

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

10

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA
DE PORTO TROMBETAS / MINERAÇÃO RIO DO NORTE**

Caio de Oliveira Santos

São Paulo,

2009

EPMI
TF-2009
Sa59c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA
DE PORTO TROMBETAS / MINERAÇÃO RIO DO NORTE**

Trabalho de Formatura do programa de graduação
em Engenharia de Minas da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo

Orientado: Caio de Oliveira Santos

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.

Santos, Caio de Oliveira

Caracterização Tecnológica do Horizonte de Laterita de Porto Trombetas / Mineração Rio do Norte. São Paulo, 2009.

15 p. : il. ; 30cm.

Trabalho de Formatura, apresentada à Escola Politécnica/USP

Orientador: Kahn, Henrique

TF-2009

Sa59e

lyrw 1818757

M2009g

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005907A

TF-2009

Sa59e

Syruw 1818757

M2009g

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005907A

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA DE PORTO TROMBETAS / MINERAÇÃO RIO DO NORTE

Caio de Oliveira Santos

E-mail: caiosantos@gmail.com

RESUMO

A jazida de Porto Trombetas, Pará contida na bacia do Baixo-Amazonas é formada por rochas sedimentares Paleozóicas possuindo perfis bauxíticos. Neste local são encontradas três distintas camadas de bauxita denominadas nodular, laterítica e maciça. Nos dias de hoje, apenas a camada de bauxita maciça é beneficiada devido a altos teores de contaminantes presentes na bauxita nodular (sílica reativa) e laterita (óxidos de ferro).

A laterita representa cerca de 20% do perfil bauxítico, apresentando teores elevados de Fe_2O_3 se comparados a bauxita maciça. Atualmente, o que é lavrado desta camada pode ser utilizado através da blendagem com a bauxita maciça para o beneficiamento na produção de alumina. Porém, devemos estudá-la a fim de poder aproveitá-la de forma pura, sem a necessidade de blendagem.

Neste trabalho serão apresentados resultados referentes à caracterização tecnológica de 25 amostras de laterita, submetidas a operações unitárias como britagem e peneiramento, assim como análises de aspecto químico e físico. Também serão comparados diferentes métodos de enriquecimento das lateritas, tais como, separação magnética e por líquidos densos além de associações mineralógicas por análise de *clusters*. Os resultados serão comparados a amostras de bauxita maciça submetidas aos mesmos ensaios para que se estabeleça uma correlação.

Os resultados sugerem que a camada laterita pode ser aproveitada para o beneficiamento da bauxita de forma não blendada. Porém, a separação por líquidos densos deverá ser realizada para que ocorra o enriquecimento da alumina aproveitável bem como a redução nos teores de sílica reativa e de óxidos de ferro presentes na laterita.

PALAVRAS-CHAVE: bauxita; laterita; Porto Trombetas; caracterização tecnológica

ABSTRACT

Porto Trombetas deposit, located in Pará (Northern Brazil), encompassed by the Baixo-Amazonas basin is formed by sedimentary rocks that contain a bauxitic profile. This profile consists of three different layers: nodular bauxite, ferruginous nodule and bauxite. Nowadays, only the bauxite layer is processed due to high grade of contaminants occurring in the nodular bauxite layer (reactive silica) and the ferruginous nodule (iron oxide).

The ferruginous nodules represent 20% of the volume in the bauxitic profile, with elevated grade of iron oxide if compared to bauxite. Presently, what is extracted from this layer is blended with bauxite for alumina processing. However, we should develop studies in order to utilize it purely, without any need in blending it.

This paper brings forward results relative to the technological characterization of 25 samples of ferruginous nodules that were submitted to several unit operations including crushing and sieving. Chemical and physical analyses were performed along with diverse enrichment processes including magnetic and heavy liquids separations. Cluster analyses were also developed during the project. The results were compared to bauxite samples submitted to the same experiments to establish a correlation between samples.

The results obtained suggest that the ferruginous nodules can be used independently in order to process alumina. Nevertheless, the heavy liquid separation should be applied in order to enrich the grades of recoverable alumina besides decreasing the amounts of reactive silica and iron oxides present in the ferruginous nodules.

KEY-WORDS: bauxite; laterite; Porto Trombetas; process mineralogy

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu Professor e orientador Henrique e a minha co-orientadora Carina por me darem a oportunidade de trabalhar junto com eles no Projeto Kuka e por acreditarem e me auxiliarem no desenvolvimento do projeto. Agradeço por despertarem meu interesse por projetos dedicados exclusivamente à engenharia, já que esta paixão vinha diminuindo ao longo dos árduos anos de Escola Politécnica.

Aos funcionários do laboratório, Manu, André, Mari, Liz, Jú, Ilda, Rose e Freud, por toda ajuda e conselhos durante a execução do projeto e especialmente ao Daniel, por também aturar os longos dias em Diadema além de toda a ajuda durante o trabalho.

Aos os funcionários laboratório, Rafão, Rafael, Juninho, Rogério, Ailton e Lino por toda a ajuda durante a parte braçal e em especial ao Juscelino, Carlinhos, Vavá e Erílio por uma dedicação extraordinária no projeto e contribuindo para o meu aprendizado.

Aos alunos e colegas de trabalho Gustav, Sorin, Lucas, Vivi, Renata, Rafael e Riggs por todo auxílio durante o projeto e especialmente ao Jaime pelo trabalho desenvolvido e pelo grandioso trabalho que fizemos durante todo esse período.

Aos amigos que deixam a Poli mais divertida, sem eles, a Poli não teria graça.

Aos professores, que sempre contribuíram para o meu aprendizado.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha namorada Paula e minha família: mãe, pai, Pedro e Lara pelo apoio incondicional e pelo carinho. Sem isso jamais teria conseguido.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1 Geologia	1
2.2 Lavra e beneficiamento de bauxita.....	3
2.3 Produção de alumina	4
2.4 Produção de alumínio.....	5
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	6
3.1 Procedimentos analíticos	7
4 RESULTADOS	7
4.1 Composição química	7
4.2 Análise granuloquímica.....	8
4.3 Agrupamento de amostras por difração de raios X e composição mineralógica	8
4.4 Separação mineral em líquido denso	10
4.5 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS)	10
4.6 Separação magnética via úmida (tambor de terras raras)	11
4.7 Produto grosso moído.....	11
4.7.1 Separação mineral em líquido denso (grosso moído)	11
4.7.2 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS – grosso moído)	12
4.7.3 Separação magnética via úmida (tambor de terras raras – grosso moído)	12
4.8 Discussão de resultados.....	13
5 CONCLUSÕES	13
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	14

ANEXO 1 - Gráficos de distribuição de massa acumulada acima

ANEXO 2 - Histograma de Al_2O_3 ap, SiO_2 re e Fe_2O_3 por fração granuloquímica

ANEXO 3 – Dendogramas da análise por agrupamento

ANEXO 4 - Composição química por classe resultante do agrupamento

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Perfil geológico típico de bauxita de Porto Trombetas, PA (MRN, 2009).....	2
Figura 2 – Representação das camadas de bauxita	2
Figura 3 – Fluxograma esquemático do processo Bayer (adaptado de Buchner et al. ,1989).....	4
Figura 4 – Procedimento experimental	6
Figura 5 – Teores de alumina aproveitável e sílica reativa das amostras estudadas - laterita.....	7
Figura 6 – Difractogramas comparativos dos grupos definidos para as amostras tal qual	9
Figura 7 – Difractogramas comparativos das classes definidas para o material retido em 0,037 mm.....	9

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Insumos utilizados na produção de uma tonelada de alumina (ABAL, 2007, adaptado).....	4
Tabela 2 – insumos para a produção de uma tonelada de alumínio primário	5
Tabela 3 – Composição química das classes resultantes do agrupamento por difração de raios X	8
Tabela 4 – Composições químicas das classes agrupadas (material retido em 0,037 mm) por difração de raios X.....	9
Tabela 5 – Sumário dos resultados da separação em líquidos densos	10
Tabela 6 – Sumário separação magnética (WHIMS).....	10
Tabela 7 – Sumário separação magnética (tambor de RE)	11
Tabela 8 – Sumário separação líquido denso - grosso moído	11
Tabela 9 – Sumário separação magnética - grosso moído (WHIMS).....	12
Tabela 10 – Sumário separação magnética - grosso moído (tambor de RE)	12
Tabela 11 – Sumário dos resultados de separação da laterita e da bauxita maciça	13

1 INTRODUÇÃO

Bauxita é a matéria prima utilizada na produção de alumínio. Além desta utilização, também se pode observar aplicações não metalúrgicas significativas como, por exemplo, abrasivos, cimentos, produtos químicos e refratários.

Bauxita ocorre naturalmente, como resultado do intemperismo de rochas ígneas ou sedimentares ricas em alumínio. É composta de um ou mais minerais de hidróxido de alumínio, além de sílica (SiO_2), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de titânio (TiO_2) e outras impurezas de presentes em menores quantidades. Os principais minerais de alumínio formadores de bauxita são: gibbsita, bohemita e diásporo (hidróxidos de alumínio).

Aproximadamente 85% de bauxita lavrada é utilizada na produção de alumínio, 10% em utilização não-metálica (diversas formas de alumina) e o restante para aplicações sem teor metalúrgico adequado para produção de alumínio. A maior parte de bauxita lavrada, portanto, é utilizada na manufatura de alumina, através do processo Bayer; esta alumina uma vez submetida ao processo Hall-Héroult (redução eletrolítica) permite a obtenção de alumínio metálico. Dentre os fatores fundamentais que viabilizam o aproveitamento da bauxita incluem-se os teores de alumina aproveitável (alumina passível de recuperação pelo processo Bayer, relacionada aos hidróxidos de alumínio) e os teores de sílica reativa (sílica solúvel no processo, que consome NaOH no processo Bayer, proveniente de argilominerais).

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de bauxita (2007), sendo os principais depósitos situados em Porto Trombetas, Paragominas, Poços de Caldas e Ouro Preto. A maior produção vem de do distrito de Trombetas, localizado no Estado do Pará, cerca de 880 km de Belém, PA e 450 km de Manaus, AM. As instalações industriais estão localizadas no município de Oriximiná, à margem direita do rio Trombetas a 50 km da confluência com o rio Amazonas. Este empreendimento é operado pela Mineração Rio do Norte (MRN), uma associação de diversas empresas, nacionais e internacionais, constituída em 1974 e tendo como principais acionistas a Vale (40%), BHP Billiton (14,8%), Rio Tinto Alcan (12%) e a Companhia Brasileira de Alumínio (10%).

As operações da MRN consistem na extração do minério, beneficiamento, transporte ferroviário, secagem e embarque em navios. A capacidade atual de produção instalada é de 18,1 Mtpa, com operação de três minas: Saracá, Almeidas e Aviso. O minério (bauxita maciça) se encontra a aproximadamente 8m de profundidade, coberto por uma camada de solo orgânico, revestido por uma vegetação densa. Abaixo deste solo orgânico, ocorrem camadas de argila, bauxita nodular e laterita ferruginosa.

Foram estudadas detalhadamente 25 amostras de laterita. O procedimento experimental envolveu sucessivas etapas de atrição e peneiramento, seguida por separações em líquidos densos e separações magnéticas em altas e baixas intensidades de campo. Todos os produtos foram analisados do ponto de vista químico (fluorescência de raios X quantitativa) e mineralógico (difração de raios X e análise por agrupamento). Os resultados obtidos foram comparados com valores médios de amostras de bauxita maciça submetidas ao mesmo procedimento.

O objetivo do trabalho foi determinar a composição química e mineralógica das amostras e avaliar a recuperação e os teores de Al_2O_3 aproveitável e SiO_2 reativa nos produtos de peneiramento e resultantes de ensaios de separação magnética e separação por líquidos densos, assim como estabelecer correlações entre as amostras de laterita e de bauxita maciça.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geologia

Alumínio é o elemento metálico mais abundante presente na crosta terrestre, representando cerca de 8% da mesma. A bauxita, minério de alumínio, ocorre como produto de intemperismo de rochas ricas em alumínio formando depósitos residuais.

A bauxita é classificada como uma laterita, ou seja, rica em óxidos de ferro, de alumínio ou ambos. Quando enriquecida em óxidos e hidróxidos de ferro, é denominada laterita ferruginosa e se enriquecida em hidróxidos de alumínio, como gibbsita, bohemita ou diásporo, é denominada bauxita. De acordo com o Hill e Sehnke (2006) a classificação dos depósitos varia entre laterita ferruginosa, laterita aluminosa, laterita e bauxita, dependendo dos teores de ferro, alumínio e sílica reativa.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA DE PORTO TROMBETAS / MINERAÇÃO RIO DO NORTE

No processo de intemperismo, o alumínio é retido em minerais de hidróxido de alumínio enquanto outros constituintes são lixiviados da rocha original. Durante o tempo, sob condições favoráveis, como clima quente e úmido, alternância de estações secas e chuvosas além de drenagem adequada, rochas aluminosas deram origem a formação de depósitos de bauxita.

Segundo Hill e Sehnke (2006) grande parte dos depósitos consistem apenas de minerais de hidróxido de alumínio (gibbsita e/ou bohemita) e hematita e goethita como impurezas e principais causadoras da coloração marrom-avermelhada característica dos depósitos. Usualmente, estas impurezas ocorrem como nódulos ou como concreções, sendo comuns em depósitos de bauxita na Jamaica, no Suriname e na região Norte do Brasil.

Depósitos de bauxita tem uma variação muito grande em relação às circunstâncias geológicas e forma física, e por isso, existem diversas formas de classificação propostas por geólogos para descrever sua ocorrência. Classificações de depósitos foram feitas caracterizando a sua composição química, origem geológica, composição mineralógica, estrutura, e posição topográfica, dentre outras. Uma das principais províncias de bauxita do mundo, denominada Província Sul Americana (Hill e Sehnke, op. cit.) ocorre desde a Colômbia, passando pela Venezuela, Guiana, Suriname, Guiana Francesa e Brasil. Trata-se da província com maiores teores de alumina aproveitável e também possui grande volume, o que ressalta sua importância.

Segundo Hernalsteens e Lapa (1988), a bacia do Baixo-Amazonas (localização de Porto Trombetas), é formada por rochas sedimentares Paleozóicas. Os depósitos são constituídos de arenitos, siltitos e em algumas oportunidades de conglomerados. A região dos perfis bauxíticos é um grande platô, onde a superfície de erosão está situada em cerca de 200m de altitude. Este é o local onde são encontradas as lateritas, que estão erodidas. As lateritas são capeadas por uma camada de argila arenosa, denominada Argila Belterra. Um perfil bauxítico típico é apresentado na Figura 1.

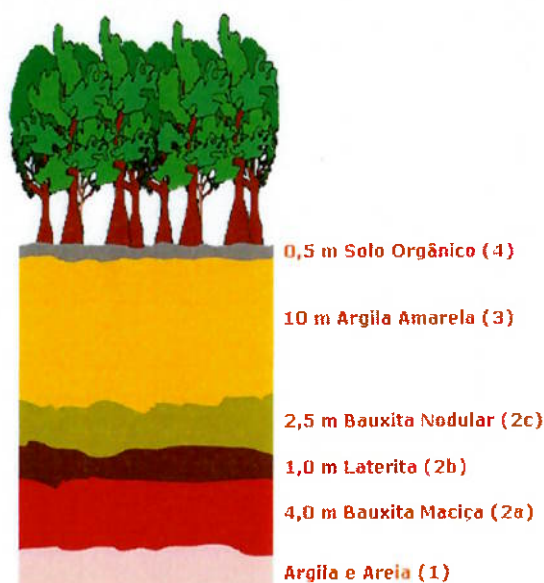


Figura 1 – Perfil geológico típico de bauxita de Porto Trombetas, PA (MRN, 2009)

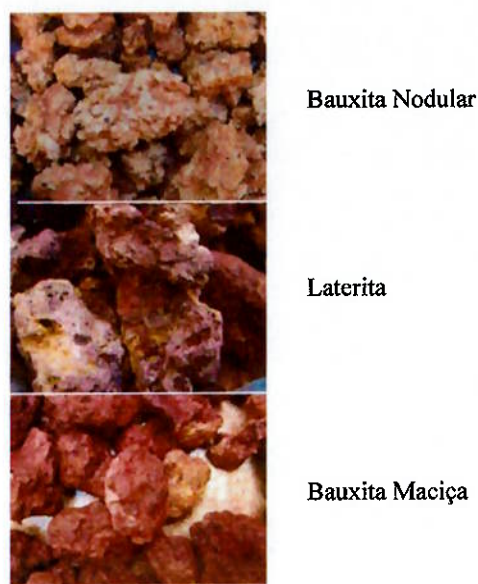


Figura 2 – Representação das camadas de bauxita

A camada de Argila Belterra em Porto Trombetas é constituída de caulinita (80%) e quartzo, permeável e uniforme com espessura máxima no centro do platô, afinando nas margens. Abaixo da camada de argila amarela, encontra-se a zona da laterita, subdividida em zonas de bauxita nodular, laterita e bauxita maciça, que estão representadas na Figura 2.

Segundo Hernalsteens e Lapa (1988) a camada de bauxita nodular tem espessura média de 1,3 m, mas pode chegar até 2,5 m, representando 22% da reserva. Esta camada consiste de nódulos arredondados, com grande variação de tamanho e constituídos de gibbsita finamente cristalizada. A bauxita nodular contém mais sílica reativa que as outras camadas componentes da zona da laterita.

A camada de laterita é visivelmente distinta da nodular, devido ao elevado teor de Fe_2O_3 . A espessura média desta camada chega a 1,2 m podendo conter em alguns trechos alta percentagem de alumina. A parte superior que está em contato com a camada nodular apresenta grandes nódulos, cimentados por óxido de ferro, enquanto nos outros locais, observam blocos mais compactos, onde as cavidades estão preenchidas por argila. Esta camada apresenta gibbsita, hematita, anatásio, caulinita, goethita e outros minerais em menor quantidade.

A camada de bauxita maciça é a mais espessa entre todas as subzonas, em média de 4,5 m podendo chegar até 7,0 m de espessura. O topo da camada contém uma capa dura de bauxita ferruginosa, quartzosa; a porção intermediária é formada por bauxita com variados tipos de textura enquanto na camada mais inferior os septos são de gibbsita cristalizada com espaços preenchidos por gibbsita, substituídos por argila caulínica.

2.2 Lavra e beneficiamento de bauxita

Segundo Hill e Sehnke (op. cit.), cerca de 90% da bauxita é lavrada a céu aberto através do método de tiras, enquanto ainda existem algumas operações subterrâneas, principalmente na China, na Rússia e no Leste Europeu. Nas operações a céu aberto, a bauxita é extraída de um estrato de aproximadamente 5 metros de espessura que está abaixo de uma camada de estéril com até 10 metros de espessura o qual é utilizado para programas de restauração em minas.

Normalmente, o beneficiamento da bauxita é limitado a britagem, lavagem e secagem do minério bruto. Após a lavra da bauxita, ocorre a britagem e, em seguida, o peneiramento/ciclonagem para a remoção de finos. Durante este processo, também ocorre a lavagem da bauxita, a fim de eliminar argila e contaminantes de sílica (Hernalsteens e Lapa, op. cit). Em situações onde o teor de ferro é elevado, operações unitárias como separação magnética ou jigagem são realizadas para reduzir estes contaminantes (Chaves, 2007).

A etapa de secagem também é frequentemente realizada, pois a bauxita bruta apresenta umidade de 5 a 30%. Como o minério tem de ser transportado por distâncias relativamente grandes, é de suma importância que esta umidade seja reduzida. Estudos comprovam que o custo benefício da secagem é justificável devido a questões de transporte.

De acordo com Hernalsteens e Lapa (op. cit), as operações de lavra em Porto Trombetas se resumem as seguintes etapas: desmatamento, decapeamento, perfuração e desmonte, escavação, carregamento, transporte e recuperação das áreas mineradas.

O desmatamento consiste na derrubada da mata por meio de tratores; o decapeamento na remoção do solo vegetal, da argila, da bauxita nodular e da laterita. Os equipamentos utilizados incluem *walking draglines* e *motorscrapers*. A perfuração e desmonte ocorrem para facilitar a escavação, afrouxando as camadas de bauxita subsequentes, porém nem sempre isto é realizado. As operações de escavação e carregamento do minério são feitas por dois sistemas, utilizando retro-escavadeiras hidráulicas e um trator de esteira, que permitem grande seletividade no contato entre o minério e a argila do piso, assim como a facilidade na drenagem nas frentes de escavação. O minério lavrado é transportado via caminhões até uma unidade de britagem e daí encaminhado por transportador de correias até a usina de beneficiamento que processa minério proveniente das 3 minas.

A etapa de beneficiamento em Porto Trombetas se assemelha ao padrão empregado no processamento de bauxita, porém é destacada a recuperação dos finos e dos superfinos. O *Run of Mine* é classificado através de um alimentador de rolos com abertura de 7,62 cm. O retido é alimentado até um britador de martelos, com abertura idêntica ao de alimentador, resultando em um produto cerca de 95% abaixo de 3" (7,62cm).

Na operação da MRN (Mineração Rio do Norte) o minério, que chega com 15% de umidade, recebe uma adição de água, tornando-o diluído com concentração de 60 a 70% de sólidos. Após a lavagem, a polpa é peneirada em peneiras rotativas, onde as frações entre 25,4 mm e 6,35 mm são alimentadas para peneiras vibratórias, que funcionam como peneiras desaguadoras. A fração abaixo de 6,35 mm é peneirada, através de peneiras vibratórias, em malha 8# (2,36 mm) e 14# (1,18 mm). A fração maior que 6,35 mm compõe a fração maior que 14# proveniente do segundo peneiramento e, através de correias transportadoras, são levados diretamente a secagem. Já a fração abaixo de 14# é transferida para as instalações de recuperação de finos.

A recuperação de finos e ultrafinos consiste em uma bateria de ciclonagem primária, em seguida por uma ciclonagem secundária, que é alimentada pelo *underflow* da ciclonagem primária. O *underflow* da ciclonagem secundária é filtrado. A recuperação de superfinos (fração do minério entre 150# e 400#) foi desenvolvida pela MRN e representou um aumento de 7% na recuperação do R.O.M.

2.3 Produção de alumina

Praticamente toda alumina produzida é proveniente do processo patenteado por Karl Josef Bayer em 1888. O processo se resume a lixiviação da bauxita na presença de hidróxido de sódio (NaOH) em condições elevadas de temperatura e pressão. Em seguida é feita a separação do produto resultante aluminato de sódio (NaAlO_2) e a precipitação seletiva do alumínio como hidróxido de alumínio (Al(OH)_3). Um fluxograma esquemático do processo é apresentado na Figura 3.

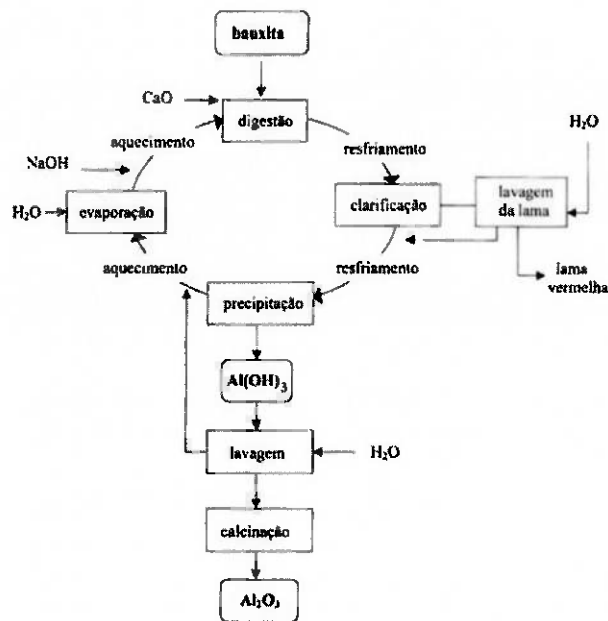


Figura 3 – Fluxograma esquemático do processo Bayer (adaptado de Buchner et al. ,1989)

As condições de processamento, como a temperatura de lixiviação, concentração de soda cáustica e custos operacionais são influenciadas diretamente pelos teores de alumínio, sílica reativa e óxido de ferro. As condições do processo são influenciadas pela proporção relativa entre minerais de alumínio, ferro e sílica. Cada planta de alumina, portanto, tem características únicas, o que torna muito difícil o processamento de outros tipos de bauxita a não ser o que foi levado em conta no dimensionamento da usina.

A alumina passível de extração no processo Bayer é denominada alumina aproveitável. A sílica insolúvel é constituída essencialmente por quartzo, enquanto a sílica presente nos argilominerais, tais como caulinita, é denominada sílica reativa, pois reage com a soda cáustica formando um composto insolúvel conhecido com bayerita.

Os insumos necessários para a produção de 1 t de alumina são apresentados na Tabela 1. Deve-se ressaltar a quantidade de energia elétrica necessária para a produção de alumina, assim como o óleo combustível utilizado durante o processo, fato que leva o alumínio a ser conhecido como energia em estado sólido.

Tabela 1 – Insumos para a produção de uma tonelada de alumina (ABAL, 2007, adaptado)

Bauxita	Cal	NaOH	Vapor	Óleo combustível	Floculante sintético	Energia elétrica	Água
1,9-3,4 t	10-50 kg	40-140 kg	1,5-40 t	80-130 kg	100-1000 g	150-400 kWh	0,5-2,0 m ³

Uma unidade de processamento Bayer consiste em um trocador de calor utilizado para o aquecimento e resfriamento da solução de soda caustica. A bauxita (gibbsita) é adicionada na temperatura máxima da solução (aproximadamente 150°C), a separação de lamas vermelhas é realizada em um estado intermediário de temperatura, enquanto a alumina é precipitada a menor temperatura.

Inicialmente, ocorre a moagem da bauxita em uma solução de soda cáustica pré-aquecida a 175°C e cal (que controla a quantidade de fósforo e aumenta a solubilidade da alumina na planta) em um moinho de bolas para que a superfície útil dos grãos minerais aumente, obtendo uma polpa que possa ser bombeada e em seguida digerida. A polpa resultante é bombeada com um adicional de solução de soda cáustica para digestores pressurizados com a utilização de vapor sob alta pressão para elevar a temperatura.

Os minerais portadores de alumínio, tais como gibbsita, bohemita e diásporo, são dissolvidos formando um licor de aluminato de sódio, ao passo que os outros componentes permanecem insolúveis. Os parâmetros mais importantes desta etapa são a granulometria da bauxita alimentada, o teor de alumínio e NaOH assim como a temperatura de alimentação. A sílica reativa reage com o alumínio em solução, formando um composto insolúvel, que contamina o produto e não tem como ser recuperado, consumindo soda cáustica e reduzindo a produção de alumina.

De acordo com Cundiff (1985), a lama vermelha é formada pelos minerais de ferro e titânio que não se dissolvem neste meio alcalino, nas dadas condições do processo. A lama vermelha é de manuseio bastante complexo, sendo removida por espessamento e filtragem. A minimização de perdas de reagente devido à sílica reativa é dada através de um processo denominado dessilificação, que busca reagir toda a sílica reativa possível antes da digestão, pois a solubilidade de sílica diminui com o aumento da concentração de alumina, principalmente na presença de alta concentração de NaOH.

A próxima etapa, a clarificação, consiste na separação do licor de aluminato de sódio por sedimentação. Floculante é adicionado à solução resfriada para a retirada da lama vermelha. Qualquer tipo de resíduo de minerais de alumínio na lama vermelha pode precipitar prematuramente, interferindo no processo e reduzindo sua recuperação. A lama vermelha é espessada e lavada para a recuperação de soda cáustica e o licor filtrado é enviado aos precipitadores.

A alumina dissolvida pela digestão é recuperada do licor através de reações de cristalização com cristais de alumina, um processo tido como lento, apesar do número elevado de cristais e da grande concentração do licor. A primeira etapa da precipitação ocorre com a formação de pequenos núcleos de cristais, que se mantem do mesmo tamanho. Em seguida, estes cristais colidem, se aglomerando, porém se rompem na superfície de junção das partículas, formando novos cristais, que repetem a primeira etapa. Através da deposição de partículas de $Al(OH)_3$, os aglomerados se tornam mais resistentes, portanto crescem formando cristais de gibbsita que seguem no processo se forem grossos, enquanto a fração fina (sementes) é utilizada na repetição do processo de precipitação. Em seguida, ocorre a calcinação, onde a fração grossa é lavada, seca e calcinada em fornos produzindo alumina.

2.4 Produção de alumínio

O alumínio é obtido através do processo de Hall-Hèroult, que se resume à eletrólise de alumina em um banho de criolita $[(NaF)_3AlF_3]$, que atua como eletrólito e solvente da alumina. A passagem de uma corrente elétrica contínua através da solução decompõe a alumina. O oxigênio decomposto migra para o ânodo de carbono, onde reage, formando CO_2 na superfície anódica. O alumínio metálico surge na superfície catódica. Para a produção de 1 t de alumínio, são necessários os insumos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Insumos para a produção de uma tonelada de alumínio primário

Alumina	Energia elétrica (c.c.)	Criolita	Fluoreto de alumínio	Coque de petróleo	Piche	Óleo combustível
1,9 t	15,0 MWh	8,0	19,7 kg	384 kg	117 kg	44,2 kg

O processo ocorre em cubas de redução, sendo diferenciadas pelo tipo de ânodo utilizado, que podem ser fabricados (pré-cozidos) ou do tipo Söderberg, onde um ânodo sólido é criado a partir da adição controlada de pasta de carbono na célula eletrolítica. Ambos os tipos de eletrodo são compostos por carvão e piche, que são consumidos em grandes quantidades durante a eletrólise.

A eficiência de deposição do alumínio sofre diminuição devido à deposição de íons não aluminosos do eletrólito sobre o cátodo, contaminando o alumínio produzido. Devido a isso, o alumínio liquefeito é refundido em cadinhos para purificar o produto final.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental exposto na Figura 4 envolveu sucessivas etapas de atrição e peneiramento, separações em líquidos densos e separações magnéticas em altas e baixas intensidades de campo, em 25 amostras de laterita. As amostras, cada qual com cerca de 100 kg e granulométrica inferior a 50 mm, foram encaminhadas pela MRN.

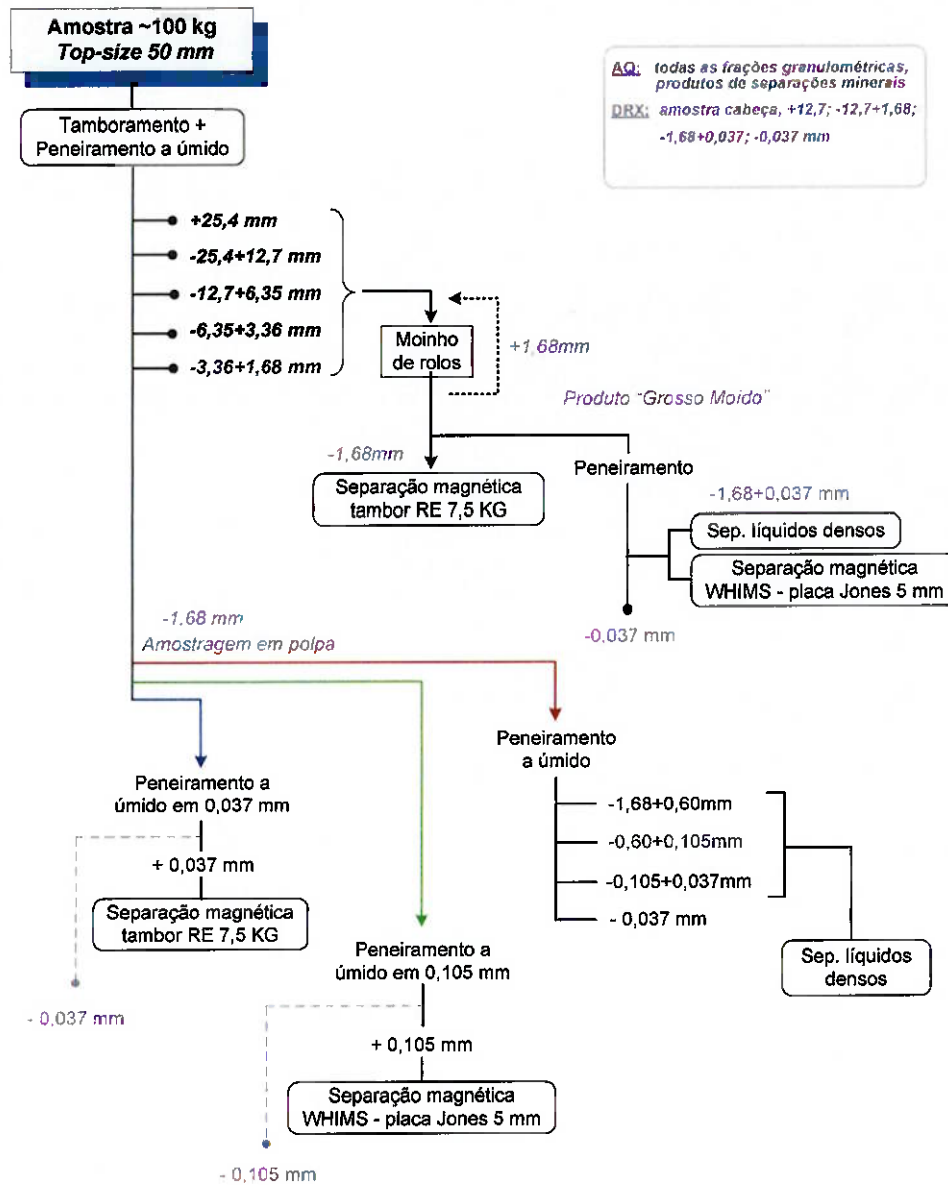


Figura 4 – Procedimento experimental

Os ensaios realizados em laboratório tentaram simular, da melhor forma possível, a etapa de beneficiamento da MRN. Inicialmente, as amostras foram mantidas sob agitação, por cerca de 4 minutos em uma betoneira (cerca de 40% de sólidos), para a desagregação da argila.

A lavagem da bauxita assim como a água utilizada durante o restante do processo foi muito superior a da utilizada industrialmente. Após esta etapa, todo o material foi peneirado a úmido em um peneirador mecânico, em peneiras quadradas de dimensões de 50 cm por 50 cm e aberturas de: 25,4; 12,7; 6,35; 3,36 e 1,68 mm.

O material retido em 1,68 mm foi amostrado e parte deste cominuído em circuito fechado de modo até 100% nesta mesma abertura gerando o produto determinado “grosso moído”.

Uma alíquota do produto “grosso moído” foi encaminhada para a separação magnética a úmido em tambor de terras raras (tambor RE), utilizando um campo de 7,5 kG. Outra alíquota do mesmo produto foi peneirada em 0,037 mm. Desta alíquota, o produto retido foi encaminhado para separação em líquidos densos, utilizando bromofórmio (densidade = 2,8 g/cm³), e para separação magnética de alta intensidade, via úmida, em equipamento WHIMS com placa Jones de 5 mm.

O material passante em 1,68 mm foi amostrado em polpa através de um amostrador rotativo, gerando quatro alíquotas. A primeira, após a remoção do passante em 0,037 mm por peneiramento a úmido, foi submetida a separação magnética em tambor de terras raras; a segunda, após a remoção do passante em 0,105 mm, envolveu a separação magnética de alta intensidade a úmido (WHIMS) com placa Jones 5 mm de abertura. A terceira foi submetida a separações em líquidos densos (bromofórmio) nas frações 0,60; 0,105 e 0,037 mm e a quarta foi mantida como contra-prova em caso de alguma eventualidade.

3.1 Procedimentos analíticos

Todos os produtos foram analisados do ponto de vista químico (fluorescência de raios X e via úmida para alumina aproveitável e sílica reativa) e mineralógico (difração de raios X e análise por agrupamento).

Análises químicas para a determinação de Al₂O₃, SiO₂, Fe₂O₃, TiO₂ foram efetuadas por fluorescência de raios X – FRX), Al₂O₃ aproveitável e SiO₂ reativa por via úmida

Análises por difratometria de raios X (DRX) foram realizadas para as amostras cabeça (Tal Qual) e frações retidas em 0,037 mm. Cada amostra foi pulverizada em moinho planetário, seguida de coleta de difratograma em equipamento X'Pert MPD, PANalytical. Os difratogramas foram submetidos à análise estatística através de análise por agrupamento (*cluster analysis*) com programa High Score Plus; amostras representativas de cada grupo foram objeto de análise mineralógica qualitativa.

4 RESULTADOS

4.1 Composição química

Os teores de Al₂O₃ aproveitável da amostra cabeça (tal qual) variam de 16,8 a 38,4%, os teores de SiO₂ reativa variam de 2,22 a 11,4% e os de Fe₂O₃ de 18,6 a 47,4%, indicando heterogeneidade nas amostras de laterita estudadas (Figura 5), além de elevados teores de ferro se comparados a bauxita maciça (cerca de 15,0 de Fe₂O₃ %). O teor médio de alumina aproveitável é de 23,9%, de sílica reativa é de 7,26% e de Fe₂O₃ é de 37,2%.

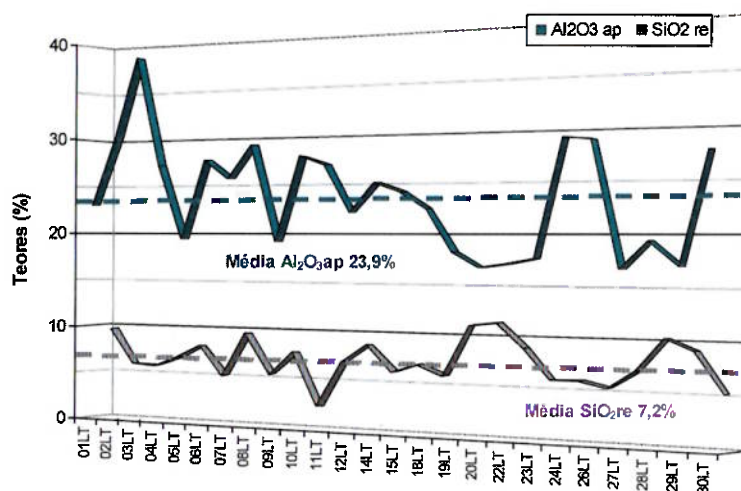


Figura 5 – Teores de alumina aproveitável e sílica reativa das amostras estudadas - laterita

4.2 Análise granuloquímica

As amostras de laterita apresentam um comportamento de distribuição granulométrica bastante semelhante, com grande quantidade de material passante em $-0,037$ mm (20 a 30%) e pouco material nas frações compreendidas no intervalo $-6,35+0,037$ mm. Das vinte e cinco amostras apenas a 10LT apresenta uma distribuição díspar, com grande quantidade de material retido nas frações mais grossas (especialmente $+25,4$ mm; $>40\%$) e pouca quantidade de fino abaixo de $0,037$ mm ($\sim 5\%$). Os gráficos de distribuição em massa acumulada acima são apresentados no *Anexo 1*.

Os teores de Al_2O_3 , SiO_2 reativa e Fe_2O_3 por fração granulométrica são apresentadas no *Anexo 2*. Os teores de alumina aproveitável das frações acima de $0,037$ mm tendem a serem maiores nas frações mais grossas porém não há grande discrepância para qualquer fração; por outro lado os teores da fração $-0,037$ mm são menores (próximos de 10%). A amostra 03LT apresenta teor mais elevado em relação às demais amostras.

Contrariamente, os teores de sílica reativa são substancialmente maiores na fração abaixo de $0,037$ mm, com teores próximos ou superiores a 25%; nas frações mais grossas esse valor é da ordem de 5%. Exceções são observadas para as amostras 15LT e 27LT, que possuem maior teor de sílica reativa na fração $-1,68+0,60$ mm (15 a 20%).

Já os teores de Fe_2O_3 estão compreendidos entre 30 a 45%, sendo que as amostras 03LT e 24LT apresentam teores mais inferiores à média, ao passo que as amostras 10LT, 18LT, 20LT, 22LT, 23LT e 27LT são mais ricas em ferro.

Verifica-se que há amostras que apresentam composições químicas muito distintas. A remoção da fração $-0,037$ mm gera um aumento médio de 25% relativos no teor de Al_2O_3 aproveitável e redução média de 40% relativos no teor de SiO_2 reativa. A recuperação em massa da fração $+0,037$ mm varia de 69 a 95%, entretanto grande parte das amostras tem entre 70 e 80% de massa retida.

4.3 Agrupamento de amostras por difração de raios X e composição mineralógica

O dendograma apresentado no *Anexo 3* é resultado da análise por agrupamento (*cluster*) que permitiu classificar as amostras de laterita em quatro grupos.

As principais distinções entre os grupos referem-se aos conteúdos relativos de gibbsita, caulinita e oxi-hidróxidos de ferro. A Tabela 3 apresenta as composições químicas das médias das classes e as respectivas parcelas de material retido em $0,037$ mm. Difrátogramas comparativos entre as amostras que melhor representam cada classe são apresentados na Figura 6. Análise mais detalhada dos grupos também é representada no *Anexo 4*, evidenciando também uma elevada correlação entre estes parâmetros para cada agrupamento de amostras.

Tabela 3 – Composição química das classes resultantes do agrupamento por difração de raios X, amostra TQ

Grupos do cluster	Teores (%)							Massa (%) $+0,037$ mm
	Al_2O_3 ap	SiO_2 re	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2	PPC	
Grupo 1	38,4	5,81	47,5	18,6	8,43	1,46	24,1	83,8
Grupo 2	27,6	6,95	35,7	32,8	10,2	1,46	19,8	77,4
Grupo 3	24,5	6,03	32,1	39,9	8,79	1,42	17,8	79,1
Grupo 4	18,2	9,09	30,5	40,4	13,1	1,39	14,6	76,3

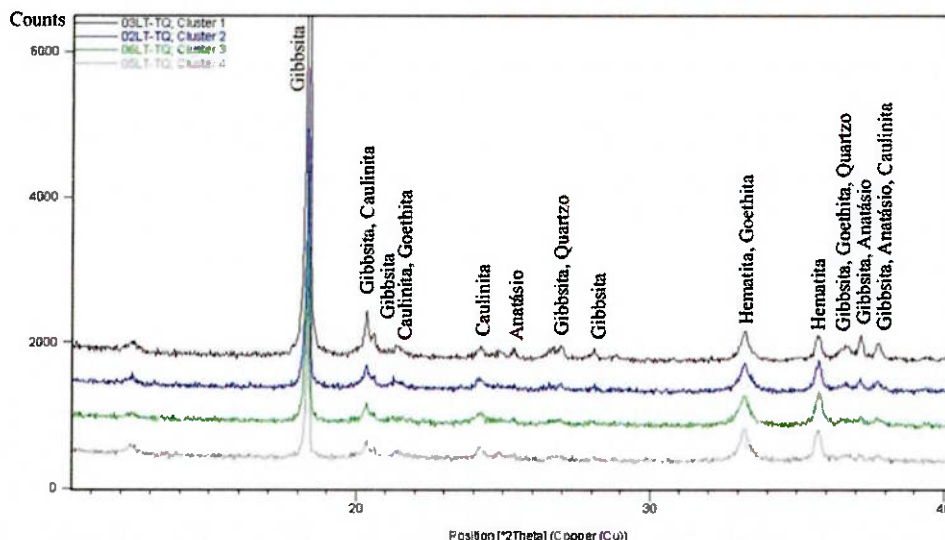


Figura 6 – Difratomogramas comparativos dos grupos definidos para as amostras tal qual

A análise por agrupamento foi também realizada para as frações acima de 0,037 mm, sendo estabelecidos quatro grupos, dos quais um contém apenas uma amostra com elevado teor de alumina aproveitável e baixo teor de sílica reativa.

A Tabela 4 apresenta as composições químicas médias das amostras agrupadas e as respectivas parcelas de material retido em 0,037 mm. Difratomogramas comparativos das amostras que melhor representam cada grupo são apresentadas na Figura 7, evidenciando as diferenças em relação à quantidade de gibbssita, hematita e caulinita. Análise mais detalhada dos grupos também é representada no Anexo 4, evidenciando também uma elevada correlação entre estes parâmetros para cada agrupamento de amostras.

Tabela 4 – Composição química das classes resultantes do agrupamento por difração de raios X, +0,037 mm

Grupos do cluster	Teores (%)							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	
Grupo 1	47,3	2,53	51,8	16,9	4,04	1,37	25,9	83,8
Grupo 2	34,4	3,73	41,9	33,3	4,61	1,09	19,1	79,2
Grupo 3	27,5	4,28	35,7	41,7	5,47	1,05	15,9	78,0
Grupo 4	19,6	5,09	28,3	51,9	6,67	0,95	12,2	75,8

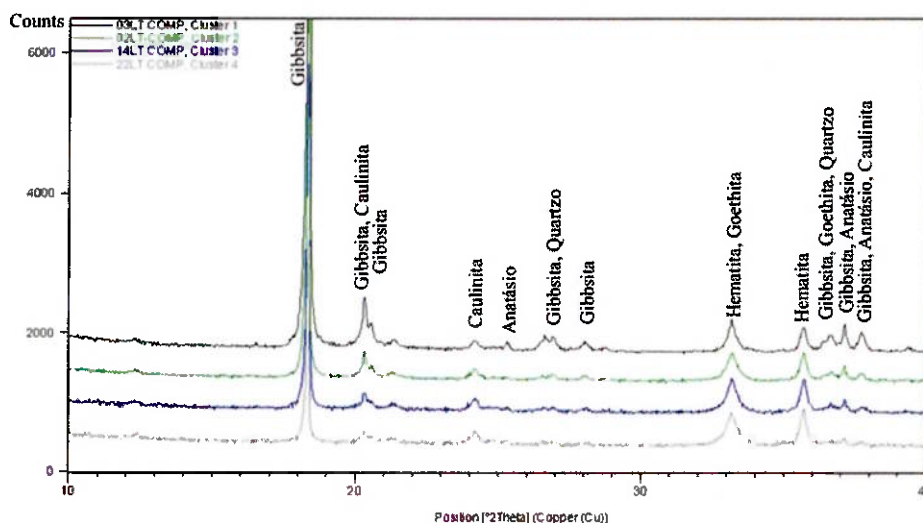


Figura 7 – Difratomogramas comparativos dos grupos definidos para o material retido em 0,037 mm

4.4 Separação mineral em líquido denso

O sumário dos resultados das separações em líquido denso é apresentado na Tabela 5, para cada grupo de amostras definidos.

Tabela 5 – Sumário dos resultados de separações em líquido denso

Grupos	Flut. (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores fluado (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	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
1	85,1	22,0	45,6	3,06	18,2	51,4	2,58	10,2	96,3	84,0	47,7
2	65,4	14,8	32,9	4,01	33,9	45,1	3,50	16,3	91,3	69,0	34,2
3	61,3	12,4	29,0	4,32	36,9	43,3	4,03	18,0	87,8	63,4	35,3
4	53,6	9,9	22,8	5,76	43,5	36,8	5,21	23,9	85,1	57,8	44,6
Média	61,2	12,6	28,9	4,56	37,1	42,4	4,15	18,7	88,2	64,0	37,8

Verifica-se que os teores médios de alumina na alimentação são da ordem de 28,9% enquanto no produto fluado a média é de 42,4%, demonstrando a elevada recuperação metalúrgica do alumínio, evidenciando enriquecimento durante os ensaios. Já os teores de sílica reativa e de óxido de ferro no produto são de 4,15 e 18,7% respectivamente, enquanto na alimentação estes teores estão na faixa de 4,56 e 37,1%, demonstrando a eliminação de parte dos contaminantes na amostra. A recuperação mássica no ensaio é de 61,2%, ou seja, além de promover um enriquecimento dos teores de alumina aproveitável reduz a massa do produto consideravelmente. Em relação ao total de recuperação mássica em relação à amostra, a média é de 12,6%, ou seja, cerca de 90% de redução da massa total da amostra.

Ao analisar cada grupo individualmente, nota-se que o grupo 1 apresenta teores de produto muito semelhante ao que é utilizado atualmente na alimentação do processo Bayer (48% de alumina aproveitável, 15% de óxidos de ferro e 3,5% de sílica reativa), inclusive apresentando teores mais baixos de contaminantes. As amostras pertencentes ao grupo 2 também tem produtos compatíveis com os da bauxita maciça, porém de pior qualidade que o grupo 1, mesmo assim teriam aplicações para o processamento de bauxita. Já o grupo 3 apresenta elevados teores de óxido de ferro indicando a baixa qualidade presente nos conjuntos de amostras; o grupo 4 tem teores muito elevados de óxidos de ferro e de sílica reativa e apresenta um teor de alumina aquém das especificações, tornando este produto incompatível com os requisitos para o processo Bayer.

4.5 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS)

O sumário dos resultados das separações magnéticas em alta intensidade via úmida da fração -1,68 +0,105 mm é apresentado na Tabela 6 para os grupos de amostras definidos.

Tabela 6 – Sumário dos resultados de separações magnéticas em alta intensidade (WHIMS)

Grupos	Ñ-Mag (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores N-magnético (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	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
1	77,3	8,50	45,0	2,90	18,1	51,4	2,13	9,51	87,60	73,30	39,80
2	49,4	4,30	32,6	3,10	35,0	45,1	3,04	21,0	62,9	50,3	29,3
3	50,4	3,77	28,5	4,06	37,9	38,1	3,84	24,7	65,1	53,8	32,5
4	36,3	2,43	23,7	4,88	42,6	36,1	4,23	25,8	53,0	37,3	21,5
Média	47,9	3,74	28,8	4,02	37,7	38,8	3,70	23,6	62,7	49,9	29,5

Verifica-se que os teores médios de alumina na alimentação são da ordem de 28,8% enquanto no produto não magnético a média é de 38,8%, demonstrando a recuperação metalúrgica do alumínio, evidenciando enriquecimento durante os ensaios. Já os teores de sílica reativa e de óxido de ferro no produto são de 3,70 e 23,6% respectivamente, enquanto na alimentação estes teores estão na faixa de 4,02 e 37,7%, ratificando a eliminação de parte dos contaminantes na amostra. A recuperação mássica no ensaio é de 47,9%, ou seja, além de promover um enriquecimento dos teores de alumina aproveitável reduz consideravelmente a massa dos produtos obtidos.

Ao analisar cada grupo individualmente, nota-se que o grupo 1 apresenta teores de produto muito semelhante ao que é utilizado atualmente na alimentação do processo Bayer (48% de alumina aproveitável, 15% de óxidos de ferro e 3,5% de sílica reativa), inclusive apresentando teores mais baixos de contaminante do que usualmente é alimentado em plantas de processamento. As amostras pertencentes ao grupo 2 também tem produtos compatíveis com os da bauxita maciça, porém de pior qualidade que o grupo 1, mesmo assim teriam aplicações para o processamento de bauxita, porém apresentam teores de óxidos de ferro elevados, o que pode vir a comprometer o processo. Já os grupos 3 e 4 tem teores muito elevados de óxidos de ferro e, secundariamente, de sílica reativa como inviabilizando o aproveitamento destes para produção de alumina

4.6 Separação magnética via úmida (tambor de terras raras)

O sumário dos resultados das separações magnéticas em tambor de terras raras é apresentado na Tabela 7 para os grupos de amostras definidos. Não é observada diferença significativas entre os produtos não magnético e magnético, sendo este último devido essencialmente a arraste mecânico nas condições operacionais adotadas.

Tabela 7 – Sumário dos resultados de separações magnéticas (tambor de RE)

Grupos	Ñ-Mag (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores N-magnético (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	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
1	86,5	12,8	45,2	89,2	77,5	43,7	2,01	18,8	87,0	85,5	85,0
2	85,4	10,0	31,9	87,0	49,7	17,2	2,82	35,5	86,2	85,4	84,1
3	85	8,35	28,7	84,2	32,9	11,9	3,45	39,7	85,9	85,5	83,9
4	88,1	8,17	23,4	74,6	28,5	6,93	4,11	45,5	88,9	88,4	87,22
Média	85,9	8,80	28,7	82,7	37,0	13,1	3,42	39,4	86,70	86,19	84,80

4.7 Produto grosso moído

Como citado anteriormente, a fração das amostras retida em 1,68 mm foi cominuída através da utilização do britador de rolos em circuito fechado, reduzindo a granulometria do material e submetendo a fração -1,68+0,037 mm para ensaios de separações em líquido denso e magnética. Esta amostra foi nomeada grosso moído.

4.7.1 Separação mineral em líquido denso (grosso moído)

O sumário dos resultados das separações em líquido denso é apresentado na Tabela 8 para os grupos de amostras definidos.

Tabela 8 – Sumário dos resultados de separações em líquido denso - grosso moído

Grupos	Flut. (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores fluado (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	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
1	86,9	54,0	47,8	2,46	16,5	55,0	1,51	7,51	89,2	77,5	43,7
2	60,4	36,3	34,8	3,82	32,8	53,6	2,22	8,56	87,0	49,7	17,2
3	47,5	28,4	27,4	4,30	42,1	52,1	2,35	9,60	84,2	32,9	11,9
4	31,4	18,3	19,2	5,08	53,0	50,0	3,00	11,3	74,6	28,5	6,93
Média	47,8	28,6	27,8	4,30	41,8	52,0	2,44	9,72	82,7	37,0	13,1

Os teores médios de alumina na alimentação são da ordem de 27,8% enquanto no produto fluado a média é de 52,0%, demonstrando elevada recuperação metalúrgica do alumínio, evidenciando enriquecimento durante os ensaios. Já os teores de sílica reativa e de óxido de ferro médios no produto fluado são de 2,4 e 9,7% respectivamente, enquanto na alimentação estes teores estão na faixa de 4,3 e 42%, ratificando a eliminação de parte dos contaminantes na amostra. A recuperação mássica no ensaio é de 47,8%, ou seja, além de promover um enriquecimento dos teores de alumina aproveitável reduz consideravelmente a massa dos produtos.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA DE PORTO TROMBETAS /
MINERAÇÃO RIO DO NORTE

Ao analisar cada grupo individualmente, nota-se que todos os grupos apresentam teores de produto muito semelhantes com conteúdo de contaminantes mais baixos do que usualmente alimentado em plantas de processamento. Todas as amostras em questão, portanto apresentam compatibilidade com a bauxita maciça se sujeitas a etapa de concentração descrita acima.

4.7.2 Separação magnética em alta intensidade via úmida (WHIMS – grosso moído)

O sumário dos resultados das separações magnéticas em alta intensidade via úmida é apresentado na Tabela 9 para os grupos de amostras definidos.

Tabela 9 – Sumário dos resultados de separações magnéticas - grosso moído (WHIMS)

Grupos	Ñ-Mag (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores N-magnético (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	amostra	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃
1	73,7	50,8	47,8	2,46	16,5	52,4	2,40	10,1	81,2	67,7	45,0
2	36,2	24,3	34,8	3,82	32,8	44,3	3,34	19,5	46,4	33,3	21,5
3	24,7	16,6	27,4	4,30	42,1	39,6	3,89	24,6	35,3	23,2	14,6
4	16,2	11,0	19,2	5,08	53,0	34,0	4,70	30,8	27,6	16,1	9,83
Média	26,9	18,2	27,7	4,32	41,8	39,7	3,90	24,5	24,5	25,3	16,1

Verifica-se que os teores médios de alumina na alimentação são da ordem de 27,7% enquanto no produto não magnético a média é de 39,7%, demonstrando a não tão efetiva recuperação metalúrgica do alumínio, evidenciando enriquecimento durante os ensaios. Já os teores de sílica reativa e de óxido de ferro no produto são de 3,90 e 24,5% respectivamente, enquanto na alimentação estes teores estão na faixa de 4,32 e 41,8%, ratificando a eliminação de parte dos contaminantes na amostra. A recuperação mássica no ensaio é de 26,9%, ou seja, além de promover um enriquecimento dos teores de alumina aproveitável reduz a massa do produto consideravelmente

Ao analisar cada grupo individualmente, nota-se que o grupo 1 apresenta teores de produto muito semelhante ao que é utilizado atualmente na alimentação do processo, inclusive apresentando teores mais baixos de contaminante do que usualmente é alimentado em plantas de processamento. As amostras pertencentes ao grupo 2 também tem produtos compatíveis com os da bauxita maciça, porém de pior qualidade que o grupo 1, mesmo assim teriam aplicações para o processamento de bauxita, porém apresentam teores de óxidos de ferro elevados, o que pode vir a comprometer sua utilização. Já os grupos 3 e 4 tem teores muito elevados de óxidos de ferro e de sílica reativa, não sendo adequados para a produção de alumina.

4.7.3 Separação magnética via úmida (tambor de terras raras – grosso moído)

O sumário dos resultados das separações magnéticas em tambor de terras raras é apresentado na Tabela 10 para os grupos de amostras definidos. Não é observada diferença significativas entre os produtos não magnético e magnético, sendo este último devido essencialmente a arraste mecânico nas condições operacionais adotadas.

Tabela 10 – Sumário dos resultados de separações magnéticas - grosso moído (tambor de RE)

Grupos	Ñ-Mag (%massa)		Teores alimentação (%)			Teores N-magnético (%)			Distribuição no ensaio (%)		
	ensaio	amostra	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ _{an}	SiO ₂ _{re}	Fe ₂ O ₃
1	95,4	65,8	47,8	2,46	16,5	48,4	2,57	15,7	95,6	94,9	94,4
2	90,9	61,3	34,8	3,82	32,8	35,0	3,51	32,7	91,7	90,7	89,8
3	90,5	61,6	27,4	4,30	42,1	28,0	4,13	41,8	91,5	90,6	89,6
4	91,2	60,7	19,2	5,08	53,0	19,7	4,79	52,5	92,2	91,2	90,5
Média	90,9	61,5	27,7	4,32	41,8	28,2	4,10	41,5	90,8	90,9	90,4

4.8 Discussão de resultados

O procedimento experimental realizado para as amostras de laterita, foi realizado também para 14 amostras denominadas de Bauxita Maciça, que corresponde a camada de bauxita atualmente lavrada em Porto Trombetas. O objetivo foi comparar os resultados da caracterização tecnológica dos dois tipos de bauxita, sendo o sumário dos resultados apresentado na Tabela 11 (apenas as médias das amostras de bauxita maciça).

Tabela 11 – Sumário dos resultados de separações de laterita e bauxita maciça

Produtos	Ensaio comparativo	LATERITA (25 amostras)					BAUXITA MACIÇA (14 amostras)				
		% em massa	Teores (%)			Recup.	% em massa	Teores (%)			Recup.
			Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃			Al ₂ O ₃ ap	SiO ₂ re	Fe ₂ O ₃	
+0,037mm	Peneiramento	77,3	27,7	4,54	44,9	91,1	76,7	47,7	3,00	15,8	92,6
Grosso moído	Líquido denso	28,6	52,0	2,44	9,72	61,0	50,1	55,1	2,65	6,83	70,1
	WHIMS	18,2	39,7	3,90	24,5	29,6	50,8	51,3	3,02	11,1	65,7
Finos	Líquido denso	12,6	42,4	4,10	18,7	22,7	20,7	51,3	3,44	9,48	25,9
	WHIMS	3,74	38,8	3,70	23,6	5,92	24,2	46,3	3,08	15,3	24,2

Ao comparar os produtos dos ensaios realizados, deve-se inicialmente analisar toda a fração retida em 0,037 mm, pois em situações reais de processamento esta fração é a que corresponde ao produto de bauxita comercializado. Na laterita, especificamente os teores de alumina aproveitável são em média de 27,7%, de sílica reativa de 4,54% e de óxidos de ferro de 44,9% inviabilizando o aproveitamento desta.

No produto grosso moído nota-se que os teores de alumina aproveitável são muito maiores nos fluídos dos ensaios de líquido denso que nos não magnéticos da separação por WHIMS (52,0% contra 39,7%). Comparando os teores de sílica reativa e de óxidos de ferro, também é evidenciada a maior eficiência do ensaio de separação por líquidos densos, pois a sílica reativa tem teor de 2,44% contra 3,90% e os teores de óxidos de ferro são da ordem de 10% contra 25% na separação magnética. Ao comparar a recuperação de alumina aproveitável das amostras, nota-se que no ensaio por líquido denso a recuperação global de alumina aproveitável é de 61% contra cerca de 30% no WHIMS indicando que este procedimento é muito mais eficiente.

Já em relação ao produto fino, também se observa maior eficiência no ensaio de líquidos densos tanto pelos teores finais de alumina aproveitável (42,4% contra 38,8%), quanto de óxidos de ferro (18,7% contra 23,6%), porém no aspecto de sílica reativa, a separação por líquidos densos apresenta teores mais elevados (4,10% contra 3,70%). As recuperações não podem ser comparadas diretamente, pois os produtos ensaiados se referem a distintas frações em termos granulométricos.

Ao comparar os resultados dos ensaios com os das amostras de bauxita maciça submetidas aos mesmo procedimento, observa-se que na etapa de deslamagem, a recuperação de alumina aproveitável é bem semelhante (91,1% para a laterita, 92,6% para a maciça), assim como a recuperação mássica (77,3% contra 76,3%).

Analisando os ensaios realizados, estabelece que o único ensaio que produz resultados semelhantes aos encontrados na bauxita maciça é o ensaio por separação de líquidos densos da fração grossa moída, pois apresenta teores de alumina aproveitável semelhantes (52,0 contra 55,1%), assim como a recuperação global metalúrgica (62,5% contra 70,1%).

Para a fração de finos, em relação à separação por líquidos densos, obtém-se recuperação metalúrgica de alumina aproveitável semelhante, porém os teores do produto final da bauxita maciça são próximos ao utilizado usualmente no processamento de alumina, enquanto na laterita isto não ocorre.

Em relação à separação magnética, para ambos os casos, tanto de finos como o produto grosso moído, nota-se que os teores de alumina aproveitável para a laterita (39,7% e 38,8%) são incompatíveis com a exigência mínima para o processo Bayer, ao contrário do que ocorre com a bauxita maciça (51,3% e 46,3%).

5 CONCLUSÕES

Os resultados das análises granulométricas evidenciam os elevados teores de ferro em relação às amostras de bauxita maciça, assim como análises anteriores em diversos trabalhos, fato pelo qual a laterita, por si só, não é produto para a alimentação de usinas de processamento de alumina.

O agrupamento das amostras por difração de raios X permitiu concluir que o Grupo 1 (uma única amostra) não pertencia originalmente a laterita, pois apresentou teor muito elevado de alumina aproveitável se comparado as demais

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO HORIZONTE DE LATERITA DE PORTO TROMBETAS / MINERAÇÃO RIO DO NORTE

amostras. Provavelmente, ocorreu algum equívoco na identificação ou amostragem desta, que tem características de bauxita maciça.

Já os grupos 2, 3 e 4 apresentaram teores de óxido de ferro entre 30 e 50% e com teores de alumina aproveitável menores que as amostras de bauxita maciça, o torna estas amostras incompatíveis com especificações de bauxita para produção de alumina sem emprego de processamento prévio, conforme indicado pelos resultados de ensaios de separação por líquidos densos ou separação magnética de alta intensidade via úmida (WHIMS).

Este procedimento (separação magnética por WHIMS e separação por líquidos densos) já havia sido analisado anteriormente (Kahn, 2003) na caracterização de finos de bauxita maciça da MRN a fim de reduzir o conteúdo de ferro nas amostras. Através de diversos ensaios, concluiu-se que era possível a redução de ferro através de processos físicos, tornando seu teor aceitável para produção de alumina.

Particularmente para os Grupos 2 e 3 (15 amostras), a separação em líquido denso gerou um produto flutuado com teores que atendem aos quesitos para a produção de alumina. Como os grupos mencionados correspondem a mais de metade das amostras em questão, sugere-se a realização de estudos complementares para que sejam avaliadas a concentração gravítica (jigagem) e/ou separação magnética de alta intensidade via úmida (mesmo sem resultados aceitáveis durante os experimentos) para o aproveitamento da laterita.

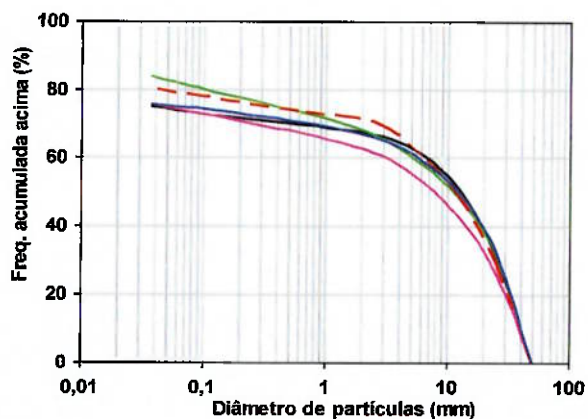
Para o grupo 4 (9 amostras), os resultados de separação em líquidos densos e separação magnética, não foram eficientes na redução dos teores de sílica reativa e óxidos de ferro, de forma que não atingiram as especificações requeridas para produção de alumina, conforme constatado nos estudos de caracterização ora realizados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

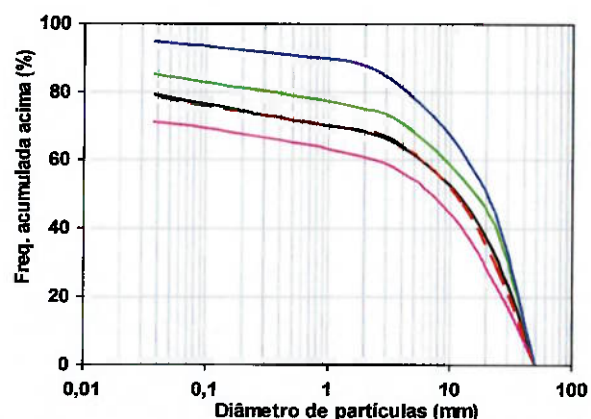
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO – ABAL. *Anuário estatístico 2006*. São Paulo, 2007.
- BIONDI, J.C. *Processos metalogenéticos e os depósitos minerais Brasileiros* – São Paulo: Oficina de Textos, 2003. p 377 - 424
- BUCHNER, W.; SCHIELBS, R.; WINTER, G.; BUCHEL, K.H.; *Industrial inorganic chemistry*, VCH Publishers: New York, 1989, p. 247-255.
- CARVALHO, A. *Brazilian bauxites* – São Paulo – Paris, 1997
- 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
- CUNDIFF, W.H. Alumina. In: *SME mineral processing handbook*. Weiss, N (Editor), New York vol II, 1985. p 19.3 – 19.20.
- HERNALSTEENS, C.M. de O. & LAPA, R.P. Bauxita de Porto Trombetas, Oriximiná, Pará. In: *Principais depósitos minerais do Brasil, vol. III*. Schobbenhaus, C (Editor), Brasília, 1988. p 622 - 639
- HILL, V.G & SEHNKE, E.D, Bauxite. In: *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Klogal, J. [et al.], Colorado, USA, 1994. p 219 - 261
- KAHN, H et al. *Characterization of bauxite fines aiming to minimize their iron content* - São Paulo, 2003
- MASSOLA, C.P. *Flotação reversa da bauxita de Mirai, MG* – São Paulo, 2008. p 3 - 20
- MRN, *Mineração Rio do Norte* – Obtido em <<http://www.mrn.com.br/>>, acessado em 18/10/2009

ANEXO I

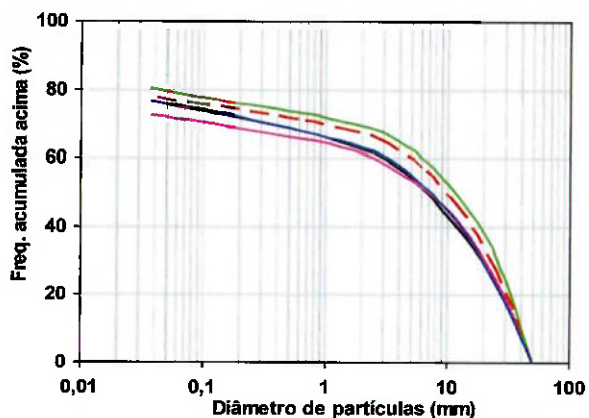
Gráficos de distribuição de massa acumulada acima



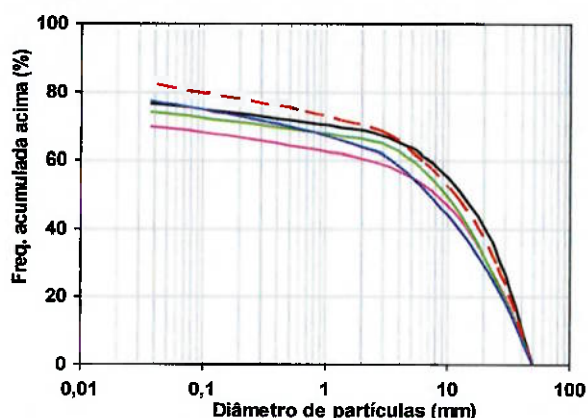
— PK01LT — PK02LT — PK03LT — PK04LT — PK05LT



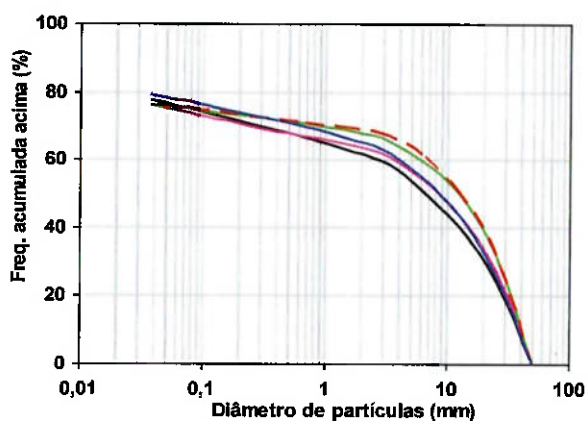
— PK06LT — PK07LT — PK08LT — PK09LT — PK10LT



— PK11LT — PK12LT — PK14LT — PK15LT — PK16LT



— PK19LT — PK20LT — PK22LT — PK23LT — PK24LT

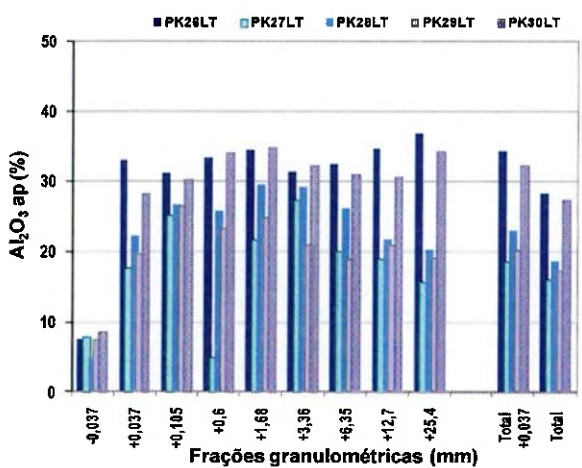
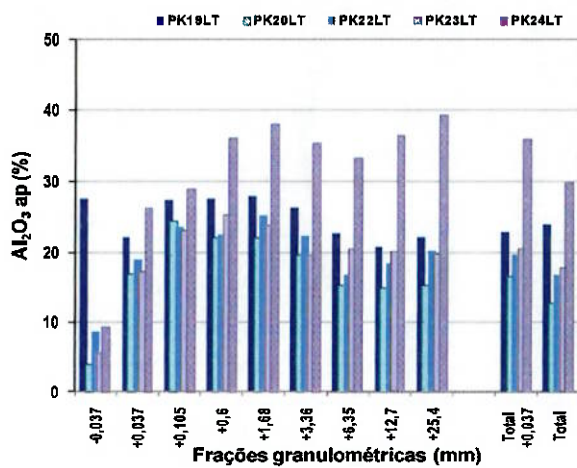
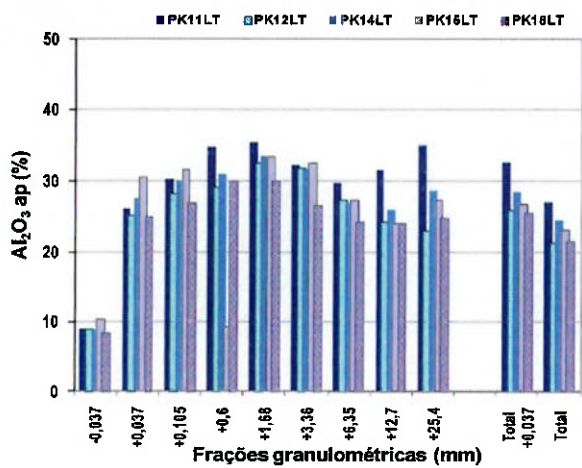
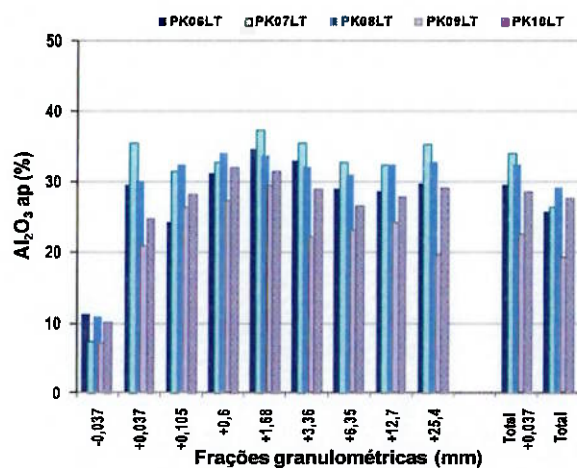
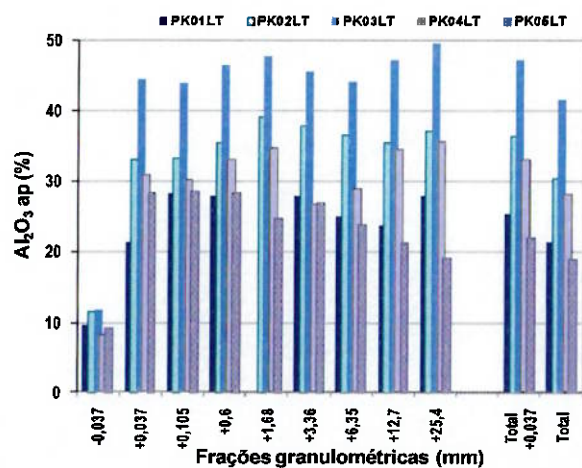


— PK26LT — PK27LT — PK28LT — PK29LT — PK30LT

Gráficos de distribuição em massa acumulada acima

ANEXO 2

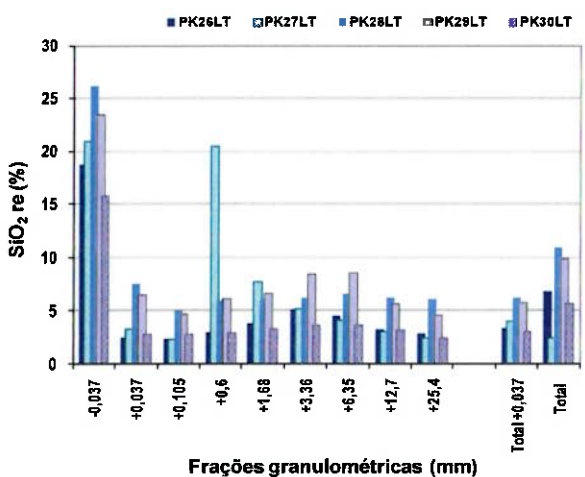
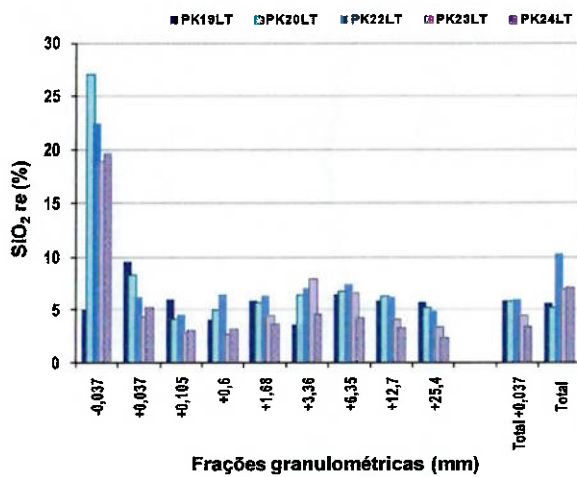
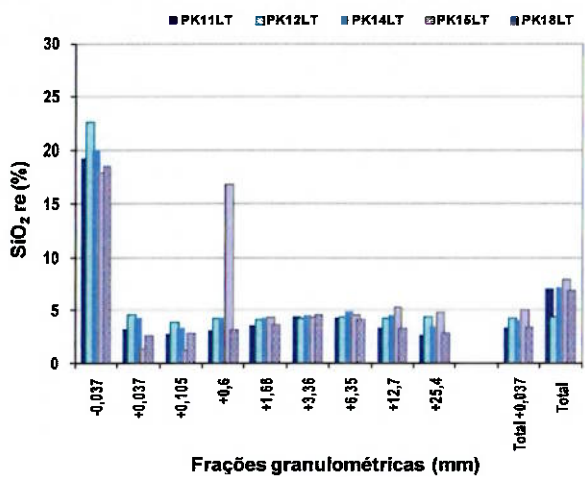
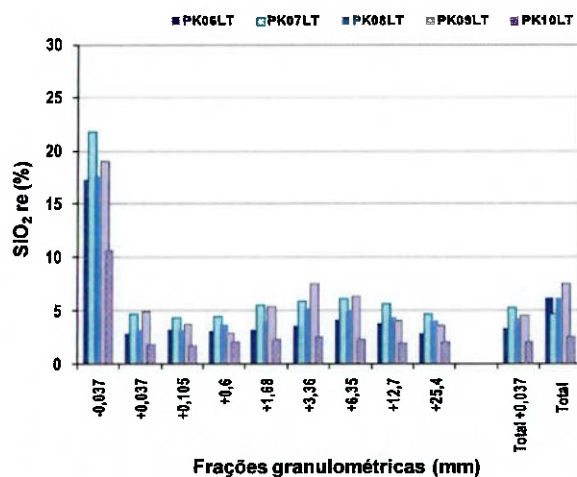
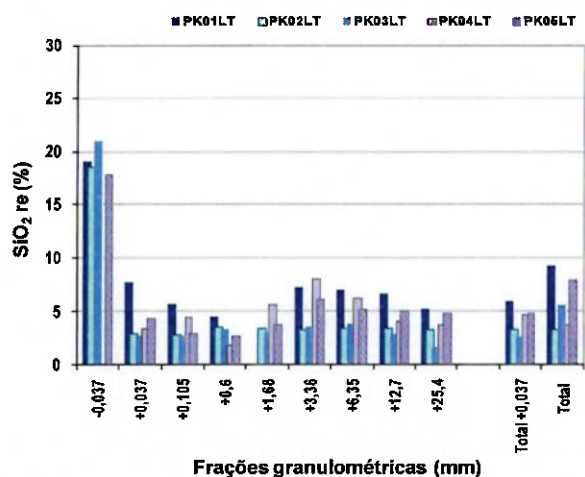
Histograma de Al_2O_3 ap, SiO_2 re e Fe_2O_3 por fração granulométrica



Teores de Al_2O_3 aproveitável por fração granulométrica

ANEXO 2

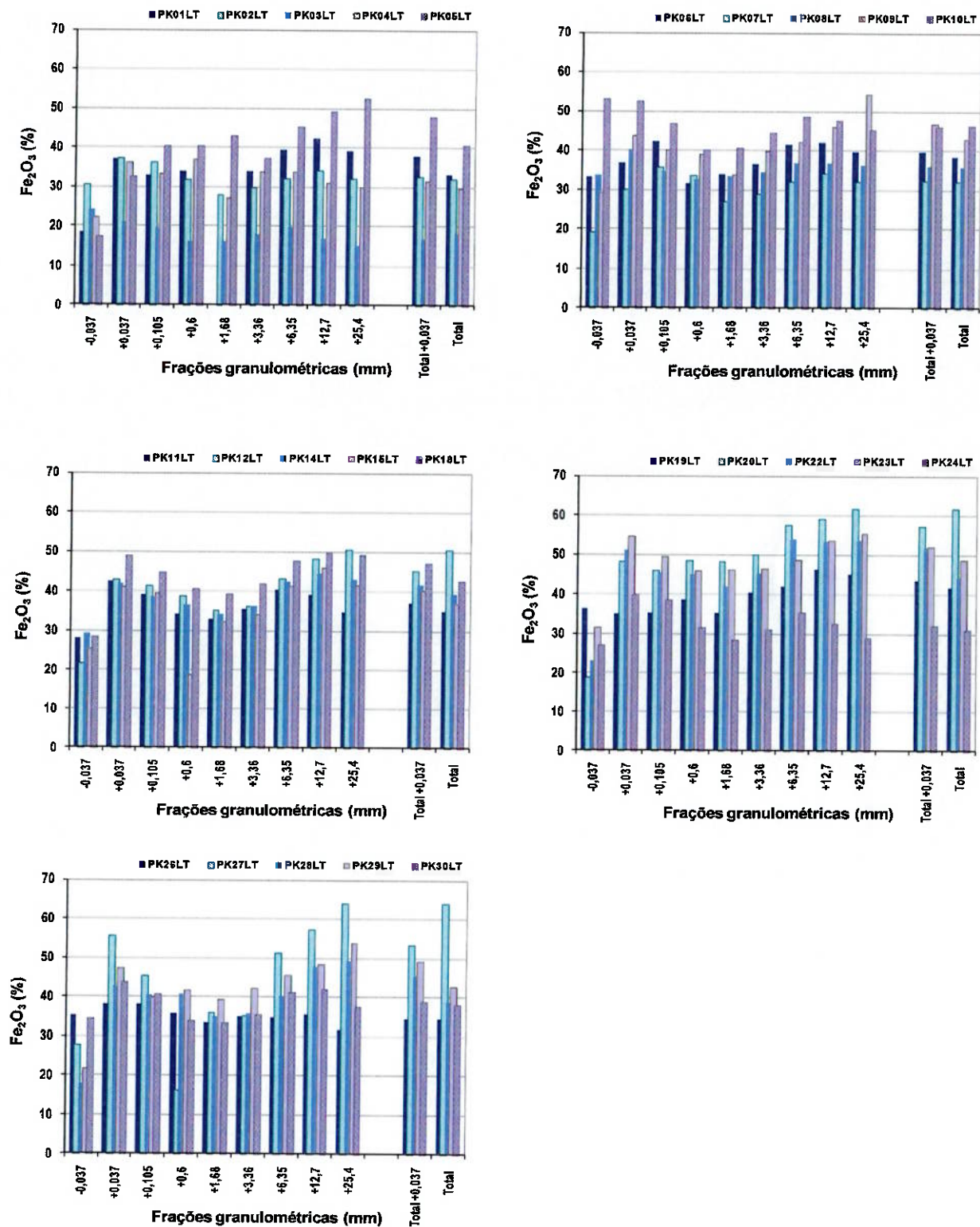
Histograma de Al₂O₃ ap, SiO₂ re e Fe₂O₃ por fração granuloquímica



Teores de SiO₂ reativa por fração granulométrica

ANEXO 2

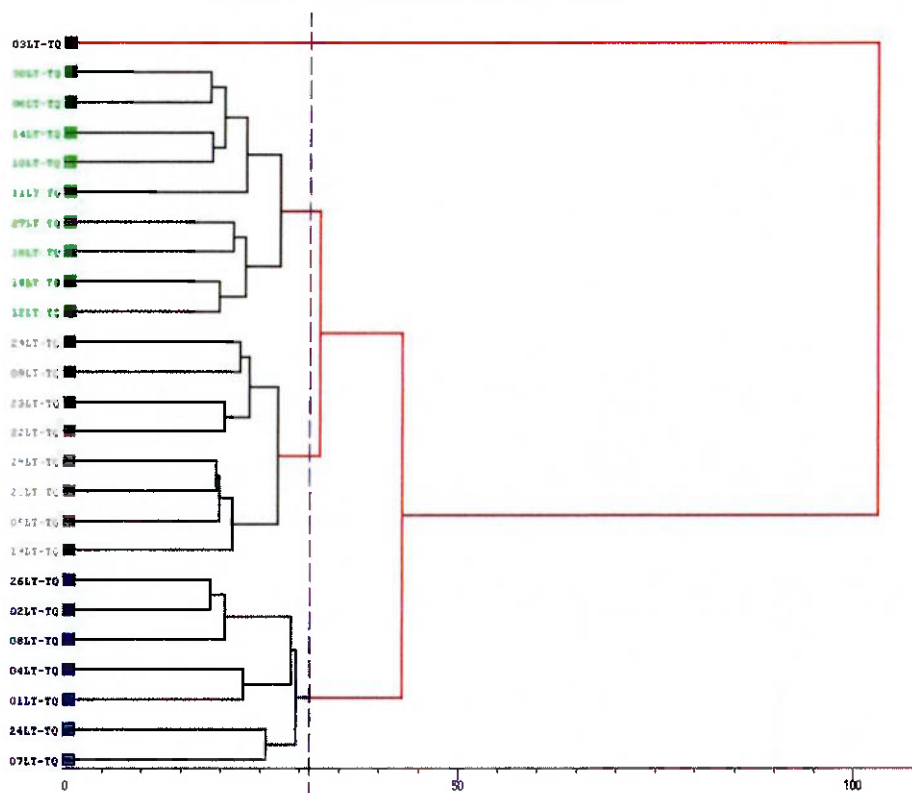
Histograma de Al₂O₃ ap, SiO₂ re e Fe₂O₃ por fração granulométrica



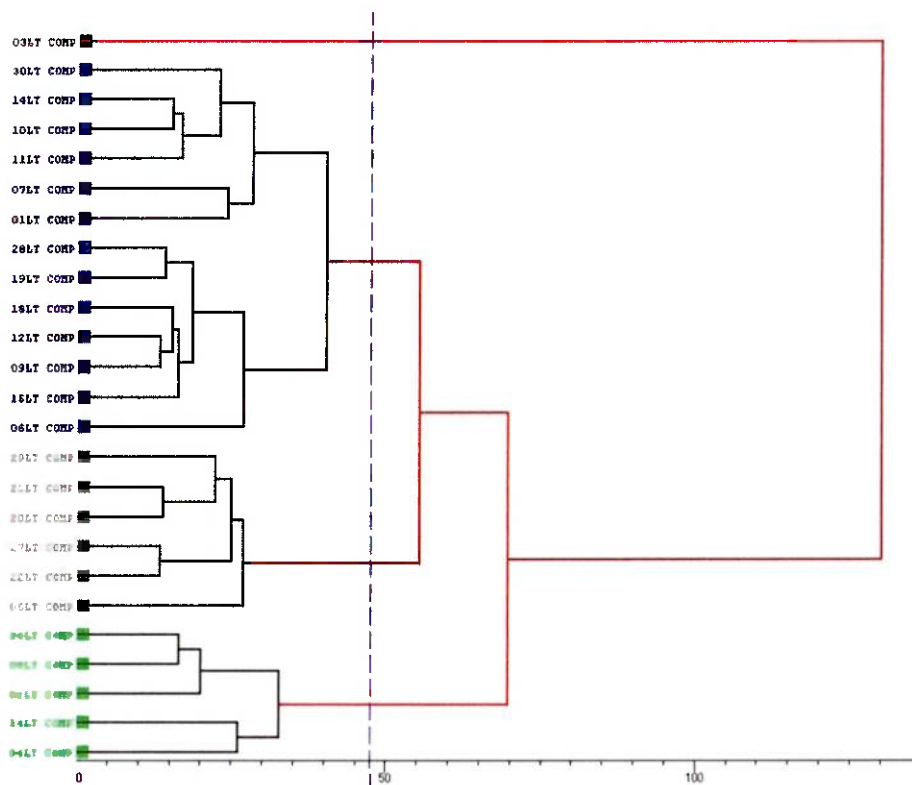
Teores de Fe₂O₃ por fração granulométrica

ANEXO 3

Dendrograma da análise por agrupamento



Dendrograma da análise por agrupamento das amostras tal qual (Laterita)



Dendrograma da análise por agrupamento das frações acima de 0,037 mm (Laterita)

ANEXO 4

Composição química por classe resultante do agrupamento

Teores das classes resultantes do agrupamento das amostras cabeça (LT; % em massa)

Amostra	Teores (%)							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	
Grupo 1								
PK 3 LT	38,4	5,81	47,5	18,6	8,43	1,46	24,1	83,8
Grupo 2								
PK 1 LT	23,0	9,65	35,3	32,7	13,0	1,60	17,4	75,0
PK 2 LT	29,8	5,89	37,2	32,6	9,32	1,55	19,4	75,7
PK 4 LT	27,2	6,79	38,7	31,3	10,1	1,50	18,4	80,1
PK 7 LT	25,7	9,62	37,4	28,5	13,1	1,56	19,4	71,1
PK 8 LT	29,1	5,38	31,6	36,6	7,78	1,24	22,7	85,2
PK 24 LT	29,2	5,95	35,9	32,1	10,0	1,45	20,6	77,1
PK 26 LT	28,9	5,35	33,9	35,7	8,36	1,32	20,8	77,8
Média	27,5	6,95	35,7	32,8	10,2	1,46	19,8	77,4
Grupo 3								
PK 6 LT	27,6	5,00	33,5	38,8	7,42	1,36	19,0	79,3
PK 10 LT	27,8	2,22	31,5	45,4	3,93	1,04	18,1	94,6
PK 11 LT	27,0	6,98	34,0	35,8	9,08	1,52	19,6	76,4
PK 12 LT	22,1	8,81	31,7	37,5	11,4	1,52	17,9	72,4
PK 14 LT	25,0	6,11	33,2	38,8	8,98	1,37	17,6	80,1
PK 15 LT	24,2	6,98	32,9	36,7	11,1	1,64	17,7	77,5
PK 18 LT	22,5	5,94	31,0	41,4	9,32	1,46	16,9	76,5
PK 27 LT	16,8	7,04	27,8	46,8	10,5	1,38	13,4	76,2
PK 30 LT	27,8	5,18	33,3	38,2	7,41	1,49	19,7	79,0
Média	24,5	6,03	32,1	39,9	8,80	1,42	17,8	79,1
Grupo 4								
PK 5 LT	19,4	8,08	31,1	39,3	13,2	1,53	15,0	75,9
PK 9 LT	19,3	7,80	30,5	41,9	11,8	1,36	14,5	78,8
PK 19 LT	18,3	11,1	32,9	35,8	15,0	1,38	14,9	76,6
PK 20 LT	16,8	11,4	32,0	36,9	16,3	1,51	13,4	69,7
PK 22 LT	17,2	8,95	28,1	43,4	12,5	1,38	14,7	74,0
PK 23 LT	17,7	5,94	27,4	47,4	9,60	1,12	14,4	82,4
PK 28 LT	19,4	10,3	32,4	36,8	13,9	1,38	15,5	76,2
PK 29 LT	17,1	9,13	29,6	42,0	12,7	1,44	14,2	76,7
Média	18,1	9,07	30,5	40,4	13,1	1,39	14,6	76,2

Em destaque a amostra representativa de cada classe, determinada pela análise pela análise por agrupamento.

ANEXO 4

Composição química por classe resultante do agrupamento

Teores das classes resultantes do agrupamento da fração +0,037 mm e respectivas composições químicas (% em massa)

Amostra	Teores (%)							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	
Grupo 1								
PK 3 LT	47,3	2,53	51,8	16,9	4,04	1,37	25,9	83,8
Grupo 2								
PK 02 LT	36,4	3,19	42,7	32,5	3,93	1,09	19,8	75,7
PK 04 LT	33,0	4,63	42,5	31,5	5,54	1,11	19,3	80,1
PK 08 LT	32,4	4,23	39,9	36,1	4,96	1,05	17,9	85,2
PK 24 LT	35,9	3,28	42,7	32,0	4,34	1,12	19,8	77,1
PK 26 LT	34,3	3,32	41,4	34,4	4,26	1,09	18,8	77,8
Média	34,4	3,73	41,9	33,3	4,61	1,09	19,1	79,2
Grupo 3								
PK 01 LT	25,3	5,89	34,8	38,0	7,13	1,09	15,8	75,0
PK 06 LT	29,5	3,30	37,1	39,8	4,68	1,09	17,3	79,3
PK 07 LT	33,9	5,23	41,7	32,2	5,73	1,03	19,4	71,1
PK 09 LT	22,6	4,55	32,2	46,8	6,25	0,94	13,8	78,8
PK 10 LT	28,5	2,03	34,8	45,9	3,49	0,98	14,9	94,6
PK 11 LT	32,6	3,27	39,8	37,2	4,30	1,10	17,7	76,4
PK 12 LT	25,9	4,20	33,7	45,2	5,43	1,01	14,7	72,4
PK 14 LT	28,4	4,02	36,7	41,9	5,15	1,03	15,2	80,1
PK 15 LT	26,7	5,08	35,7	40,4	6,16	1,25	16,5	77,5
PK 18 LT	25,4	3,28	33,3	47,0	4,75	0,99	14,1	76,5
PK 19 LT	22,7	5,76	33,0	43,5	7,41	1,00	15,1	76,6
PK 28 LT	23,0	6,13	31,9	45,3	6,64	0,99	15,2	76,2
PK 30 LT	32,3	2,90	39,1	38,8	4,02	1,09	17,0	79,0
Média	27,5	4,28	35,7	41,7	5,47	1,05	15,9	78,0
Grupo 4								
PK 05 LT	22,0	4,75	31,1	47,8	6,19	1,00	13,9	75,9
PK 20 LT	16,6	5,72	23,9	57,1	7,46	0,87	10,7	69,7
PK 22 LT	19,7	5,97	27,9	51,8	7,11	0,99	12,2	74,0
PK 23 LT	20,5	4,38	29,5	52,1	5,89	0,88	11,6	82,4
PK 27 LT	18,5	3,96	27,7	53,2	6,32	0,96	11,8	76,2
PK 29 LT	20,2	5,79	29,9	49,0	7,08	1,01	12,9	76,7
Média	19,6	5,09	28,3	51,9	6,67	0,95	12,2	75,8
Média geral	27,7	4,54	33,4	44,9	5,85	1,02	14,7	77,3

Em destaque a amostra representativa de cada classe, determinada pela análise pela análise por agrupamento.