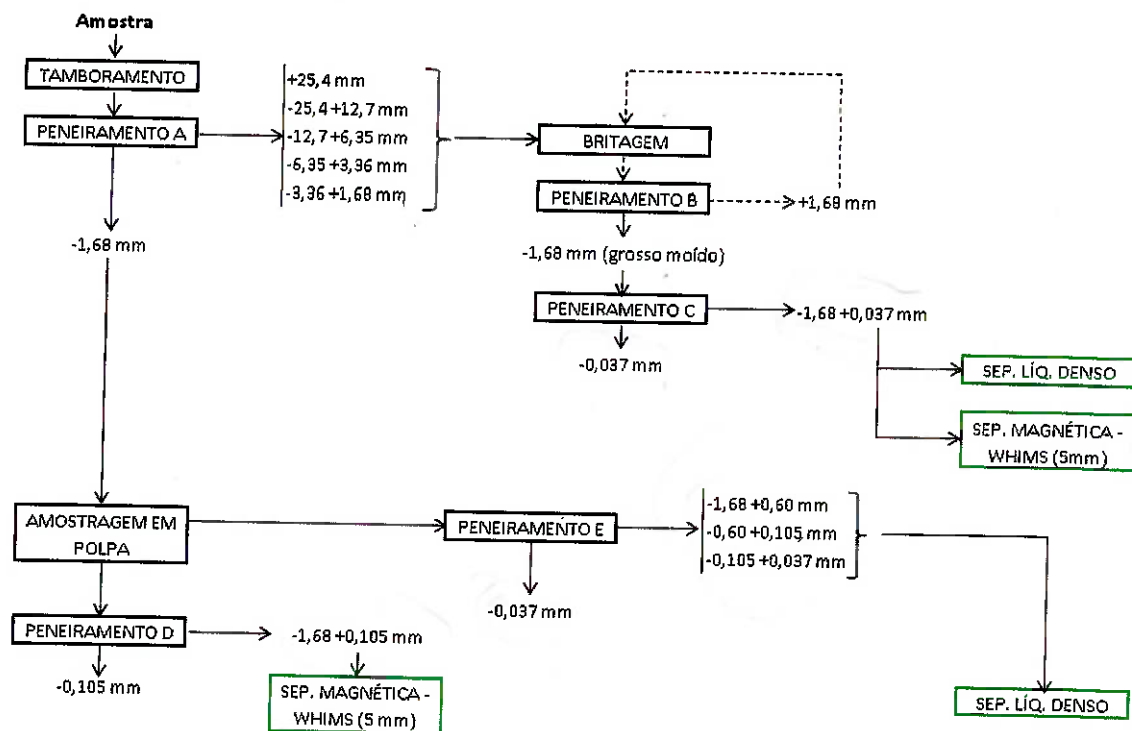


Figura 3 – Fluxograma do procedimento experimental

- **TAMBORAMENTO:** todo material foi objeto de desagregação a 40% de sólidos em uma betoneira por cerca de 4 minutos;
- **PENEIRAMENTO A:** peneiramento mecânico com peneiras quadradas de 50x50 cm com auxílio de máquina lavadora de alta pressão tipo “wap”. Aberturas das peneiras: 25,4; 12,7; 6,35; 3,36 e 1,68 mm;
 - **BRITAGEM e PENEIRAMENTO B:** cada faixa granulométrica do material retido em 1,68 mm na PENEIRA A foi cominuído em britador de mandíbulas e britador de rolos em circuito fechado com a PENEIRA B com abertura de 1,68 mm até 100% passante. O peneiramento foi feito manualmente em peneiras redondas de 20 cm de diâmetro ou então em peneirador mecânico com peneiras quadradas de 50x50 cm. Produto do peneiramento foi chamado de “grosso moído”;
 - **PENEIRAMENTO C:** peneiramento do material britado em 0,037 mm. O retido (-1,68 +0,037 mm) foi encaminhado para separação em líquido denso e para separação magnética de alta intensidade;
 - **SEP. LÍQ. DENSO:** separação em líquido denso (bromofórmio, $d=2,8 \text{ g/cm}^3$), gerando um produto afundado e outro flutuado;

- **SEP. MAGNÉTICA – WHIMS (5 mm):** separação magnética de alta intensidade via úmida (WHIMS) com placa Jones de 5 mm, gerando um produto magnético e outro não-magnético;
- **AMOSTRAGEM EM POLPA:** o produto passante pela PENEIRA A passou por amostragem em amostrador mecânico rotativo;
 - **PENEIRAMENTO D:** peneiramento em peneirador mecânico com peneira de 50x50 cm e abertura de 0,105 mm. O retido na malha 0,105 foi encaminhado para separação magnética;
 - **SEP. MAGNÉTICA – WHIMS (5 mm):** separação magnética de alta intensidade a úmido (WHIMS) com placa Jones de 5 mm da fração -1,68 + 0,105 mm.
 - **PENEIRAMENTO E:** peneiramento mecânico a úmido em peneiras 50x50 cm e aberturas de 0,60; 0,105 e 0,037 mm para ensaios de separação em líquido denso.
 - **SEP. LÍQ. DENSO:** Separação em líquidos densos das frações -1,68 +0,60 mm; -0,60 +0,105 mm e -0,105 +0,037 mm;

3.3 Procedimentos analíticos

Foram realizados os seguintes procedimentos analíticos:

- Análises químicas com determinações de Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 (por fluorescência de raios X – FRX), Al_2O_3 aproveitável e SiO_2 reativa (via úmida) e perda por calcinação foram realizadas em todos os produtos gerados no estudo.
- Agrupamento (*clusters*) por difração de raios X das amostras tal qual e frações compostas acima de 0,037 mm empregando utilizando-se o recurso do software High Score Plus da PANalytical
- Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação das associações minerais presentes dos agregados de gibbsita com enfoque na presença de argilominerais (essencialmente caulinita), com imagens de elétrons retroespalhados e mapeamento de raios X para Al, Si, Fe, Ti; estas análises foram restritas as frações -3,36+1,68 mm e -0,60+0,105 mm.

4 RESULTADOS

4.1 Composição mineralógica e agrupamento de amostras

A análise por agrupamento (ou *cluster*) permitiu classificar as amostras tal qual (TQ) em 5 grupos e da fração +0,037 mm (com o descarte dos finos, “material lavado”) em 3 grupos conforme ilustrado nos dendogramas expostos na Figura 4. As principais distinções entre os grupos referem-se aos conteúdos relativos de gibbsita, caulinita e oxi-hidróxidos de ferro, conforme verificado através difratogramas (Figura 5) e composição química das amostras apresentadas no Anexo I.

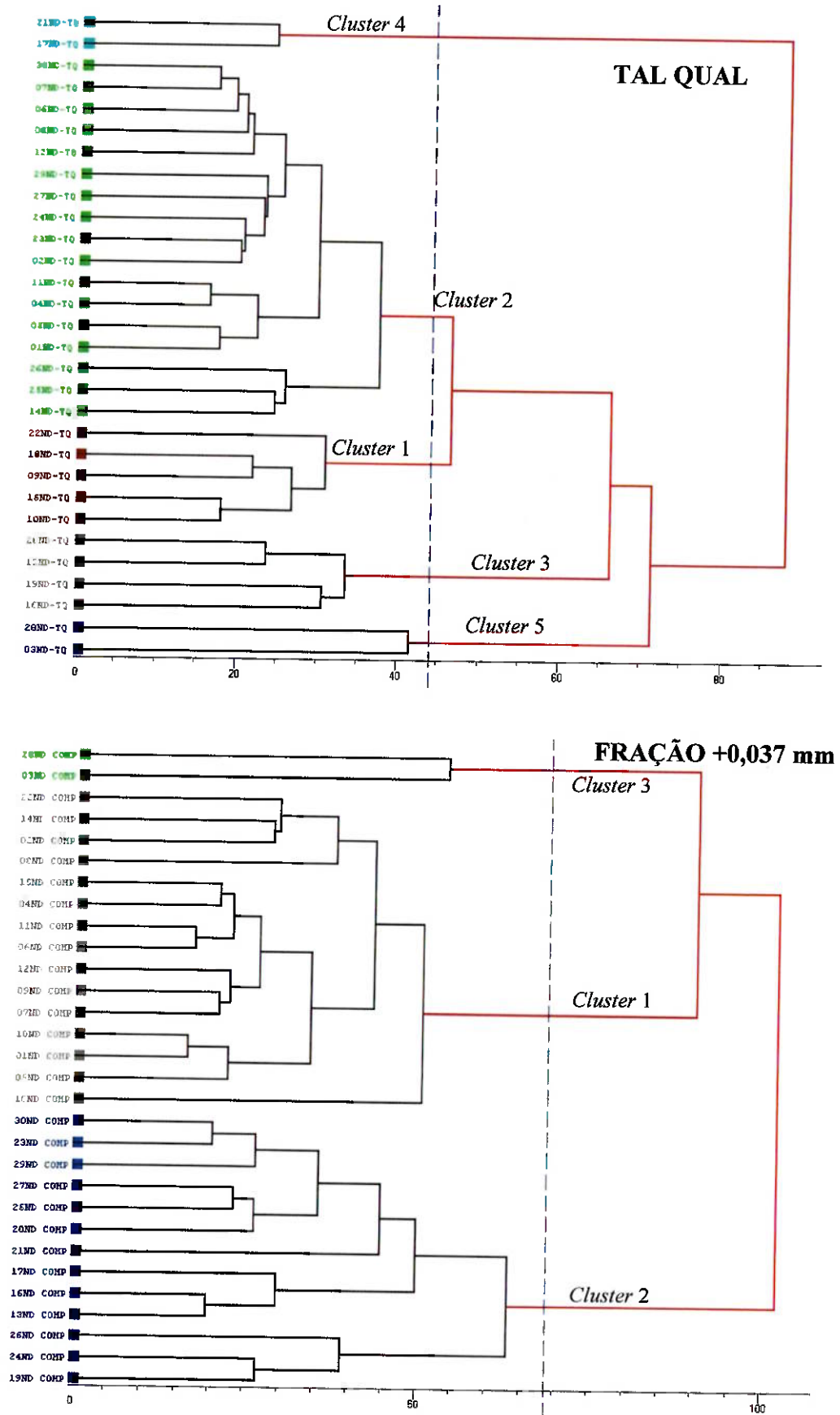


Figura 4 – Dendrogramas da análise por agrupamento de difração de raios X das amostras tal qual e da fração +0,037 mm

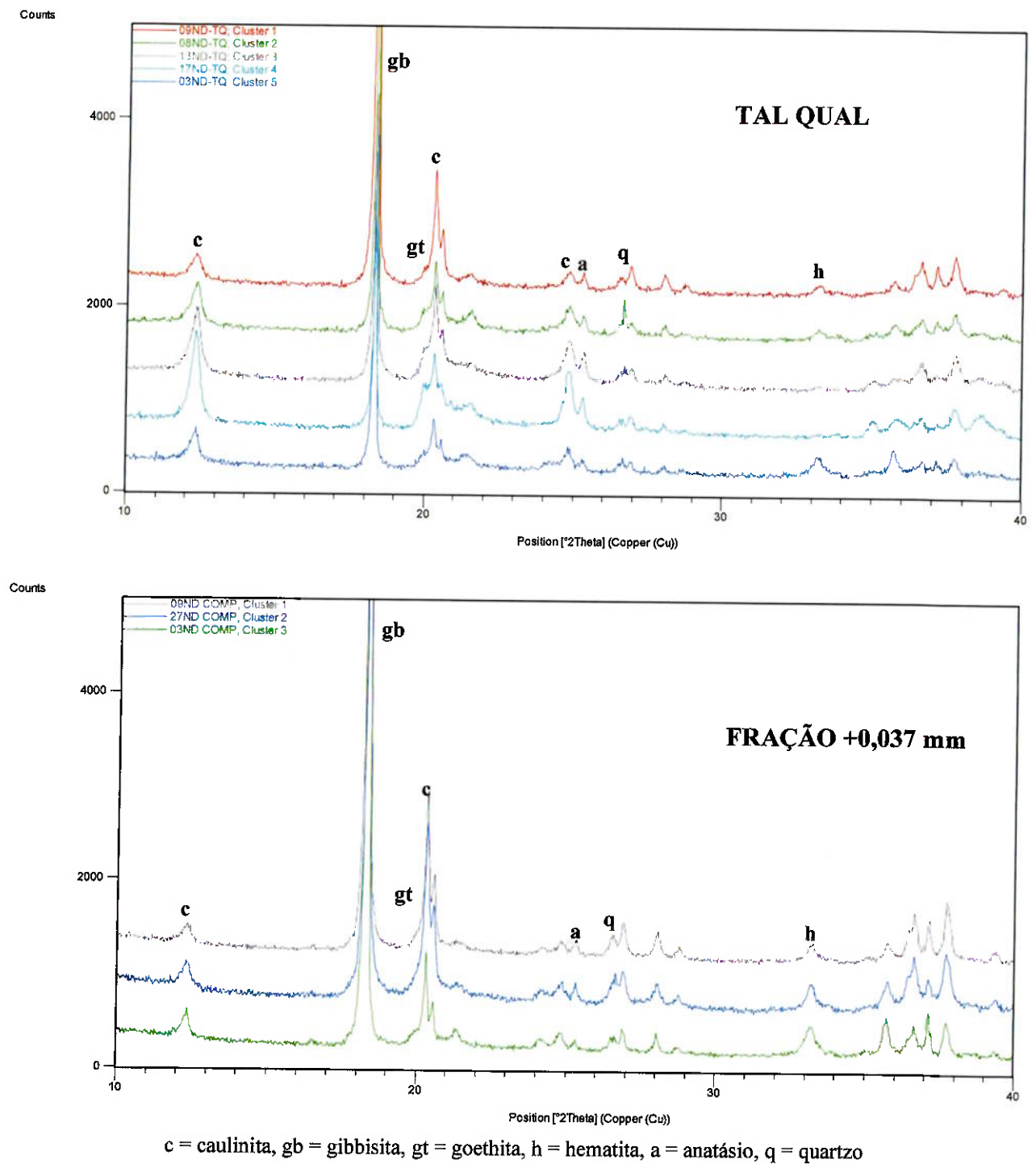


Figura 5 – Difratogramas comparativos das amostras representativas de cada grupo, amostras tal qual e fração +0,037 mm

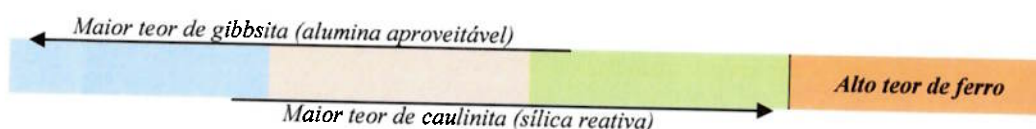
4.2 Composição química

A Tabela 2 apresenta as composições químicas médias dos agrupamentos obtidos para as amostras tal qual e fração +0,037 mm, com as respectivas parcelas de material retido em 0,037 mm.

Tabela 2 – Composição química média dos agrupamentos obtidos das amostras TQ e +0,037 mm

Amostra	Teores médios (%)							Massa (%) +0,037 mm
	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	PPC	
TAL QUAL								
Cluster 1	40,7	9,31	52,7	7,74	12,5	1,84	25,3	74,2
Cluster 2	32,1	12,8	50,6	9,20	14,2	1,93	24,1	66,1
Cluster 3	28,1	17,5	48,1	5,84	22,1	2,35	21,7	52,8
Cluster 4	19,2	23,1	45,1	3,53	28,8	3,05	19,5	24,1
Cluster 5	23,8	17,4	42,6	17,8	20,6	1,86	17,3	66,2
FRACÇÃO +0,037 MM								
Cluster 1	48,3	5,48	55,5	7,95	6,38	1,31	28,9	67,9
Cluster 2	45,1	7,12	54,5	7,57	8,84	1,27	27,9	56,6
Cluster 3	35,5	7,53	44,0	22,5	9,84	1,19	22,4	66,2

Legenda de cores:



É evidente a diferença em relação aos conteúdos de sílica reativa entre os dois grupos de amostras. Com a retirada do material passante em 0,037 mm (lamas) verifica-se uma redução média de 8,1% absolutos na sílica reativa e, conseqüente, aumento no teor de alumina aproveitável em 14,5% (Anexo 2)

A remoção das lamas não gera maiores mudanças em relação aos teores de ferro, os quais para os cluster 1 a 4 TQ e 1 e 2 da fração + 0,037 mm são bem inferiores aos valores usualmente observados para bauxita. Apenas as amostras 03ND e 28ND (cluster 5 TQ e cluster 3 +0,037 mm) mostram teores mais expressivos de Fe₂O₃.

4.3 Análise granuloquímica

A composição química (teores dosados) das amostras de bauxita nodular mais representativas dos agrupamentos efetuados para a fração +0,037 mm é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Granuloquímica das amostras representativas de cada cluster da fração +0,037 mm

Fração (mm)	CLUSTER 1 (ND 09)					CLUSTER 2 (ND 27)					CLUSTER 3 (ND 03)				
	% massa retida	Teores (%)		Distrib. (%)		% massa retida	Teores (%)		Distrib. (%)		% massa retida	Teores (%)		Distrib. (%)	
	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re		Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re		Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	
+25,4	26,0	54,8	4,28	36,1	9,80	15,2	51,1	4,86	23,9	6,12	24,1	46,1	5,43	42,9	8,39
+12,7	26,4	45,8	6,34	30,6	14,7	18,6	53,0	4,23	30,1	6,50	20,0	33,8	8,98	26,1	11,5
+6,35	13,3	53,5	4,71	18,1	5,52	15,0	45,2	6,86	20,7	8,50	12,0	27,4	10,7	12,8	8,30
+3,36	6,0	39,4	9,15	6,01	4,85	10,2	39,0	9,11	12,2	7,70	6,73	24,0	15,2	6,24	6,56
+1,68	2,0	46,3	7,50	2,38	1,34	3,2	43,6	8,44	4,33	2,26	1,73	36,5	9,30	2,44	1,03
+0,60	0,8	46,0	6,93	0,93	0,49	0,7	46,0	7,17	1,04	0,44	1,04	36,0	10,2	1,45	0,68
+0,105	1,4	39,9	5,95	1,43	0,74	1,6	37,6	6,21	1,89	0,84	1,81	25,3	10,0	1,77	1,16
+0,037	0,8	36,6	7,11	0,75	0,50	0,6	30,9	6,83	0,60	0,36	1,52	18,7	12,0	1,10	1,17
-0,037	23,3	6,26	30,3	3,69	62,0	34,7	4,89	23,5	5,19	67,28	31,1	4,30	30,6	5,17	61,2
Total + 0,037	76,7	49,5	5,6	96,3	38,0	65,3	47,4	6,06	94,8	32,7	68,9	35,6	8,77	94,8	38,8
Tot.calcul.	100,0	39,4	11,4	100,0	100,0	100,0	32,7	12,1	100,0	100,0	100,0	25,8	15,6	100,0	100,0

Os teores de alumina aproveitável das frações acima de 0,037 mm tendem a ser maiores nas frações mais grossas. Já na fração passante em 0,037 mm, os teores de alumina aproveitável são menores ou próximos a 10%. Contrariamente, os teores de sílica reativa são significativamente maiores nas frações mais finas, principalmente abaixo de 0,037 mm, com

teores próximos ou superiores a 25%. Ressalta-se que os teores de sílica reativa aumentam significativamente a partir da fração 3,36 mm. Estas observações são mais facilmente notadas através dos histogramas representativos dos teores de alumina aproveitável, sílica reativa e óxido de ferro por fração granulométrica apresentados no Anexo 3.

4.4 Separação em líquidos densos – fração -6,35+0,037 mm

Os resultados de separação em líquido denso da fração -6,35+0,037 mm são apresentados de forma agrupada considerando-se as médias de cada grupo (*cluster* +0,037 mm) e a média geral na Tabela 4.

Tabela 4 – Teores e distribuição do produto flutuado, fração -6,35+0,037 mm, para cada classe do agrupamento

Fração +0,037 mm	% massa		Teores alim. ensaio (%)			Teores flutuado (%)			Recup. ensaio flut. (%)		
	flutuado	amostra	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
<i>cluster</i> 1	91,8	12,7	42,8	7,42	10,0	46,0	7,19	6,82	99,3	88,3	59,7
<i>cluster</i> 2	92,4	16,9	39,3	9,00	10,2	41,9	9,14	7,30	99,3	88,5	68,6
<i>cluster</i> 3	79,4	10,6	30,5	10,1	24,3	37,4	7,87	14,5	96,7	73,5	46,9
Média	91,2	14,4	40,5	8,28	11,0	43,6	8,08	7,54	99,1	87,4	62,7

Comparando as médias dos teores da alimentação e do flutuado entre os agrupamentos, percebe-se que somente os teores de óxido de ferro variam mais acentuadamente, com 62,7% de recuperação média. Os teores de alumina aproveitável e de sílica reativa são mais homogêneos, com 99,1% e 87,4% de recuperação média no ensaio.

Verifica-se uma diferença de comportamento das amostras mais evidenciada na classe 3, tanto pelos maiores teores de ferro como pelos menores teores de alumina aproveitável no flutuado, como também pelas menores recuperações de sílica reativa e ferro no ensaio.

4.5 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS) – fração -1,68 +0,105 mm

Os resultados de separação magnética em alta intensidade da fração -1,68+0,105 mm são apresentados de forma agrupada considerando-se as médias de cada grupo (*cluster* +0,037 mm) e a média geral na Tabela 5.

Tabela 5 – Teores e distribuição do produto não-magnético do WHIMS, fração -1,68+0,105 mm, para cada classe do agrupamento

Fração +0,037 mm	% massa		Teores alim. ensaio (%)			Teores não-mag. (%)			Recup. ensaio n.mag. (%)		
	não-mag.	amostra	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
<i>cluster</i> 1	91,2	8,76	42,8	6,43	7,78	44,8	5,54	4,95	95,6	89,9	56,0
<i>cluster</i> 2	91,3	8,72	37,3	8,24	6,12	39,7	6,96	3,52	95,9	90,3	55,3
<i>cluster</i> 3	73,7	26,3	30,9	7,96	21,8	35,0	5,59	15,6	82,7	67,9	53,2
Média	85,4	14,6	37,0	7,54	11,9	39,8	6,03	8,01	91,4	82,7	54,8

Comparando as médias dos teores da alimentação e do não-magnético entre os agrupamentos, os teores de óxido de ferro apresentam maior variação, com 54,8% de recuperação média. Os teores de alumina aproveitável e de sílica variam com menor intensidade, de 37,0% para 39,8% e de 7,54% para 6,03% respectivamente.

Verifica-se uma diferença de comportamento das amostras de diferentes classes de *cluster* frente às separações minerais mais evidenciada na classe 3, tanto pelos maiores teores de ferro como pelos menores teores de alumina aproveitável. Destaca-se também a menor recuperação de alumina aproveitável e de sílica reativa para o produto flutuado nesta mesma classe.

4.6 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS) – fração -0,60 +0,037 mm

Os resultados de separação magnética em alta intensidade da fração -0,60 +0,037 mm são apresentados de forma agrupada considerando-se as médias de cada grupo (*cluster* +0,037 mm) e a média geral na Tabela 6/Tabela 5.

Tabela 6 – Teores e distribuição do produto não magnético do WHIMS, fração -0,60+0,037 mm, para cada classe do agrupamento

Fração +0,037 mm	% massa		Teores alim. ensaio (%)			Teores não-mag. (%)			Recup. ensaio n.mag. (%)		
	não-mag.	amostra	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
<i>cluster</i> 1	80,9	1,91	41,0	6,06	9,92	46,0	4,86	3,20	91,7	75,8	24,1
<i>cluster</i> 2	82,4	1,95	33,7	8,43	8,40	37,7	7,30	2,78	93,2	77,1	32,4
<i>cluster</i> 3	57,4	2,00	26,2	8,50	28,2	38,1	5,80	11,2	83,8	48,5	22,1
Média	73,6	1,95	33,6	7,66	15,5	40,6	5,99	5,72	89,6	67,1	26,2

Comparando as médias dos teores da alimentação e do não-magnético entre os agrupamentos, percebe-se a diminuição mais acentuada no teor de ferro, com recuperação de 26,2%. Ocorre um expressivo aumento no teor da alumina aproveitável, de 33,3% para 40,6% com recuperação de 89,6%, e uma diminuição pouco acentuada na sílica reativa, de 6,73% para 5,99% aliada a 67,1% de recuperação.

As amostras da classe 3 apresentam um comportamento dispar em relação aos outras duas classes de agrupamento, principalmente pelos elevados teores de ferro e menores recuperações de alumina aproveitável (83,8%) e sílica reativa (48,5%).

4.7 Estudos com a fração de grossos moídos

4.7.1 Separação em líquidos densos

Os resultados de separação em líquidos densos da fração de grossos moídos são apresentados de forma agrupada considerando-se as médias de cada grupo (*cluster* +0,037 mm) e a média geral na Tabela 7/Tabela 5.

Tabela 7 – Teores e distribuição do produto flutuado, fração grosso moído, para cada classe do agrupamento

Fração +0,037 mm	% massa		Teores alim. ensaio (%)			Teores flutuado (%)			Recup. ensaio flut. (%)		
	flutuado	amostra	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
<i>cluster</i> 1	83,3	53,8	48,6	5,42	7,90	53,5	4,43	3,64	92,6	66,4	35,8
<i>cluster</i> 2	84,0	43,4	45,8	7,08	7,61	51,0	6,20	3,21	94,6	68,8	40,8
<i>cluster</i> 3	61,2	37,9	35,9	7,47	22,3	50,2	5,25	7,03	88,0	41,5	17,8
Média	76,2	45,0	43,4	6,66	12,6	51,6	5,29	4,63	91,7	58,9	31,4

Comparando as médias dos teores da alimentação e do flutuado entre os agrupamentos, percebe-se um aumento no teor de alumina aproveitável de 43,4% para 51,6% com recuperação de 91,7%, uma queda pouco acentuada no teor de sílica reativa de 6,66% para 5,29% com recuperação de 58,9%, aliada a uma expressiva queda no teor de óxido de ferro de 12,6% para 4,63% (recuperação de 31,4%).

Entre as classes, pode-se destacar o comportamento da classe 3, com alto teor de óxido de ferro e baixo teor de alumina aproveitável na alimentação. Com relação aos teores do produto flutuado, ela apresenta um comportamento semelhante com as demais classes, com exceção do teor de óxido de ferro, que continua mais elevado em relação às demais classes.

4.7.2 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS)

Os resultados de separação magnética em alta intensidade da fração de grossos moídos são apresentados de forma agrupada considerando-se as médias de cada grupo (*cluster* +0,037 mm) e a média geral na Tabela 8 e Tabela 5.

Tabela 8 – Teores e distribuição do produto não magnético do WHIMS, produto grosso moído, para cada classe do agrupamento

Fração +0,037 mm	% massa		Teores alim. ensaio (%)			Teores não-mag. (%)			Recup. ensaio n.mag. (%)		
	não-mag.	amostra	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
<i>cluster 1</i>	91,5	59,0	48,6	5,25	8,03	50,1	5,02	6,53	94,3	87,9	74,3
<i>cluster 2</i>	90,9	47,5	45,7	7,18	7,40	47,1	6,98	6,06	93,7	88,5	75,4
<i>cluster 3</i>	71,1	44,2	35,9	6,94	21,6	40,7	6,52	15,7	80,5	66,8	52,7
Média	84,5	50,2	43,4	6,46	12,3	45,9	6,17	9,41	89,5	81,0	67,5

Comparando as médias dos teores da alimentação e do produto não-magnético entre os agrupamentos, percebe-se pouca variação entre os teores de sílica reativa, de 6,46% para 6,17% com 81,0% de recuperação. Com relação à alumina aproveitável e ao óxido de ferro, percebe-se um ligeiro aumento de teor para Al₂O₃ ap, de 43,4% para 45,9% com 89,5% de recuperação, e uma diminuição acentuada no teor de óxido de ferro, de 12,3% para 9,41% com 67,5% de recuperação.

Entre as classes, destaca-se o cluster 3 devido ao seu teor mais baixo de alumina aproveitável e elevado teor de óxido de ferro. O produto não magnético desta classe mostra pequena redução no teor de ferro e comportamento inverso para a alumina aproveitável; as recuperações associadas de alumina aproveitável, sílica reativa e óxido de ferro são inferiores em relação as demais classes.

4.8 Discussão de resultados

O procedimento experimental foi realizado para 30 amostras de bauxita nodular, sendo os valores médios dos produtos obtidos (não-magnético para o WHIMS e fluado para a separação em líquido denso) nos distintos ensaios de separações minerais são apresentados comparativamente na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores médios dos produtos obtidos nos distintos ensaios de separações minerais

	% em massa	Teores (%)			Distribuição (%)		
		Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃
Fração +0,037mm	62,9	46,1	6,33	8,76	92,7	33,3	68,3
Líquido denso (-6,35 +0,037 mm)	14,4	43,6	8,08	7,54	20,9	7,88	11,1
WHIMS (-1,68 +0,105 mm)	9,91	41,9	6,16	5,04	3,58	1,26	1,43
WHIMS (-0,60 +0,037 mm)	1,93	41,9	5,98	3,55	2,70	0,86	0,72
Grossos (+1,68 mm)	59,3	46,5	6,28	8,73	85,0	27,2	58,2
Líquido denso	48,2	52,2	5,25	3,68	79,0	16,7	19,2
WHIMS	53,0	48,1	5,97	6,93	79,0	23,2	41,8

A tabela mostra que mesmo com a separação, os teores de sílica reativa permaneceram altos, maiores que o recomendável para o processo Bayer (ALCOA, op. cit.).

4.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Observações ao MEV foram efetuadas no sentido de avaliar a forma de ocorrência da sílica (essencialmente sílica reativa devida a presença de caulinita) e a associação desta com a gibbsita.

Imagens da microscopia eletrônica de varredura das frações $-3,36+1,68$ mm e $-0,60+0,105$ mm, são apresentadas na Figura 6.

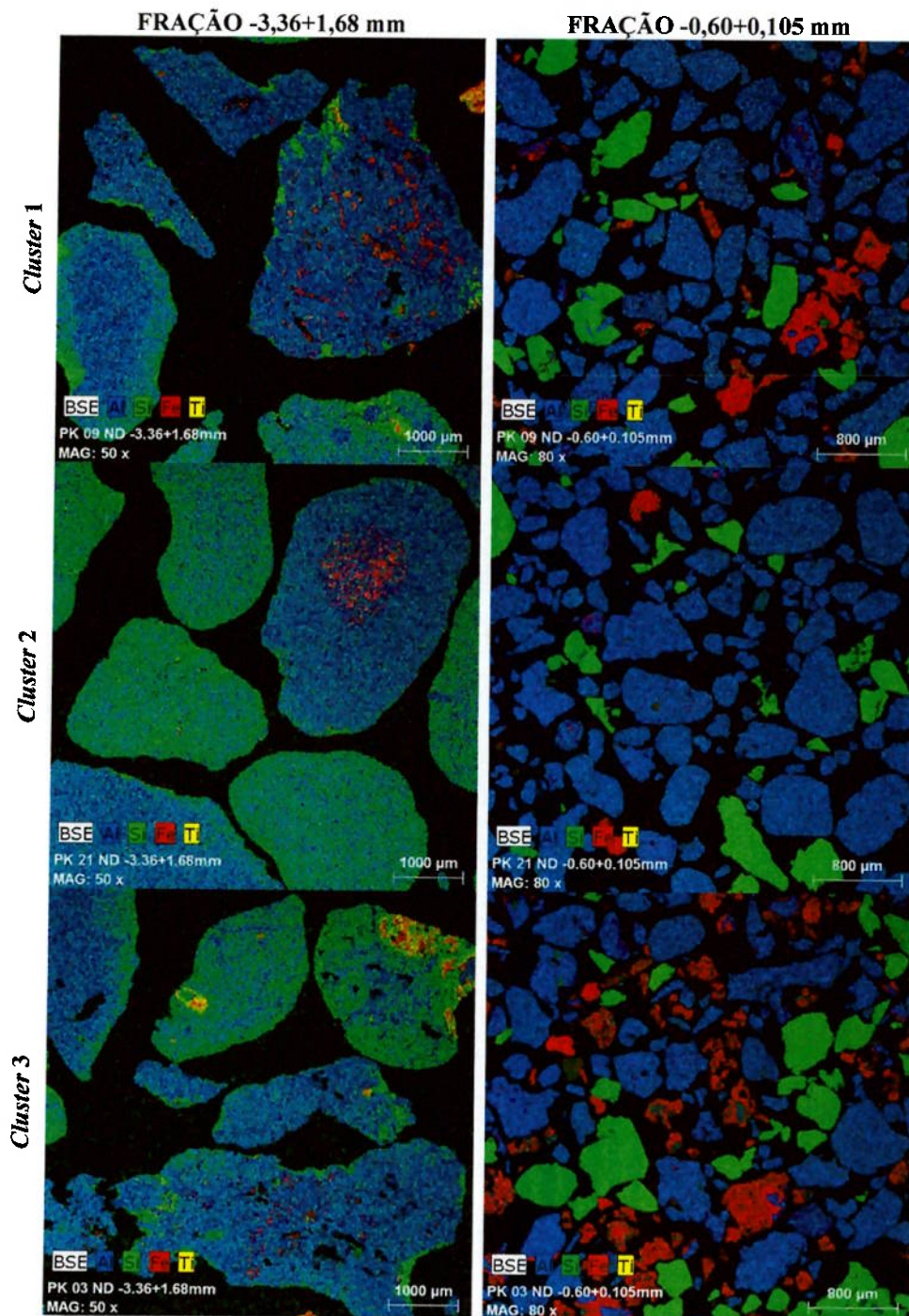


Figura 6 – Microscopia eletrônica de varredura das frações $-3,36+1,68$ e $-0,60+0,105$

Verifica-se na fração $-3,36+1,68$ mm a presença de maior quantidade sílica (mapeamento de raios X em cor verde) junto à gibbsita (representada pelo Al, mapeamento em azul), particularmente nas bordas das partículas, indicando a neoformação de caulinita nos nódulos de gibbsita devido ao avançado processo de laterização. É possível perceber também (nitidamente em alguns nódulos) que essa formação de caulinita é um processo que está ocorrendo de fora para dentro, enquanto que outros nódulos já se encontram em processo mais avançado, com a caulinita intimamente associada à gibbsita.

Na fração mais fina (-0,60 +0,105 mm) percebe-se que a gibbsita (mapeamento em azul) está mais liberada, com partículas muito mais homogêneas.

Microanálises químicas por EDS realizadas sistematicamente por Gomes (2009) nestas mesmas frações também indicam teores de sílica mais expressivos para os agregados de gibbsita da fração -3,36+1,68 mm, 8,6% em média (Figura 7).

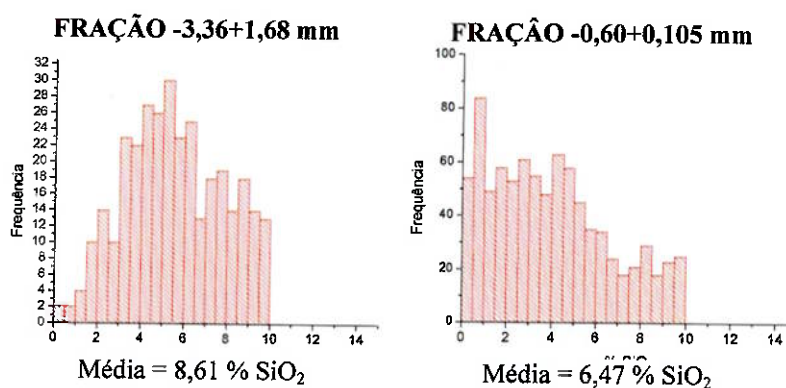


Figura 7 – Microanálises químicas por EDS em agregados de gibbsita das frações -3,36+1,68 mm e -0,60+0,105 mm (Gomes, 2009)

5 CONCLUSÕES

Os resultados de análise granuloquímica mostram que os teores mais altos de sílica reativa encontram-se principalmente nas frações mais finas, passante em 0,037 mm (rica em argilominerais). A remoção desta fração aumenta os teores de alumina aproveitável e diminui o teor de sílica reativa e de ferro, mas não atinge valores aceitáveis para o processo Bayer.

A separação em líquido denso e a separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS) não foram eficazes na separação da alumina aproveitável da sílica reativa para teores aceitáveis para a alimentação no processo Bayer. Importante ressaltar que estas separações foram empregadas essencialmente com foco na separação do Fe₂O₃ como parte de um estudo comparativo abrangendo um maior número de amostras (bauxita nodular, laterita e bauxita maciça).

Da análise por microscopia eletrônica por varredura conclui-se que a gibbsita e a caulinita estão intimamente associadas nas frações mais grossas, enquanto que nas frações mais finas percebe-se maior liberação entre elas.

É sugerido um estudo mais detalhado a respeito associação gibbsita/caulinita, seja por separação em líquido denso ou por técnicas de análise de imagens automatizada conjugada a microscopia eletrônica de varredura visando fornecer subsídios a estudo de viabilidade de concentração através de etapas de moagem para a liberação da gibbsita e posterior flotação conforme abordagem de Massola (op. cit.).

6 REFERÊNCIAS

- ALCOA, Alcoa no Brasil: Produtos: Mercados: Alumina: Processo de produção. Obtido em <http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/mercados_alumina_processo.asp>, acessado em 13/10/2009
- BIONDI, João Carlos. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.
- BOULANGÉ, B. & CARVALHO, A. **The Bauxite of Porto Trombetas**. In: CARVALHO, A et al. (Editores) **Brazilian Bauxites**. São Paulo-Paris: USP/FAPESP/ORSTOM, 1997. p. 55-73.
- CHAVES, Arthur Pinto & MASSOLA, Camila Peres. **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 2008 – Alumínio**. Obtido em <<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/aluminio.pdf>>, acessado em 24/09/2009.
- GOMES, Renata Martins. **Caracterização mineralógica e microestrutural de bauxitas da região de Porto Trombetas, PA**. Monografia de trabalho de formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 47 p. 2009.
- HILL, Vincent G. & SEHNKE, Errol D. **Bauxite**. In: **Industrial Minerals and Rocks: Commodities, markets, and uses - 7th ed.** Edited by Jessica Elzea...[et al.]. Littleton, Colorado, USA. 2006
- HUTCHISON, Charles S. **Economic Deposits and their Tectonic Setting**. London: Macmillan Education LTD, 1983.
- MASSOLA, Camila Peres. **Flotação reversa da bauxita de Miraf, MG**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 85 p. 2008.
- MRN, **Mineração Rio do norte – Sequência Operacional**. Obtido em <http://www.mrn.com.br/producao/graf_seq_op.htm>, acessado em 21/09/2009
- RAMOS, Carlos Romano. **Perfil analítico do alumínio**. Brasília: Departamento nacional da Produção Mineral, Boletim nº55, 152p. 1982.

ANEXOS

ANEXO 1 – Composição química das amostras de bauxita nodular

ANEXO 2 – Teores, distribuição de massa de alumina aproveitável e sílica reativa para o material retido em 0,037 mm.

ANEXO 3 – Histogramas representativos dos teores de alumina aproveitável, sílica reativa e Fe_2O_3 por fração granulométrica.

ANEXO 1

Composição química das amostras de bauxita nodular (ND)

Amostra	Teores dosados (% em massa)						PPC (%)	
	Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂		SiO ₂ qz
01 ND	38,8	10,6	54,2	7,62	10,8	1,97	0,20	25,4
02 ND	33,4	13,6	50,5	10,7	14,3	2,04	0,72	22,5
03 ND	24,6	16,3	45,7	16,5	16,8	1,87	0,51	19,1
04 ND	34,5	7,10	50,1	7,12	12,6	1,81	5,46	28,4
05 ND	37,5	11,7	50,9	8,05	12,7	2,04	1,02	26,3
06 ND	28,4	16,1	48,0	10,7	16,3	1,80	0,18	23,2
07 ND	31,0	14,4	51,4	8,29	15,3	2,04	0,95	23,0
08 ND	27,3	15,5	49,5	9,16	16,5	1,96	0,99	22,9
09 ND	43,6	8,68	53,6	6,69	11,6	1,53	2,93	26,6
10 ND	44,2	7,93	55,1	7,42	10,4	1,82	2,49	25,2
11 ND	32,2	13,8	50,5	7,23	15,4	2,06	1,60	24,9
12 ND	30,8	15,2	49,0	7,76	18,1	2,20	2,91	23,0
13 ND	28,3	17,3	51,1	2,96	20,2	2,84	2,93	22,9
14 ND	36,2	9,47	52,1	10,9	9,79	1,91	0,32	25,3
15 ND	41,8	8,41	51,6	7,74	13,0	1,97	4,60	25,7
16 ND	31,9	15,8	50,4	4,67	15,9	2,51	0,15	26,5
17 ND	18,3	24,5	44,4	3,68	29,2	3,03	4,75	19,6
18 ND	39,3	9,61	51,9	7,71	13,7	1,87	4,08	24,9
19 ND	26,3	17,7	45,1	8,93	24,5	1,89	6,84	19,6
20 ND	26,0	19,1	45,7	6,78	27,6	2,17	8,51	17,8
21 ND	20,0	21,7	45,7	3,38	28,4	3,06	6,72	19,4
22 ND	34,5	11,9	51,1	9,13	13,8	1,99	1,95	23,9
23 ND	34,8	12,0	52,4	9,76	12,0	1,55	0,06	24,3
24 ND	29,4	12,6	50,3	11,1	13,5	1,69	0,92	23,4
25 ND	31,9	12,8	51,4	9,05	13,6	1,83	0,74	24,2
26 ND	28,1	12,8	49,0	12,4	13,8	1,87	0,95	22,9
27 ND	31,5	12,7	51,0	8,59	14,8	1,97	2,09	23,6
28 ND	22,9	18,4	39,5	19,0	24,4	1,84	5,98	15,4
29 ND	29,5	14,3	50,0	9,45	15,7	2,11	1,39	22,8
30 ND	30,4	13,7	49,8	8,46	16,7	1,97	3,04	23,1
Média calc.	31,6	13,8	49,7	8,70	16,4	2,04	2,53	23,2

Teores de quartzo (SiO₂ qz) calculados pela diferença entre SiO₂ total e SiO₂ reativa.

ANEXO 2

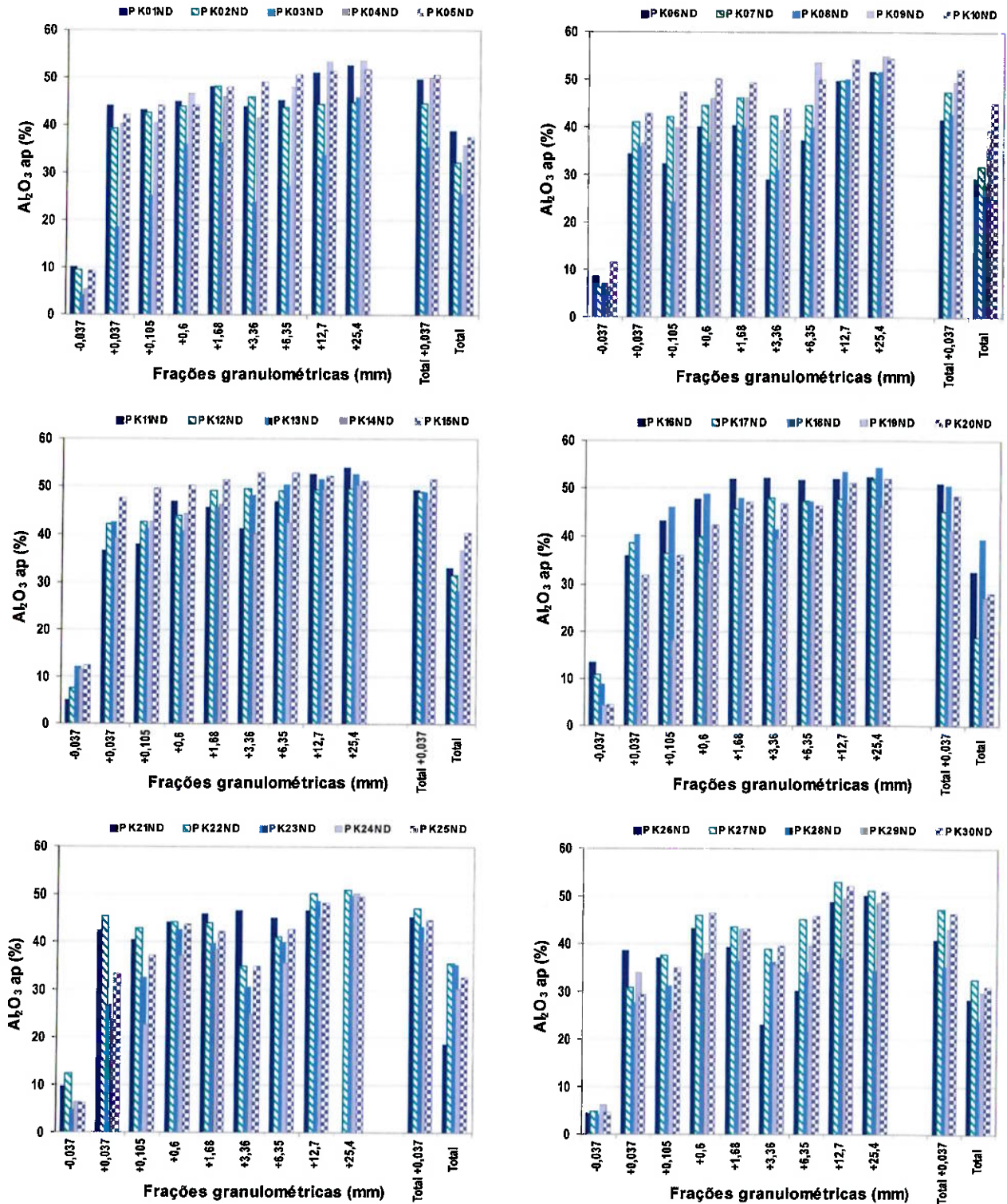
Teores, distribuição de massa de alumina aproveitável e sílica reativa para o material retido em 0,037 mm

Amostra	Massa retida (%)	Teores (%)							PPC (%)	Distribuição (%)	
		Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂ qz		Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re
01 ND	72,2	49,7	4,68	56,6	7,61	4,90	1,39	0,21	29,5	92,7	33,3
02 ND	64,3	44,7	5,61	53,9	12,1	6,13	1,21	0,52	26,6	89,3	26,5
03 ND	68,9	35,6	8,77	46,7	18,5	11,2	1,33	2,41	22,3	94,8	38,8
04 ND	68,3	49,9	5,59	56,5	5,64	7,23	1,22	1,64	29,4	95,2	28,4
05 ND	68,3	50,6	4,29	56,8	7,38	5,10	1,37	0,81	29,3	92,1	23,4
06 ND	62,6	41,7	8,32	53,0	10,6	9,46	1,21	1,13	25,7	89,0	30,7
07 ND	61,8	47,6	5,81	56,0	8,21	6,26	1,25	0,44	28,3	92,5	25,2
08 ND	58,6	43,0	7,79	54,1	9,05	9,34	1,19	1,55	26,3	89,5	25,8
09 ND	76,7	49,5	5,62	56,5	6,79	5,89	1,20	0,27	29,6	96,3	38,0
10 ND	82,6	52,2	4,45	57,2	5,80	4,80	1,47	0,35	30,8	95,6	42,2
11 ND	63,0	49,4	5,90	55,3	5,67	7,14	1,26	1,24	30,6	94,3	25,6
12 ND	58,1	49,0	5,16	54,5	7,27	6,94	1,41	1,79	29,8	89,9	18,8
13 ND	43,9	49,0	7,14	56,2	2,12	8,74	1,73	1,61	31,2	75,7	16,2
14 ND	70,3	47,2	4,47	53,7	10,8	5,44	1,38	0,96	28,7	90,7	29,6
15 ND	71,6	51,6	3,61	56,4	6,50	4,33	1,48	0,72	31,3	91,3	26,5
16 ND	50,8	51,2	5,31	57,7	3,16	6,06	1,75	0,75	31,3	79,6	14,9
17 ND	22,9	45,4	7,64	55,4	2,69	9,64	1,52	2,00	30,7	55,3	6,85
18 ND	73,2	50,7	4,84	55,8	6,11	5,68	1,44	0,84	31,0	94,0	30,7
19 ND	62,3	41,3	8,60	51,8	9,61	10,9	1,19	2,25	26,5	94,3	32,0
20 ND	54,1	48,4	6,43	54,6	5,63	8,32	1,23	1,89	30,2	92,9	19,2
21 ND	25,2	45,3	8,71	57,7	2,10	10,7	1,44	2,00	28,1	61,1	10,2
22 ND	66,9	47,1	6,02	55,6	9,67	7,03	1,10	1,01	26,6	88,4	32,7
23 ND	79,2	43,4	7,45	53,9	10,2	8,57	1,07	1,12	26,2	97,1	53,3
24 ND	70,8	40,1	7,67	52,1	11,8	10,1	0,99	2,44	25,0	93,8	44,0
25 ND	68,4	44,8	7,07	54,8	9,89	8,46	1,08	1,40	25,8	93,9	43,2
26 ND	65,8	40,8	7,34	49,1	14,9	9,85	1,24	2,51	24,9	94,6	34,0
27 ND	65,3	47,4	6,06	56,1	8,38	7,31	1,01	1,25	27,2	94,8	32,7
28 ND	63,4	35,3	6,29	41,3	26,6	8,51	1,05	2,22	22,5	93,4	28,2
29 ND	63,8	43,2	6,69	54,7	9,54	7,34	1,19	0,65	27,3	92,5	32,1
30 ND	63,5	46,5	6,44	53,9	8,39	8,92	1,04	2,48	27,8	94,6	27,1
Média calc.	62,9	46,1	6,33	54,3	8,76	7,68	1,28	1,35	28,0	89,6	29,0

Teores de quartzo (SiO₂ qz) calculados pela diferença entre SiO₂ total e SiO₂ reativa.

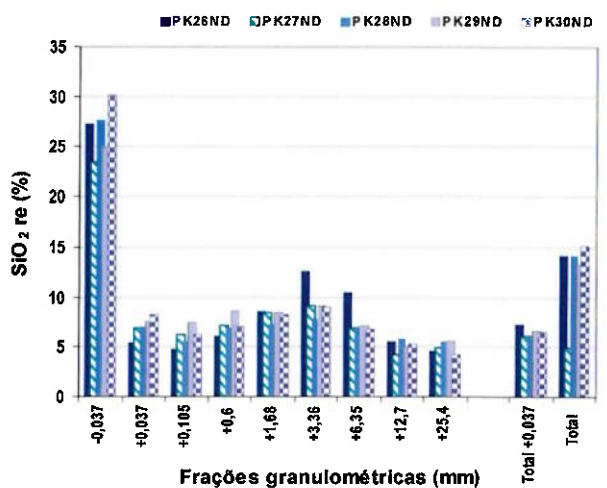
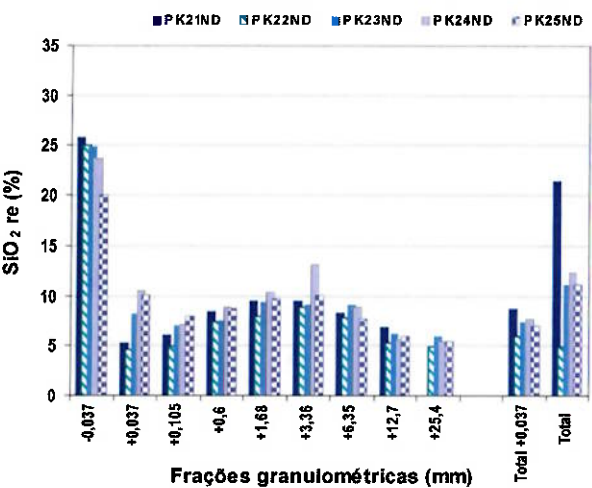
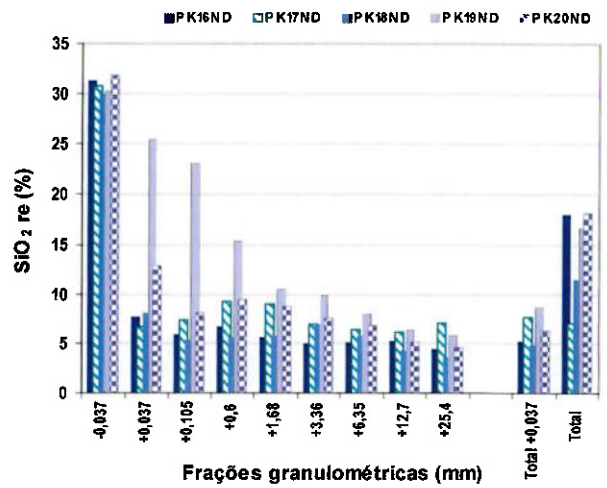
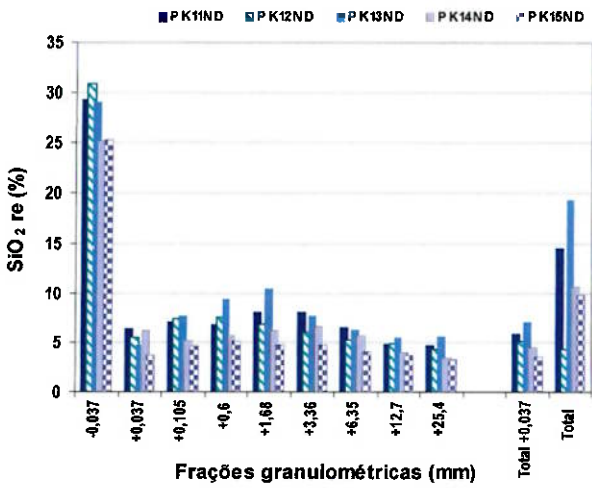
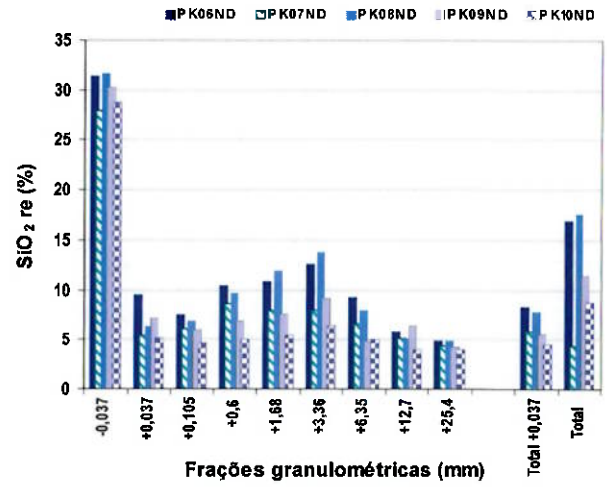
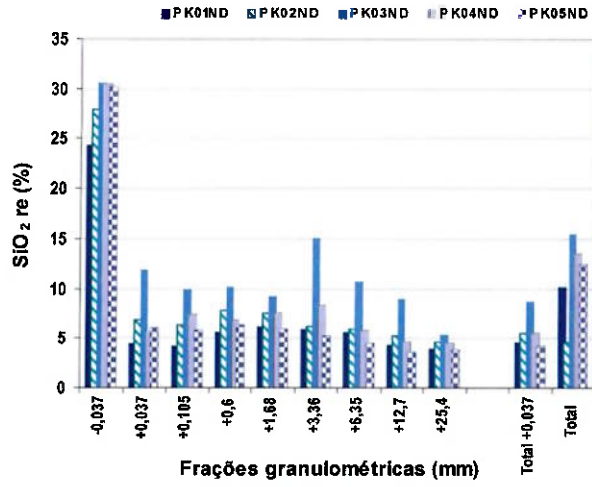
ANEXO 3

Histogramas representativos dos teores de alumina aproveitável por fração granulométrica.



ANEXO 3

Histogramas representativos dos teores de sílica reativa por fração granulométrica.



ANEXO 3

Histogramas representativos dos teores de Fe₂O₃ por fração granulométrica.

