

### 3

## Aspectos Gerais Sobre As Bauxitas E Caracterização Geotécnica De Seus Resíduos De Mineração E Processamento

### 3.1

#### Introdução

O alumínio é o terceiro elemento em abundância na natureza, superado só pelo oxigênio e o silício. Porém, possui uma reatividade química muito elevada, nunca sendo encontrado em estado metálico. Ele tem uma grande afinidade com o oxigênio e somente no século passado se conseguiu obter o metal (*Anjos & Silva, 1983*). Aproximadamente 8% da crosta terrestre é composta por alumínio. Ele entra na estrutura de todas as rochas comuns constituídas por compostos oxidados como silicatos e suas argilas e óxidos hidratados, exceto nas rochas calcáreas puras e nas areias de quartzo. Os feldspatos e as micas, principais constituintes das rochas ígneas e presentes em todos os solos que originam de sua alteração, são formados de diversos silicatos de alumínio. Destes, o principal é a caulinita,  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , que contém uns 2% de Al ou  $\approx 40\%$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (*Ed. URMO, 1967*). Os diversos óxidos hidratados do alumínio são encontrados nas rochas sedimentares, mas não formam mais do que aglomerações locais (*Santos, 1989*).

De uma maneira prática, pode se dizer que os óxidos de alumínio são a matéria prima para a obtenção deste metal. As rochas ricas em alumina hidratada são agrupadas sob a denominação de bauxitas, nome inicialmente escolhido para designar a alumina hidratada da região de Baux, na França (*Ed. URMO, 1967*). Segundo Santos (1989), o nome bauxita é dada à espécie mineralógica de composição  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , que nunca foi encontrada na natureza como mineral, e

bauxito, à rocha residual, constituída essencialmente por um ou vários dos hidróxidos de alumínio, diásporo, gibsita ou hidrargilita e bohemita, podendo também conter argilo-minerais, hidróxido de ferro e quartzo.

Muitas jazidas de óxido de alumínio provenientes da decomposição das rochas de silicatos primários são comuns de encontrar. Algumas estão localizadas em zonas temperadas, mas a maior parte está situada em zonas tropicais e sua formação é em geral devida aos fenômenos de laterização. Em decorrência de certas condições freqüentes em um clima tropical (variação marcante de estações secas e úmidas, possibilidades de contatos intensos com a água, etc), as rochas de silicato (basaltos, gnaisses, micaxistos, etc) se decompõe, dissolvem a maior parte da sílica e, daí, se formam crostas superficiais de uma rocha composta principalmente de óxido de ferro e alumina hidratada, em proporções muito variadas, que são as lateritas. Quando são ricas em  $Fe_2O_3$ , podem formar um minério de ferro. Se há predominância de alumina, há a formação de um mineral de alumínio, que em linguagem corrente na mineração e processamento, é chamada igualmente de bauxita. Para manter esta linguagem corrente do meio minerário e industrial é que este último termo será utilizado ao longo deste trabalho, em detrimento da designação bauxito de Santos (1989).

A obtenção final do produto implica na extração da rocha, que é moída e lavada para se chegar a uma granulometria e limpeza satisfatórias para ser submetida a tratamento químico para a extração da alumina. Este tratamento é feito essencialmente por um processo conhecido como Sistema Bayer. A lavagem após a extração origina o primeiro tipo de resíduo, conhecido como lama de lavagem. Do processamento, obtém-se o rejeito conhecido como lama vermelha. Só deste processamento tem-se, em média, 1 tonelada de rejeito seco para cada tonelada de alumina produzida, volume este que varia de acordo com a composição química da rocha de origem. Na década de 80, o descarte aproximado foi de  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de lama por ano; sendo que só no Brasil, 380 mil ton. (*Medina & Castro, 1987*).

Este capítulo tem como objetivo apresentar dados e informações gerais sobre as bauxitas e o alumínio, tais como sua história e propriedades, formas de extração e produção. Também serão apresentadas aqui, características geotécnicas

da rocha e de seus resíduos de mineração e processamento, tanto as já reportadas por outros pesquisadores como as observadas e medidas neste trabalho. Pretende-se deixar bem clara a grande dependência que estas características têm da composição química e mineralógica tanto da rocha de origem como do processo de industrialização. A principal consequência disto é a dificuldade ou mesmo impossibilidade de desenvolvimento de um modelo de comportamento que seja único para este tipo de resíduo.

Nesta pesquisa, foram utilizadas um tipo de lama de lavagem e quatro tipos de lamas vermelhas. Uma delas, denominada *lama vermelha SL*, é o resultado do processamento da bauxita de uma jazida localizada na região norte do país, a mesma que originou a lama de lavagem estudada. Através destes dois materiais, é possível fazer uma comparação do efeito do processamento na formação dos resíduos. As outras lamas vermelhas são o resultado do processamento de bauxitas extraídas de duas diferentes jazidas localizadas na região sudeste do país. Uma será chamada de *lama vermelha PC*, já que a jazida de origem está na região de Poços de Caldas, MG. As outras duas são decorrentes do processamento de minérios da região de Ouro Preto, MG. Uma delas é denominada de *lama vermelha OP neutralizada* e a outra, *lama vermelha OP não neutralizada*. A neutralização consiste em um ajuste feito no pH do resíduo antes de seu lançamento em uma barragem de armazenamento. Na verdade, o enfoque principal da tese ficou sobre estes dois resíduos provenientes da região de Ouro Preto, devido ao fato de um deles já ter sido bem estudado em outras teses da PUC-Rio (a lama neutralizada), e conforme explicado no Capítulo 01.

As curvas granulométricas e os índices físicos dos resíduos de mineração, de uma maneira geral, são informações freqüentemente utilizadas em correlações empíricas para extrapolar comportamentos no campo tais como taxas de adensamento e mesmo resistência (por exemplo, *Carrier et al., 1983* e *Carrier & Beckman, 1984*), o que torna a caracterização geotécnica um item importante do estudo destes materiais. As indústrias de processamento também têm promovido um pesquisa intensa sobre os índices físicos destes rejeitos, especialmente para verificar sua influência na deposição de suas partículas sólidas em meio aquoso. É este processo que determinará a pureza do produto industrial final obtido, além de ser um fator ambiental importante, já que também controlará o teor líquido final

dos resíduos quando lançados nos diques para disposição. No Sistema Bayer, o processo mais comum para obtenção da alumina à partir das bauxitas, há vários fatores operantes que influenciam nas características finais dos resíduos e que ainda não estão bem esclarecidos (*Li & Rutherford, 1996*).

Ciente desta importância atribuída aos índices físicos no estudo do comportamento dos resíduos, procurou-se investigar as possíveis diferenças nos valores destes parâmetros em função do tipo de fluido e procedimento de ensaio para montagem das curvas granulométricas e medição dos limites de consistência. Ou seja, foram analisadas quais as diferenças causadas em se adotar os mesmos métodos de caracterização para estes rejeitos dos solos ditos convencionais e quais valores se obtinha quando se utiliza o seu fluido característico, ou seja, aquele que realmente estará preenchendo os seus vazios nos lagos de disposição, ao invés da água deairada dos ensaios normalizados usuais. Os resultados deste tipo de comparação também são apresentados ao longo deste capítulo.

### 3.2

#### **Informações Gerais Sobre o Alumínio**

Devido ao crescimento contínuo da produção e de sua importância na economia mundial, são muitos os *sites* na Internet que trazem informações variadas sobre a bauxita e o alumínio, desde sua exploração até sobre sua forma de produção e reciclagem. A grande maioria dos dados apresentados nesta seção foram colhidos em páginas como estas. Algumas delas são mantidas e organizadas pelas próprias empresas mineradoras e produtoras enquanto outras o são por órgãos de proteção ambiental. Dentre elas, cita-se: [www.clemente.com.br](http://www.clemente.com.br); [www.buenosdiasplaneta.org](http://www.buenosdiasplaneta.org); [www.aluminio.com.ve](http://www.aluminio.com.ve); [www.bauxita-pdvsa.com](http://www.bauxita-pdvsa.com); [www.idrinfo-idrc.ca](http://www.idrinfo-idrc.ca); [www.world-aluminum.org](http://www.world-aluminum.org); [www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es); [www.alcoa.com.br](http://www.alcoa.com.br) etc. Foi notado que nelas não há uma preocupação em se fazer uma referência adequada às suas fontes de informação. E aqui também só estará sendo mencionado o seu endereço, o que não garante que as mesmas estarão ainda

disponíveis quando a página for visitada. Uma revisão bibliográfica sobre a história da descoberta e exploração do alumínio é apresentada por Bárdossy (1997), de onde também foi extraído grande parte do material apresentado logo a seguir.

### 3.2.1

#### Breve História do Alumínio

Desde o século 5000 A.C., a melhor argila usada para fazer cerâmica no Oriente Médio era constituída em sua grande parte por um silicato hidratado de alumínio. Outros compostos do alumínio, somente conhecidos como “o metal da argila”, também foram extensamente utilizados pelo egípcios e babilônios desde o século 2000 A.C., tanto na fabricação de tintas como para fins medicinais.

Em 1782, o químico francês Lavoisier mencionava o óxido de um metal desconhecido. Em 1808, Sir Humphrey Davy lhe deu o nome de "alumínio" por que lhe soava mais científico que o "metal da argila". Em 1809, Davy fundiu ferro em contato com alumina em um arco voltaico para produzir uma liga de ferro-alumínio. Nesta experiência, antes de sua mistura com o ferro, o alumínio existiu em seu estado metálico talvez pela primeira vez no mundo. A bauxita foi identificada como fonte do mineral pela primeira vez em 1821, na localidade de Les Baux, ao Sul da França, por Berthier. Em 1825, Oerstedt produziu uma amostra minúscula de alumínio em laboratório, por meios químicos. Vinte anos mais tarde, o cientista alemão Frederick Wohler produziu fragmentos de alumínio do tamanho de alfinetes. Em 1854, Saint-Clair Deville melhorou o método usado por Wohler e produziu amostras maiores. Foi então animado por Napoleão III a fazer uma produção comercial para a exposição de Paris, em 1855, quando os lingotes de alumínio foram colocados ao lado das jóias da coroa. Outros melhoraram seu processo até 1869, quando duas toneladas de alumínio foram produzidas. Isso baixou seu custo de U\$545,00 para U\$17,00 o grama, quase o mesmo valor da prata. Um preço razoável, tanto que serviu para ornar a mesa da corte francesa, a coroa do rei da Dinamarca e a capa do Monumento a Washington.

Em 23 de fevereiro de 1886, Charles Martin Pasillo, um americano de 22 anos, resolveu o processo eletrolítico básico que ainda hoje se usa para produzir o alumínio. Ele separou o alumínio do oxigênio com o qual se encontra combinado quimicamente na natureza, passando uma corrente elétrica através de uma solução de criolita e de alumina. Quase simultaneamente, Paul L.T. Heroult chegou ao mesmo processo na França. Porém, em princípio a importância destes trabalhos não foi reconhecida. Em 1888, o químico alemão Karl J. Bayer obteve uma patente de um processo melhorado para fazer óxido de alumínio (alumina), o Sistema Bayer. E assim, se iniciou a “era do alumínio”.

### 3.2.2

#### Propriedades Gerais do Alumínio

São apresentadas logo abaixo, na Tabela 3.1, as principais características do alumínio, e que o torna tão atraente dentro do panorama de crescimento industrial mundial:

### 3.3

#### Generalidades Sobre A Bauxita e a Formação da Lama de Lavagem

Segundo Gomes (1988), as bauxitas são rochas ricas em óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), assim como as lateritas são ricas em óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). No entanto, esse termo é usado para designar uma substância que é uma mistura de diversos óxidos de alumínio hidratados, os quais apresentam variações consideráveis de proporções de alumina. Dado o conjunto de certas condições físico-químicas, a bauxita pode se formar à partir de qualquer rocha portadora de alumínio (Alecgrim, 1982).

Os principais constituintes da bauxita são a gibsita ou hidrargilita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), a bohemita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e o diásporo ( $\text{HAlO}_2$ ), em proporções variadas. As impurezas são freqüentes, principalmente a halloysita, caulinita,

nontrolita, óxidos de ferro, de titânio e sílica. Em geral, se apresentam em três formas: concreções; formas esponjosas de estrutura porosa composta principalmente por gibsita; argilas bauxíticas ou bauxita amorfa. Sua cor varia entre o branco, o cinza, o amarelo e o vermelho, com brilho opaco e terroso.

**TABELA 3.1:** Propriedades Gerais do Alumínio (*www.clemente.com.br*)

<b><u>CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TÉRMICA:</u></b>
<p><b>Condutividade elétrica:</b> 60% IACS (padrão cobre)</p> <p><b>Condutividade térmica:</b> ~60% do cobre, 5x maior que o aço</p> <p><b>Obs.:</b> O alumínio apresenta condutividade elétrica e térmica próxima a do cobre com a metade de seu peso.</p>
<b><u>RESISTÊNCIA À CORROSÃO:</u></b>
<p>O alumínio apresenta resistência à corrosão em diferentes meios, entre os quais se destaca:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➔ Água do mar;</li> <li>➔ Álcool etílico e metílico;</li> <li>➔ Gases de combustão;</li> <li>➔ Benzina, nitroglicerina, peróxido de hidrogênio;</li> <li>➔ Ácido nítrico e sulfúrico;</li> <li>➔ Suco de frutas cítricas;</li> <li>➔ Óleos lubrificantes e combustíveis em geral;</li> <li>➔ Ar atmosférico em geral.</li> </ul>
<b><u>REFLETIVIDADE:</u></b>
<p>A refletividade do alumínio pode alcançar 90% atuando em um amplo espectro de comprimento de ondas. Ex.: luminárias, refletores de luz e de calor e telhas.</p>
<b><u>ATÓXICO</u></b>
<p>Os produtos em contato com alumínio não sofrem qualquer tipo de mudança de sabor, aspectos e cheiro em função da atoxidade do metal. Ex.: utensílios domésticos, embalagens para alimentos e remédios.</p>
<b><u>ANTIMAGNÉTICA</u></b>
<p>As ligas de alumínio são antimagnéticas para a maioria dos fins práticos. Ex.: como proteção em equipamentos eletrônicos.</p>
<b><u>ANTIFAGULHANTE</u></b>
<p>As ligas de alumínio praticamente não geram faíscas quando golpeadas ou atritadas. Ex.: transporte e armazenagem de produtos inflamáveis ou explosivos.</p>

Os depósitos de bauxita em geral se formam de duas maneiras distintas:

1. Por processos diretos:



Neste caso, a rocha mãe tem de ser rica em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como os sienitos. Os feldspatos são substituídos por gibsita e o ambiente onde se processa a alteração tem de ser caracterizado por precipitação abundante e boa drenagem.

2. Processo indireto:

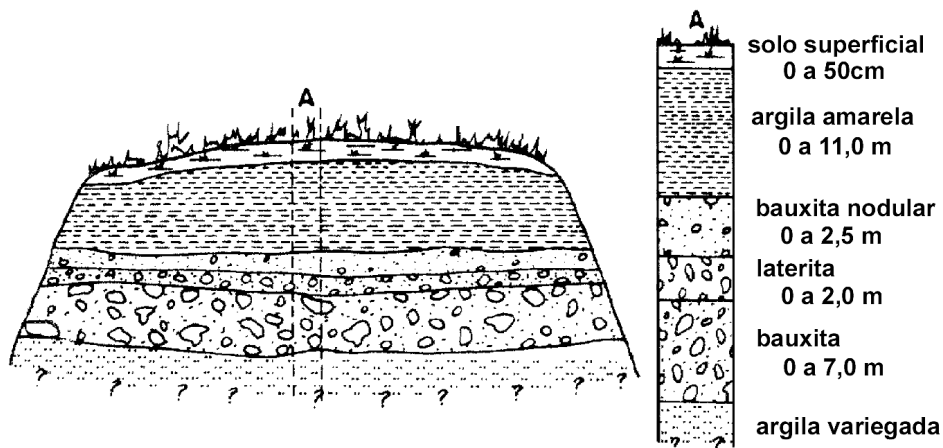


O processo indireto pode ser autóctono, no qual o produto de meteorização se sobrepõe à rocha mãe; ou alóctono, quando o produto de meteorização é mobilizado e transportado para uma maior ou menor distância em relação à rocha de origem.

Toda a bauxita usada no século passado era originária do sul da França, do norte da Irlanda e dos Estados Unidos, chegando a atingir 70 mil toneladas em 1900, quando apenas 40% eram destinados à produção do metal não-ferroso alumínio. O primeiro milhão de toneladas de produção anual de bauxita foi atingido em 1917, quase no fim da Primeira Guerra, quando a mineração havia se expandido para a Áustria, Hungria, Alemanha e Guiana Britânica, na América do Sul. Na época da Segunda Guerra, por volta de 1943, os maiores produtores de bauxita eram os Estados Unidos, a Guiana Britânica, Hungria, Iugoslávia, Itália, Grécia, Rússia, Suriname, Guiana, Indonésia e Malásia. Em 1952, a Jamaica iniciou intensa mineração de bauxita, ultrapassando o Suriname, por anos o maior produtor. Na década de 60, Austrália e Guiné também se tornaram grandes produtores. As primeiras referências sobre a bauxita no Brasil estão nos Anais de 1928, da Escola de Minas de Ouro Preto e a primeira utilização desse minério para a produção de alumina/alumínio em escala industrial foi feita pela ELQUISA - hoje ALCAN - em 1944, durante a 2ª Grande Guerra, nesta mesma cidade.



Em geral, as jazidas de bauxita são encontradas em quatro tipos de depósitos (*www.worldaluminium.com*): em mantos; em bolsões; entre camadas de outros solos e/ou rochas e em depósitos de detritos, que é o resultado da acumulação da bauxita erodida de outros locais. A maior parte destes depósitos estão em países tropicais, sendo que hoje, a maioria das minas estão localizadas na região do Caribe, na América do Sul; Austrália e África. Grandes depósitos em forma de mantos são encontrados na América do Sul. Eles ocorrem em camadas planas, próximas à superfície, podendo se estenderem por quilômetros. Sua espessura pode variar de menos de um metro a até 40 metros, mas em geral, tem em média de 4 a 6 metros de largura. Também são encontrados no Brasil depósitos formados entre camadas de outros solos e/ou rochas. Em geral, estas formações são mais compactas e densas devido à sobrecarga existente. Alguns detalhes adicionais sobre a formação características dos depósitos de bauxita que originaram a lama de lavagem usada neste trabalho podem ser encontrados em Costa et al. (1995) e de Mello et al. (1991). A Figura 3.1 mostra um perfil típico do sub-solo onde se encontram estas jazidas, localizadas na região norte do país.



**FIGURA 3.1:** Perfil Típico de Subsolo da Região de Exploração de Bauxita que Originou A Lama de Lavagem Usada Neste Trabalho (*após Mello et al., 1991*)

A forma como este mineral é extraído varia bastante e não é objetivo deste trabalho entrar no mérito dos processos de exploração. Em torno de 80% da produção mundial de bauxita é extraída de minas superficiais, com o resto, principalmente no sul da Europa e Hungria, de escavações do subsolo

([www.worldaluminium.com](http://www.worldaluminium.com)). Independente do tipo de extração, o mineral, que contém geralmente uma grande quantidade de blocos grossos, é submetido ainda na mina a uma primeira trituração. Se o transporte a ser realizado é de grande quantidade ou longa distância, logo após esta trituração é feita uma secagem para eliminar a água livre, que pode alcançar de 10 a 15% do volume total.

Os procedimentos físicos de enriquecimento ou depuração são difíceis de se aplicar às bauxitas, cujos elementos constitutivos estão muito dispersos e intimamente unidos entre si. Porém, em certos jazimentos tropicais, a bauxita está misturada com argila livre. Uma simples lavagem em água, efetuada em um tambor com grades usadas para já se fazer uma classificação granulométrica do material, elimina esta argila e permite baixar o teor de sílica, que é prejudicial durante a fase de processamento para obtenção do alumínio por ser pouco solúvel (*Krauskopf, 1982*). Desta lavagem com água é que se origina, como já mencionado, a *lama de lavagem*. Como pode se deduzir, as características desta lama, tais como sua composição químico-mineralógica, e seu comportamento vão estar intrinsecamente relacionados com a rocha de origem, e vão variar de jazida para jazida.

A Figura 3.2 mostra uma mina de exploração de bauxita. Na Tabela 3.2 está apresentado um resumo das propriedades e características gerais das bauxitas. Já a Figura 3.3 representa dois tipos de bauxitas, enquanto a Figura 3.4 exibe um reservatório de armazenamento de lama de lavagem, de onde se pode ter uma noção de sua aparência.



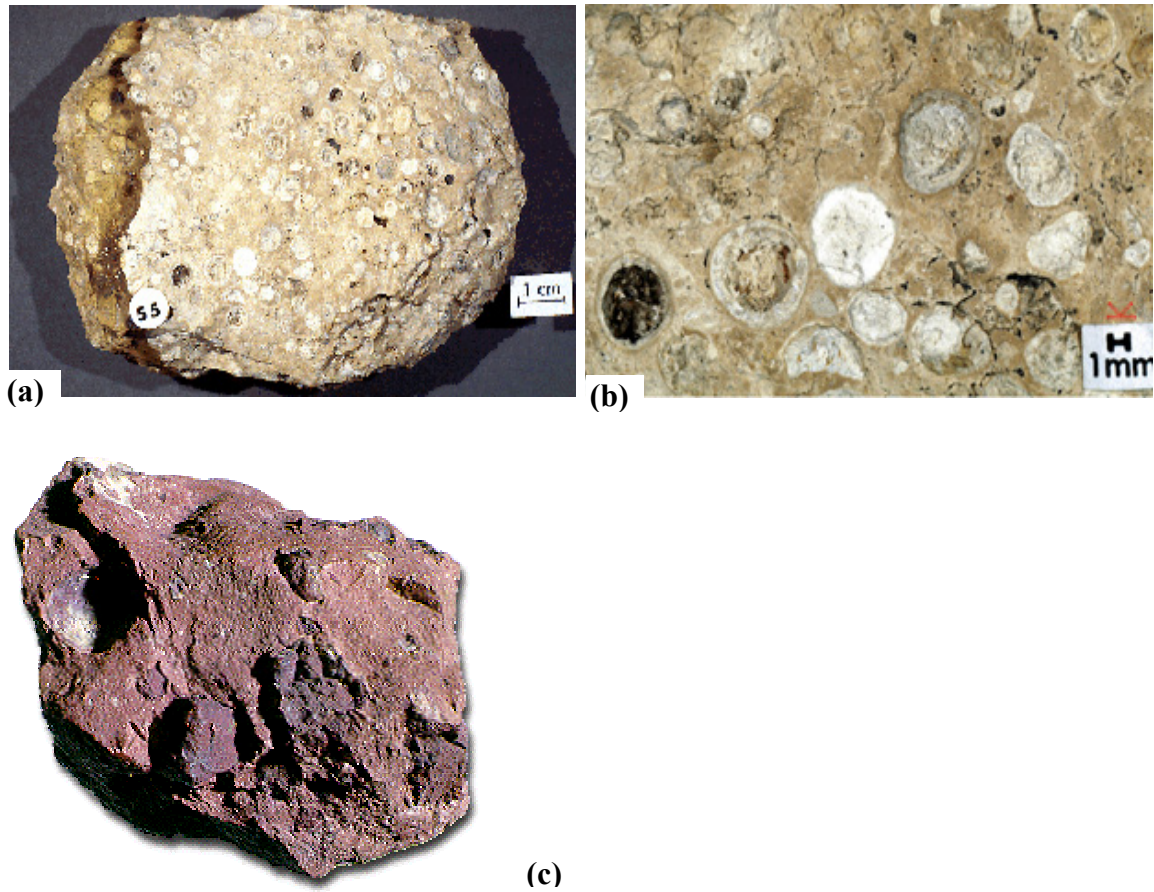
**FIGURA 3.2:** Vista de uma Mina de Exploração de Bauxita.

**TABELA 3.2:** Características Gerais das Bauxitas e seus componentes

(www.aluminio.com.ve; www.bauxita.pdvsa.com; www.worldaluminium.com)

<b>FÓRMULA QUÍMICA</b> - Uma mistura de gibsita, diásporo e bohemita	
<b>COMPOSIÇÃO</b> - 50 a 70% de $Al_2O_3$ , 0 a 25% de $Fe_2O_3$ ; 12 a 40% de $H_2O$ , 2 a 30% de $SiO_2$ além de $TiO_2$ , $V_2O_3$	
<b>CRISTALOGRAFIA</b> – Amorfo	<b>CLASSE</b> – Amorfo
<b>PROPRIEDADES ÓPTICAS</b> – Indefinida	<b>HÁBITO</b> - Granular ou maciço
<b>DUREZA</b> - 1.3	<b>DENSIDADE RELATIVA</b> - 2.2 à 2.55
<b>BRILHO</b> - Opaco a terroso	<b>COR</b> - Branco, cinza, amarelo e vermelho
<b>ASSOCIAÇÃO</b> - Pode estar associada a gibsita, diásporo e bohemita.	
<b>PROPRIEDADES DIAGNOSTICAS</b> - Identificada pelo brilho, densidade, cor e hábito.	
<b>OCORRÊNCIA</b> - Origina-se através de processo supérgeno; forma-se, comumente, sob condições climáticas sub-tropicais a tropicais, por intemperismo, de calcários contendo argila.	
<b>USOS</b> - É usado na produção do alumínio metálico e da alumina ( $Al_2O_3$ ), que por sua vez é usada na fabricação de abrasivos (alundun); produtos refratários; cimento aluminosos; refinação de óleos; alumina ativada; sais de alumínio; etc. Os cimentos com alto teor de alumina caracterizam-se por seu rápido endurecimento e por sua resistência a ação química e de calor. Os principais sais de alumínio produzidos a partir da bauxita são: sulfato, cloretos, sulfatos complexos (alúmens) e hidróxidos, que são utilizados, principalmente, na fabricação de papéis, corantes, curtidores, purificação de água, descolorantes e desodorizantes de óleos minerais, etc.	

	Unidade	Gibsita	Bohemita	Diásporo
<b>Composição</b>		$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	$Al_2O_3 \cdot H_2O$	$Al_2O_3 \cdot H_2O$
<b>Teor de Alumina Máximo</b>	%	65.4	85.0	85.0
<b>Sistema de cristalização</b>		Monoclinico	Orthorhombico	Orthorhombico
<b>Densidade dos grãos</b>	$g/cm^3$	2.42	3.01	3.44
<b>Temperatura para desidratação rápida</b>	$^{\circ}C$	150	350	450



**FIGURA 3.3:** Exemplos de Bauxitas: (a) Concreção; (b) Detalhe dos Oólitos e (c) Bauxita laterítica ([www.aluminio.com.ve](http://www.aluminio.com.ve) e [www.pdvsa.com](http://www.pdvsa.com)).



**FIGURA 3.4:** Vista de um Depósito de Armazenamento de Lamas Vermelhas.



### 3.4

#### O Processo de Produção de Alumínio: O Sistema Bayer e a Formação das Lamas Vermelhas

Existem outros métodos de obtenção de alumina à partir da bauxita e que não vão ser descritos aqui. O fato de se restringir à rápida apresentação do Sistema Bayer é porque atualmente ele é usado quase que em todas as plantas de beneficiamento, mesmo com o elevado consumo de energia que demanda, e todas as lamas vermelhas que foram aqui estudadas originaram-se deste processo.

Os fundamentos do Sistema Bayer, desenvolvido em 1888, na Alemanha, se baseiam no fato de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda cáustica, não o sendo, porém, os outros óxidos constituintes da rocha, que não são aproveitáveis. Os pontos essenciais deste sistema são:

- ⇨ dissolução da alumina da bauxita por ataque a alta temperatura, baixa pressão, por meio de soda concentrada;
- ⇨ depois da separação dos resíduos insolúveis, a precipitação parcial da alumina em solução, por meio da diminuição da temperatura e diluição da lixívia de aluminato de sódio.

Portanto, inicialmente dissolve-se a bauxita em soda cáustica, obtendo-se um aluminato de sódio em um meio com temperatura e concentração controlados. Junto com esta solução, obtém-se também um resíduo sólido, constituído por óxidos diversos. Através de hidrólise, recupera-se a alumina hidratada original da rocha. Os resíduos da soda são descartados e a alumina é secada e calcinada, para eliminação da água de cristalização. Estes resíduos sólidos insolúveis se transformam, na maior parte, em uma lama muito fina, e provêm da desagregação do constituinte alumino-férrico da bauxita. São chamados de *lamas vermelhas* por sua cor, devido ao predomínio dos óxidos de ferro. Porém, há resíduos da produção de alumina com a cor negra, por exemplo, devido à incorporação de outras substâncias no processo, tais como o açúcar (Li, 2001) Sua composição varia em relação às impurezas existentes na bauxita de origem e de como foi seu comportamento durante o ataque com soda (Anjos & Silva, 1983).

Na prática, a rocha, que já foi submetida na mina a uma britagem inicial, sofre outra, juntamente com uma moagem úmida, para se obter um produto 100% abaixo da peneira nº 10 (~3 mm, classificação areia grossa no Sistema Internacional), para se ter um bom ataque da soda. Ela é misturada ao minério e mantida algumas horas a 85°C para dissolução e início de precipitação da sílica presente, formando um composto insolúvel de silicatos duplo de alumínio e sódio. Se esta sílica fosse mantida em solução, ela poderia se precipitar mais tarde sobre a alumina hidratada que vem da hidrólise, tornando-a imprestável.

Logo após, a polpa formada entra em fase de digestão, sendo bombeada continuamente para autoclaves mantidas em série. É adicionada mais soda cáustica a 150°C e tudo é mantido em agitação por uma hora. O novo subproduto é submetido a 3 estágios de resfriamento em tanques de expansão, a pressões decrescentes. O vapor regenerativo liberado no topo do tanque é reutilizado no pré-aquecimento da soda.

Em seguida, o material é submetido a um processo de decantação. Aí, separa-se o resíduo insolúvel, base originadora da lama vermelha, da solução útil de aluminato de sódio. São usados floculantes para acelerar o processo de deposição, que vão influenciar no tipo de produto final rejeitado. Durante esta decantação, o transbordo é mantido com 40 mg de sólidos/litro. Ele sofre uma filtragem de segurança, atravessando uma camada de cal hidratada, de onde sai com 12 mg de sólidos/litro de solução, que é encaminhada a um processo de hidrólise.

O resíduo sólido decantado é submetido a uma nova lavagem e filtragem final à vácuo para melhor aproveitamento da solução de aluminato útil, que é reunida ao transbordo do espessador dos decantadores. O resíduo sólido após esta lavagem e filtragem é rejeitado sob a forma de um "cake", com aproximadamente 55% de sólidos em peso. Em alguns casos, este "cake" é diluído na própria soda cáustica e transportado para diques de armazenamento em teor final de sólidos variável, com a soda sendo novamente reintegrada ao circuito. Já em outras circunstâncias, ele tem seu pH reajustado antes de sua disposição final, através da adição de ácido sulfúrico por meio de cicloneamento. Em outros casos ainda, é adicionado outros produtos químicos ao resíduo para acelerar seu processo de

sedimentação no reservatório. E ainda em outras situações, este rejeito é ainda mais espessado para ser disposto em pilhas, quando então o máximo de soda cáustica é recuperada. Ou seja, a característica final das lamas vermelhas irá também variar de local para local em decorrência do tipo de preparo feito antes de seu lançamento final nos reservatórios de armazenamento, o que vem dificultar ainda mais se chegar a um modelo que seja único na descrição de seu comportamento.

Podem haver variações no processo de obtenção, forma de eliminação e armazenamento da lama vermelha de local para local. Porém, as bases de produção pelo Sistema Bayer, citadas acima, são mais ou menos constantes. Maiores detalhes podem ser obtidos em Anjos & Silva (1983), Sigmond (1952), Scott (1978), dentre outros. O processo está esquematizado nas Figuras 3.5 e 3.6. As porcentagens indicadas na Figura 3.6 são variáveis de acordo com o local do processamento. Prestidge et al. (1999) apresentaram um estudo sobre o comportamento de interação interpartículas durante o processo Bayer, onde analisam a influência do volume de partículas em suspensão e temperatura na obtenção da alumina e, conseqüentemente, nos resíduos. Hind et al. (1999) apresentam uma revisão bem abrangente sobre a literatura relacionada aos sólidos oriundos do sistema Bayer, entre eles, a lama vermelha, discutindo sobre sua natureza e as influências que recebe devido às condições envolvidas no processo, visando o entendimento de aspectos que poderiam torná-lo mais eficiente.

### 3.5

#### **Composição Químico-Mineralógica das Bauxitas e de seus Resíduos de Mineração e Processamento**

A bauxita não é uma espécie mineralógica definida. Este termo, como já visto, se refere a um mineral ou a uma mistura de substâncias minerais, essencialmente constituídas de hidratos de alumina, óxido de ferro, silicato de alumínio e de óxido de titânio. Portanto, a sua composição mineralógica, bem como de seus resíduos, tanto de lavagem como de processamento, variará de

acordo com a jazida de origem. O que será apresentado aqui será uma breve revisão das composições mineralógicas de bauxitas e seus resíduos apresentadas na literatura bem como dos resultados obtidos nos resíduos com os quais se trabalhou.

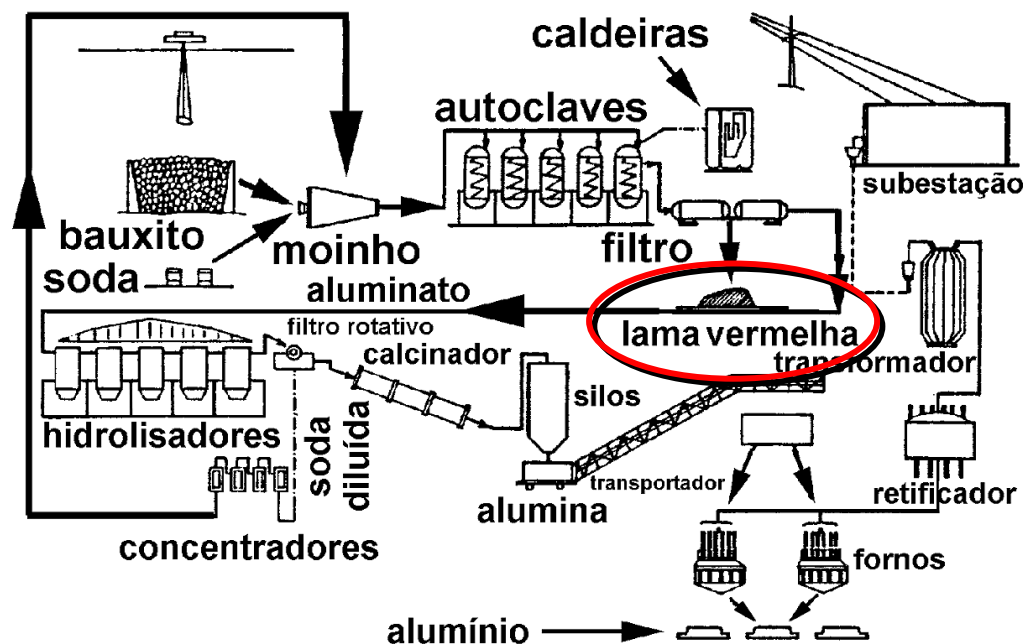


FIGURA 3.5: Fluxograma da Fabricação de Alumínio (adaptado de Santos, 1989)

Na composição das bauxitas entram diversas espécies naturais de hidrato de alumina:

- ⇨ monohidrato  $Al_2O_3 \cdot H_2O$ , do qual existem duas variedades cristalográficas: o tipo  $\alpha$  ou diásporo, e o  $\gamma$  ou bohemita;
- ⇨ o trihidrato  $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ , variedade denominada hidrargilita ou geralmente gibsitita.

A distinção dos hidratos tem importância para definir a qualidade comercial de uma bauxita, diferenciando o seu comportamento ao dissolver-se em soda cáustica, que é o procedimento base para a extração industrial da alumina. O trihidrato é muito solúvel desde uma temperatura próxima de  $100^\circ C$ . O monohidrato bohemita, por sua vez, precisa de  $180^\circ C$  ou mais para obter uma solubilidade suficiente, enquanto o do tipo diásporo, acima de  $250^\circ C$  (ver a



Tabela 3.2). Em geral, as bauxitas de regiões temperadas pertencem ao tipo monohidrato bohemita, enquanto que as das regiões tropicais são do tipo gibsita. Mas em algumas regiões européias são encontradas gibsita, enquanto que em regiões tropicais como a Jamaica, contém bohemita. Todas as bauxitas brasileiras conhecidas até o ano de 1989 eram gibsíticas (Santos, 1989).

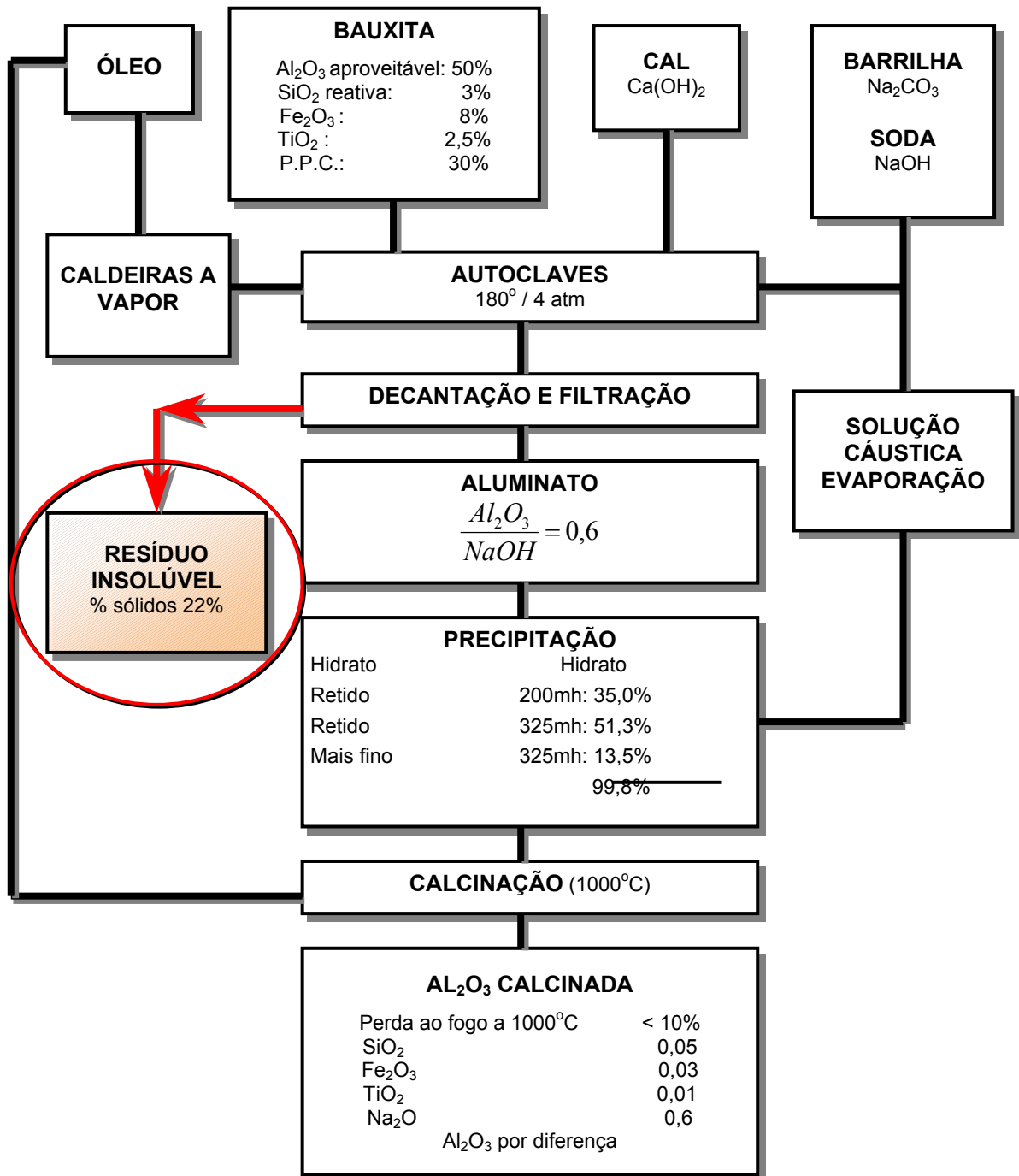


FIGURA 3.6: Processo Bayer para Produção de Alumina (adaptado de Santos, 1989).

Sendo o estado de trihidrato uma fase estável às temperaturas de formação das bauxitas por lixiviação, a presença de hidratos menos ricos em água (os monohidratos) em algumas bauxitas é explicada como um efeito de aplicação de pressão, que atuam posteriormente sobre os depósitos de bauxita já formados. Isto pode ser confirmado pelo fato de que a densidade da bohemita é mais elevada que a do trihidrato ou a gibsita. Uma outra confirmação é o fato de que a bohemita é a forma estável a 100°C, temperatura que pode ser atingida durante os fenômenos de compressão. O outro tipo de monohidrato, o  $\alpha$  ou o diásporo, se forma localmente por pressões ainda mais elevadas. Porém, existem certas jazidas tropicais que contém bohemita e nunca foram submetidas a grande pressões. Portanto, a presença de gibsita nas argilas laterizadas é justificada à partir de sua compacidade (*Santos, 1989*).

Nas bauxitas, os hidratos de alumina às vezes existem em estado de cristais, melhor ou pior constituídos, identificáveis ao microscópio, geralmente em tamanhos inferiores a 1 micron, muito unidos ao óxido de ferro, em um aglomerado que se chama gel alumino-férrico. Em geral, o óxido de ferro se encontra na forma anidra  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e às vezes, em pequena quantidade, no estado hidratado  $\text{FeOH}\cdot\text{OH}$ . Com menos freqüência, em certas bauxitas há o ferro no estado  $\text{FeS}_2$  e incluso de silicato  $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SiO}_2$ .

As características exteriores (homogeneidade, coloração, compacidade, dureza) das bauxitas são muito variáveis segundo a sua origem, composição e formação. No exterior das massas homogêneas de gel alumino-férrico, onde está a maioria do óxido de ferro e hidrato de alumínio, se encontram freqüentemente nódulos de diâmetro muito variável, em que predomina um ou outro. As suas cores variam consideravelmente, dependendo do teor de ferro e outras impurezas presentes. Os tipos mais comuns são:

- a) bauxitas marrons: ricas em ferro e pobres em sílica, com teor apreciável de matéria orgânica, podendo também serem classificados como argilas aluminosas.
- b) bauxitas vermelhas: ricas em óxidos e hidróxidos de ferro e pobres em sílica;
- c) bauxitas brancas e cinzas: pobres em ferro e ricas em sílica;

No Brasil, as bauxitas mais comuns são as de cor vermelha.

Sempre se encontra sílica na forma de silicato de alumínio nas bauxitas, mas algumas contêm, igualmente, importantes quantidades de sílica na forma de quartzo. A caolinita está, em geral, muito distribuída na rocha, enquanto o quartzo pode existir em cristais de espessuras bastante variável. Nas bauxitas para a fabricação de alumina, é melhor que se tenha um baixo teor de  $\text{SiO}_2$ . O óxido de titânio,  $\text{TiO}_2$ , está sempre presente em quantidades apreciáveis (2 a 4%, em geral) na forma de cristais refringentes de rutilo e de anatásio excessivamente dispersos. Em função disto, é impossível separar por meios físicos o  $\text{TiO}_2$  concentrado nos resíduos de tratamento.

Nos casos dos resíduos de processamento, as lamas vermelhas, a composição mineralógica estará estreitamente relacionada à composição química e comportamento da bauxita durante o ataque de soda. Basicamente as lamas são constituídas por hematitas e silicatos remanescentes da bauxita. Uma maior quantidade de ferro induzirá maior densidade dos grãos, aumentando a velocidade de sedimentação. As lamas de lavagem e vermelha são dos resíduos que apresentam uma das maiores taxas de sedimentação devido à elevada densidade dos grãos que as compõem (*Vick, 1983*). Enquanto que na lama de lavagem podem ser encontrados quartzo e argilo-minerais, estes estão ausentes na lama vermelha, uma vez que a sílica reage para a formação dos silicatos com a soda cáustica (*Somogyi & Gray, 1977; Vick, 1983*). A não ocorrência de argilo-minerais foi confirmada na lama vermelha OP neutralizada através de análise mineralógica, utilizando-se a técnica de difração de raios X.

A composição química é, igualmente, muito variável nas bauxitas. Ela muda segundo o tipo do hidrato base, a proporção de óxido de ferro e do silicato de alumina. As bauxitas menos silicosas são as que mais interessam à indústria do alumínio, uma necessidade até para o sucesso do Sistema Bayer, uma vez que o silício não é digerido no processo, sendo considerado uma impureza. Aquelas bauxitas que são mais ricas em sílica são usadas na fabricação de produtos refratários, cimentos aluminosos, etc.

A composição típicas das bauxitas usadas para a obtenção da alumina tem sido encontrada de variar, usualmente, nos limites apresentados pela Tabela 3.3.

Além dos constituintes principais que ali estão indicados, são encontradas nas bauxitas impurezas em espécies e quantidades variáveis. O cálcio é encontrado na forma de carbonato, mas em pequenas quantidades de uma maneira geral, exceto em certas bauxitas de origem calcárea, onde pode haver importantes inclusões deste material. Todas bauxitas contém alguma matéria orgânica. A quantidade é muito variável, em geral mais elevada nas bauxitas tropicais. Este material orgânico é extraído parcialmente durante o processamento e tem também uma certa influência sobre as condições de utilização do mineral. A Tabela 3.4 apresenta um exemplo da composição de quatro bauxitas de diferentes países. Já a Tabela 3.5 mostra a análise química de algumas bauxitas brasileiras.

**TABELA 3.3:** Constituição Química Básica das Bauxitas (*adaptado da Ed. URMO, 1967*)

ELEMENTO	PROPORÇÃO
água de constituição	12 a 30%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40 a 60%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 a 30%
SiO <sub>2</sub>	1 a 8%
TiO <sub>2</sub>	2 a 4%

No caso da lama de lavagem, estarão presentes todos os componentes químicos da rocha de origem. Já nas lamas vermelhas, o resultado final dependerá da uniformidade da bauxita processada e da tecnologia de refinamento aplicada. Em geral, 76 a 93% do teor de óxido de alumínio original é dissolvido, entrando somente o restante na composição do resíduo. A sílica também reage prontamente, precipitando-se na forma de silicatos de composição variada nos rejeitos. O ferro e o titânio da rocha matriz permanecem, bem como outras impurezas tais como o gálio, vanádio, fósforo, níquel, cromo, magnésio, etc. Já o sódio e o cálcio aparecem como uma consequência do processo. As diferenças nos

métodos de processamento da bauxita são refletidas principalmente nos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CaO}$  (Bulkai, 1983).

**TABELA 3.4:** Análise Química de Algumas Bauxitas de Diferentes Países (*adaptado da Ed. URMO, 1967*)

ELEMENTO (%)	FRANÇA	GUIANA	JAMAICA	GUINÉ
água combinada	11 - 13	25 - 30	22 - 26	22 - 24
$\text{Al}_2\text{O}_3$	52 - 57	55 - 60	50 - 55	40 - 45
$\text{SiO}_2$ combinada	3 - 8	1 - 3	1 - 3	1 - 3
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	24 - 28	3 - 8	15 - 20	25 - 30
$\text{TiO}_2$	2 - 3	2 - 3	2 - 3	2 - 4
Estado do Hidrato de alumina	Monohidratado	Trihidratado	Tri + Monohidratado	Trihidratado

Os óxidos e hidratos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), por serem praticamente insolúveis nas soluções alcalinas, são encontrados em sua totalidade nos resíduos. A insolubilidade do  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  não é absoluta, havendo uma dissolução muito pequena de Fe em ferrito de sódio ( $\text{FeO}_2\text{Na}$ ). Na verdade, existe uma reação idêntica a da dissolução da alumina, com os mesmos fenômenos de equilíbrio e sobressaturação em função da temperatura e concentração de  $\text{NaOH}$ , mas em escala de teor muito mais baixa. Estes fenômenos, pelas possíveis precipitações de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , condicionam o teor de ferro na alumina produzida e precisam que ser controlados para que ocorram numa proporção mínima (*Santos, 1989*).

A Tabela 3.6 apresenta uma faixa de variação de componentes químico-mineralógicos usualmente encontrados em lamaz vermelhas, logo ao final do processamento.

**TABELA 3.5:** Análise Química de Algumas Bauxitas Brasileiras (*apud Santos, 1989*)

PROCEDÊNCIA	Perda ao fogo (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
Claro, Poços de Caldas (MG) (Campo do Sérgio)	30	7	58	1	4
Duro, Poços de Caldas (MG) (Campo do Saco)	31	2.5	59	1	6.5
Mole, Poços de Caldas (MG) (Mina Coralina)	30.5	1.5	58	1	9
Escuro, Poços de Caldas (MG) (C.G.M.)	28.2	5.5	55.7	1.1	9.4
Claro, Poços de Caldas (MG) (C.G.M.)	32.2	1.1	65.2	1	0.6
Belo Horizonte (MG) (Morro Velho)	30.2	ñ. det.	52.9	ñ. det.	13.7
Lajes (SC)	27.9	8.92	61	0.88	0.91
Mogi das Cruzes (SP)	28.6	9.2	58.3	0.21	3.6
Território do Rio Branco	27.1	1.4	53.5	1.85	17.1
Casa Grande, Mogi das Cruzes	26.9	6.87	53.5	0.87	8.94
Tipo Varinhas. Mogi das Cruzes	26.6	11.7	49.8	ñ. det.	10
Biritiba Uçu, Mogi das Cruzes	27.2	15.8	55.2	0.25	1.5
Poços de Caldas (MG)	30.9	2.06	59.4	1	6.64
Poços de Caldas (MG)	31.4	2.3	56.4	1.5	8.2
Poços de Caldas (MG)	28.1	3.5	55.3	0.87	10.2
Poços de Caldas (7 amostras) (MG)	28.4 a 30,8	0.79 a 2.63	56.5 a 59.2	0.61 a 1.4	7.98 a 9.69
Poços de Caldas (MG)	33.6	2	60.6	1.3	2.4
Andradas (MG)	30.6	2.3	56.4	1.5	9.4
Águas do Prata (SP)	30	1.2	55.6	1.66	9.56
213, Campo do Aerão, Poços de Caldas (MG)	25.5	19.6	48.7	0.4	5.8
Motuca (MG)	30.3	3.1	62.3	ñ. det.	4.8
Ouro Preto (MG)	31.3	5.3	56.3	0.5	5.1
Fazenda do Recreio, Poços de Caldas (MG)	33.7	0.4	64.4	ñ. det.	1.6
Lagoinha, Conceição do Muqui (ES)	31.5	6.4	58	0.4	3.5
Barra do Piraí (RJ)	31.6	1.9	61.2	0.5	4.8
<b>OBS:</b> o teor de TiO <sub>2</sub> quando não determinado, está incluído no teor de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Análises feitas no IPT, INT e DNPM.					

Li & Rutherford (1996) analisaram a composição químico-mineralógica de sete diferentes tipos de bauxitas da região sudestes do Brasil e suas correspondentes lammas vermelhas. Para tanto, empregaram a técnica de difração de raios X e a de fluorescência de raios X, além de outras, e chegaram a conclusão que a composição mineralógica da bauxita é um dos fatores mais importantes e que mais influenciam nas propriedades das lammas vermelhas. Os resultados obtidos por eles estão representados na Tabela 3.7. Eles se certificaram que as

bauxitas e suas lamas vermelhas teriam uma mineralogia muito similar entre si, mas as quantidades presentes variaram muito. Aí aparece um subproduto característico do processamento, a *sodalita Bayer*, cuja quantidade influencia muito o comportamento final do resíduo. Ele tem uma alta capacidade de intercambiar íons de sódio e uma das conseqüências de sua presença é a redução da velocidade de deposição das partículas sólidas em soro cáustico (Li, 2001).

**TABELA 3.6:** Componentes Químico-Mineralógicos Mais Comuns Nas Lamas Vermelhas (Bulkai, 1983)

CONSTITUINTES	% EM PESO (base seca)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25 - 60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 25
SiO <sub>2</sub>	1 - 25
TiO <sub>2</sub>	1 - 10
Na <sub>2</sub> O	1 - 10
CaO	2 - 8
perda por calcinação	5 - 15

A Tabela 3.8 faz a mesma comparação para os resultados da fluorescência por raios X, somente para a fração menor que a #100. Note que, apesar de esperado, não foi detectado a *sodalita Bayer* nestas lamas vermelhas brasileiras.

Na Tabela 3.9, estão os resultados da análise químico mineralógica da lama vermelha OP neutralizada. As diferenças encontradas entre as diferentes fontes podem ser devido às rochas de origem. A Tabela 3.10 compara a análise espectrográfica de emissões ópticas de diversas lamas vermelhas, inclusive da lama vermelha OP neutralizada. No cabeçalho, estão registrados os locais de origem das jazidas de bauxitas, além de onde as mesmas foram processadas. As diferenças de concentração dos elementos encontradas nesta tabela entre os diversos materiais podem ser creditadas principalmente ao fato de que as constituições químico-mineralógicas entre as rochas de origem se diferem entre si.

Outro fato que pode contribuir para a ocorrência destas diferenças são pequenas mudanças que podem ter ocorrido nas etapas de processamento entre uma planta e outra, tal como tempo de digestão ou tipo de fluido de ataque utilizado, suficientes para influir na característica final do resíduo.

**TABELA 3.7:** Composição Mineralógica de Bauxitas e Lamas Vermelhas Brasileiras Por Meio de Difração de Raios X. (*adaptado de Li e Rutherford, 1996*).

<b>BAUXITAS</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Mineral Alumínio</b>	<b>Mineral de Ferro</b>		<b>Mineral Titânio</b>	<b>Argilo-Mineral</b>
	<b>gibbsite</b>	<b>hematita</b>	<b>goetita</b>	<b>anatásio</b>	<b>caolinita</b>
<b>1</b>	50-75%	5-25%	5-25%	-	-
<b>2</b>	>75%	5-25%	<5%	<5%	-
<b>3</b>	50-75%	<5%	5-25%	<5%	-
<b>4</b>	50-75%	5-25%	5-25%	-	-
<b>5</b>	50-75%	5-25%	5-25%	<5%	-
<b>6</b>	>75%	5-25%	5-25%	-	-
<b>7</b>	>75%	5-25%	<5%	<5%	-
<b>LAMAS VERMELHAS</b>					
<b>Amostra</b>	<b>Mineral de Ferro</b>		<b>Mineral Titânio</b>	<b>Sub produto do Sistema Bayer</b>	
	<b>hematita</b>	<b>goetita</b>	<b>anatásio</b>	<b>sodalita Bayer</b>	
<b>1</b>	50-75%	25-50%	<5%	-	
<b>2</b>	50-75%	25-50%	5-25%	-	
<b>3</b>	5-25%	>75%	<5%	-	
<b>4</b>	25-50%	50-75%	<5%	-	
<b>5</b>	25-50%	25-50%	5-25%	-	
<b>6</b>	25-50%	50-75%	<5%	-	
<b>7</b>	>75%	5-25%	5-25%	-	



**TABELA 3.8:** Mineralogia de Bauxitas e Lamas Vermelhas Brasileiras – Florescência de Raios X – Fração <#100. (adaptado de Li & Rutherford, 1996).

Amostra	Tipo de material	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Perda por fogo
1	bauxita	42.16	28.71	0.77	4.02	0	0	24.34
	lama vermelha	71.90	6.79	1.35	7.79	3.15	0.36	8.66
2	bauxita	31.69	37.06	0.37	4.12	0	0	26.76
	lama vermelha	65.25	7.92	0.6	10.87	4.96	0	10.40
3	bauxita	38.59	31.89	0.54	4.22	0	0	24.75
	lama vermelha	64.62	10.84	0.75	7.97	2.92	0.12	12.77
4	bauxita	32.92	37.08	1.1	3.98	0	0	24.91
	lama vermelha	62.17	11.99	2.33	9.07	3.17	0.73	10.54
5	bauxita	30.33	37.01	1.40	4.08	0	0	27.18
	lama vermelha	61.68	9.37	3.35	10.41	4.24	1.49	9.47
6	bauxita	32.38	36.91	0.33	4.04	0	0	26.33
	lama vermelha	60.42	13.48	0.76	9.25	3.21	0.36	12.54
7	bauxita	30.83	37.62	1.24	3.73	0	0	26.57
	lama vermelha	65.70	7.82	3.75	9.66	3.61	1.36	8.11

**TABELA 3.9:** Análise Químico-Mineralógica da Lama Vermelha OP Neutralizada (adaptado de Alves, 1992 e Santos, 2000)

CONSTITUINTES	% EM PESO (base seca)	
	Alves (1992)	Santos (2000)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	49.5	38,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.5	11,65
SiO <sub>2</sub>	5.0	11,98
TiO <sub>2</sub>	3.0	0,21
Na <sub>2</sub> O	2.7	1,54
CaO	9.5	1,40
perda por calcinação	12.7	sem informação

**TABELA 3.10:** Análise Espectrográfica de Emissões Ópticas de Lamas Vermelhas % em peso seco (*adaptado de Sigmond, 1952*)

ELEMENTO	JAMAICA	SURIN/ÁFR.	AUST.	USA	L. V. OP neutralizada
<b>Al</b>	2 - 4	5 - 10	3 - 8	1 - 3	0.3 - 3
<b>B</b>	< 0.005	0.005	0.005	0.005	-
<b>Ba</b>	0.02	0.01	0.01	0.01	-
<b>Be</b>	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	-
<b>Ca</b>	5 - 10	3 - 6	4 - 6	20 - 40	0.3 - 3
<b>Co</b>	0.01	< 0.005	0.01	< 0.002	-
<b>Cu</b>	0.02	< 0.005	0.01	0.002	< 0.001
<b>Cr</b>	0.1	0.05	0.1	0.005	< 0.0004
<b>Fe</b>	10 - 20	5 - 10	20 - 40	5 - 10	0.03 - 0.3
<b>K</b>	0.03	0.2	0.1	0.3	-
<b>Mg</b>	0.1	0.03	0.1	0.3	0.01 - 0.1
<b>Mn</b>	1.0	0.02	0.4	0.2	< 0.0002
<b>Na</b>	0.5	1 - 3	2 - 4	1.0	-
<b>Ni</b>	0.1	< 0.005	0.03	0.002	-
<b>Pb</b>	0.02	0.01	0.02	0.005	-
<b>Si</b>	0.8	2 - 4	2 - 4	5 - 10	-
<b>Sr</b>	0.05	0.01	0.03	0.03	-
<b>Ti</b>	2 - 4	3 - 6	2 - 4	1 - 2	0.01 - 0.1
<b>V</b>	0.1	0.1	0.03	0.01	< 0.0006
<b>Zr</b>	0.1	0.2	0.1	0.2	-

A Tabela 3.11 resume os valores encontrados na análise químico-mineralógica dos cinco resíduos estudados neste trabalho. Os dados da lama vermelha OP neutralizada são de novas análises, feitas em amostras diferentes daquelas apresentada na Tabela 3.9. Observa-se que quase não há diferenças entre as lamas OP neutralizada e não neutralizada. Assim, é de se supor que qualquer diferença de comportamento que venha ser notada entre elas deverá ser creditada,

então, à ação do fluido dos poros, uma vez que foi verificada semelhança na granulometria quando feita em água, como será mostrado mais adiante. Nota-se a grande % de minério de ferro, o que deve justificar uma densidade dos grãos elevada. Outra diferença marcante entre todos os resíduos aí apresentados está na quantidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , justificada por se tratarem de lamas originárias de bauxitas de diferentes jazidas. Os resultados estão de acordo com os da Tabela 3.9.

**TABELA 3.11:** Análise Químico - Mineralógica de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita Usados Neste Trabalho

ELEMENTO	Lama de lavagem	Lama vermelha SL	Lama vermelha PC	Lama vermelha OP neutralizada	Lama vermelha OP não neutralizada
$\text{SiO}_2$	21.0	11.9	18.50	5.7	6.2
$\text{Al}_2\text{O}_3$	31.2	27.4	25.7	17.2	17
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	28.0	31.6	20.6	52.8	50.3
$\text{FeO}$	0.28	0.14	0.28	0.56	0.42
$\text{CaO}$	0.17	2.3	0.45	3.1	4
$\text{MgO}$	<0.10	0.10	0.13	0.15	0.21
$\text{TiO}_2$	3.8	3.4	2.80	5.5	5.5
$\text{P}_2\text{O}_5$	<0.05	<0.05	0.26	0.37	0.35
$\text{Na}_2\text{O}$	0.51	7.9	9.4	1.9	2.4
$\text{K}_2\text{O}$	0.02	0.01	2.4	0.15	0.12
$\text{MnO}$	<0.01	<0.01	0.32	0.06	0.05
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.04	0.051	0.006	0.097	0.088
$\text{NiO}$	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003
$\text{F}$	0.047	0.05	0.20	0.086	0.10
$\text{Cl}$	0.008	0.39	0.68	0.031	0.043
<b>perda ao fogo</b>	14.84	14.56	13.20	11.37	12.67
<b>SOMA TOTAL</b>	100.08	99.79	98.98	99.06	99.45

Algo interessante de também se notar na Tabela 3.11 são as diferenças entre a lama de lavagem e a lama vermelha SL, que é o resíduo de processamento da primeira. Estas diferenças podem dar uma idéia do efeito dos processos

impostos pelo Sistema Bayer à bauxita. A mais marcante é que há uma grande redução do  $\text{SiO}_2$  devido ao ataque de  $\text{NaOH}$  e surgimento de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ .

A variação média da composição dos resíduos lama vermelha SL, de 1988 a 1991 foi mostrada por Rodrigues & Moura (1992). Os resultados estão reproduzidos na Tabela 3.12.

**TABELA 3.12:** Composição Químico-Mineralógica Média da Lama Vermelha SL  
(adaptado de Rodrigues e Moura, 1992)

CONSTITUINTES	1988	1989	1990	1991
$\text{SiO}_2$	16.5	15.1	14.2	12.9
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17.1	18.4	19.5	19.8
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	44.4	43.6	42.8	43.2
$\text{TiO}_2$	3.5	3.7	3.8	3.8
$\text{Na}_2\text{O}$	7.2	7.4	7.5	7.0
$\text{CaO}$	1.8	2.0	2.3	3.0
perda ao fogo	9.3	9.6	10	10.5

### 3.5.1

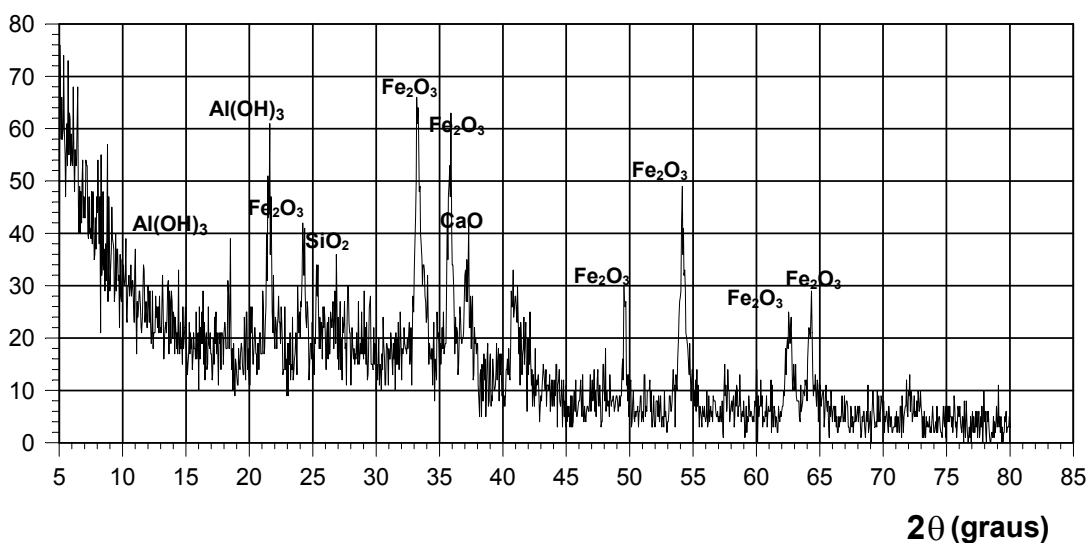
#### Alguns Resultados de Análises por Difração de Raios X.

Pela técnica de difração de raios X, um feixe destes raios atinge a superfície da amostra analisada e é difratado, sendo detectado por um contador Geiger que se move a uma velocidade constante em um arco de círculo, cujo centro é o centro da amostra. O contador registra graficamente em posição e intensidade, os ângulos  $\theta$  das difrações correspondentes, que estão relacionados com a inclinação e posição do raio emitido. O resultado consiste de um gráfico onde são apresentados vários picos de comprimentos diferentes ao longo do arco de varredura utilizado, chamado difratograma. A posição deste pico em função do

ângulo  $\theta$  da emissão permite determinar o comprimento de onda emitida, que é característica do elemento presente na amostra e função das distâncias interplanares de sua estrutura cristalina. Uma vez este comprimento calculado, ele é comparado com uma série de arquivos preexistentes de minerais conhecidos e desta maneira, é obtida a classificação mais provável do composto presente no material analisado. Por se tratar de comparação, portanto, os resultados apresentados estão sujeitos a uma margem de erro.

Os resultados mostrados nas Figuras 3.7 a 3.15, à seguir, foram obtidos à partir de análises de difração por raios X em amostras úmidas e secas dos resíduos de bauxita pesquisados, tanto os de lavagem como os de processamento. A técnica usada para a preparação de todas as amostras foi a mesma que está descrita em Santos (1989). Os gráficos correspondentes às amostras úmidas apresentam um maior nível de ruído, o que é considerado normal, ainda mais que usualmente esta análise é conduzida em material seco (*Santos, 1989*).

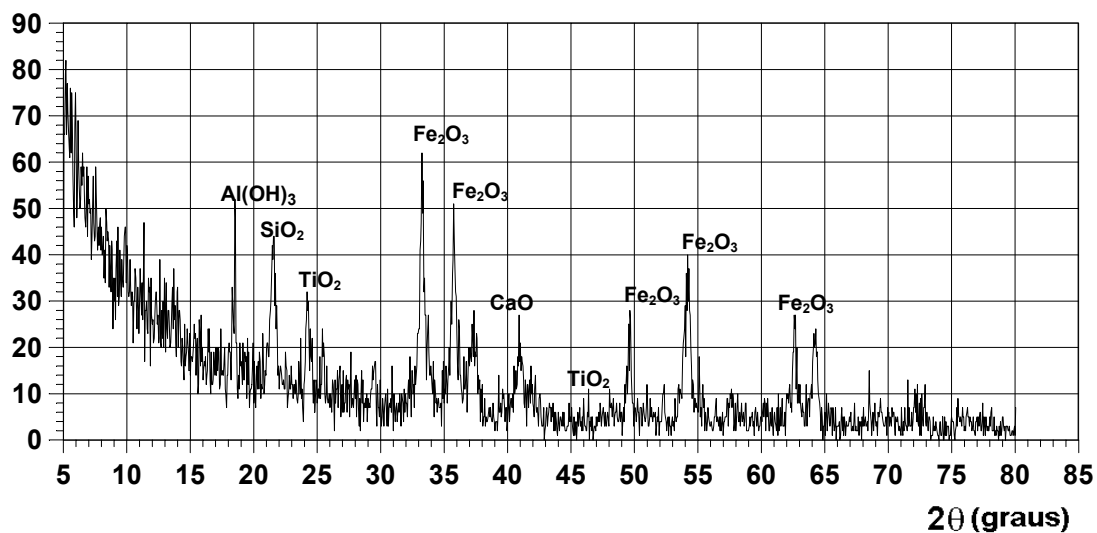
A composição química-mineralógica apresentada nas Tabelas 3.11 a 3.21 consiste na relação dos compostos ou fases que mais se ajustaram à partir do gráfico obtido e, portanto, indicam os constituintes prováveis da amostra ensaiada. O número na frente de cada nome corresponde à sua ficha de catálogo. Esta técnica não dá indicação da quantidade de cada composto presente.



**FIGURA 3.7:** Difratograma da Lama Vermelha OP Neutralizada – Material Úmido.

**TABELA 3.13:** Resultados da Difração por Raios X Da Lama Vermelha OP Neutralizada - Material Úmido.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
27-0605	$\text{SiO}_2$	Cristobalita
37-1407	$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
21-1272	$\text{TiO}_2$	Anatásio
23-0606	$\text{Ti}_3\text{O}_5$	Óxido de titânio
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	gibbsita



**FIGURA 3.8:** Difratograma da Lama Vermelha OP Neutralizada – Material Seco.

**TABELA 3.14:** Resultados da Difração por Raios X Da Lama Vermelha OP Neutralizada - Material Seco.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
27-0605	$\text{SiO}_2$	Cristobalita
37-1407	$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
21-1272	$\text{TiO}_2$	Anatásio
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	gibbsita
22-0948	$\text{Na}$	sódio

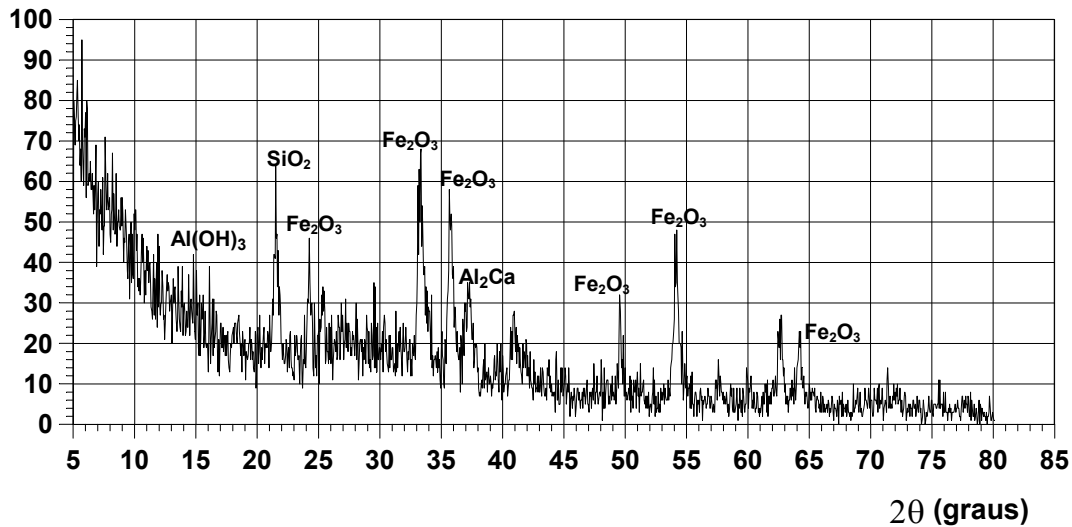


FIGURA 3.9: Difratoograma da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Úmida.

TABELA 3.15: Resultados de Difração por Raios X na Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Material Úmido.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
21-1272	$\text{TiO}_2$	Anatásio
37-1407	$\text{CaO}$	Óxido de cálcio
27-0605	$\text{SiO}_2$	Cristobalita
38-0449	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Alofana
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
1-1156-	$\text{Al}_2\text{Ca}$	Alumínio cálcio

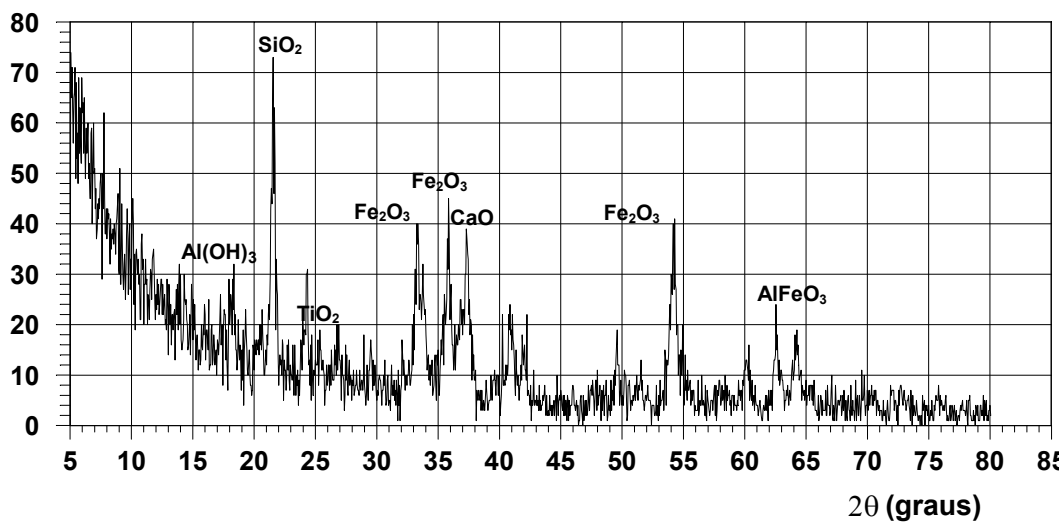
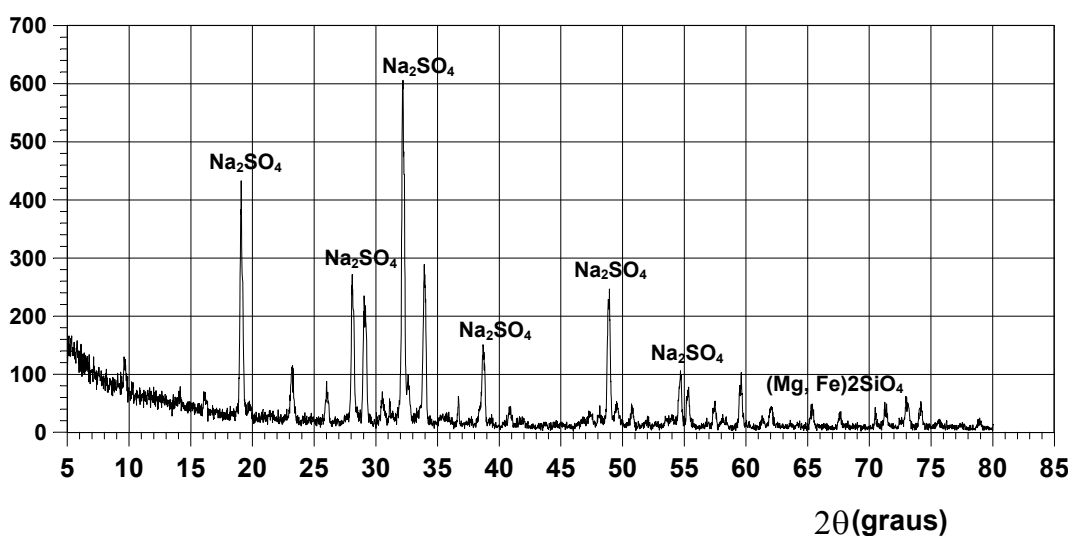


FIGURA 3.10: Difratoograma da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Seca.

**TABELA 3.16:** Resultados de Difração por Raios X na Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Material Seco.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
30-0024	$\text{AlFeO}_3$	Óxido de ferro alumínio
22-0948	Na	Sódio
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
21-1272	$\text{TiO}_2$	Anatásio
37-1407	CaO	Óxido de cálcio
27-0605	$\text{SiO}_2$	Cristobalita
38-0449	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Alofana
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
1-1156-	$\text{Al}_2\text{Ca}$	Alumínio cálcio



**FIGURA 3.11:** Difratograma da Crosta Ressecada da Lama Vermelha OP Neutralizada.

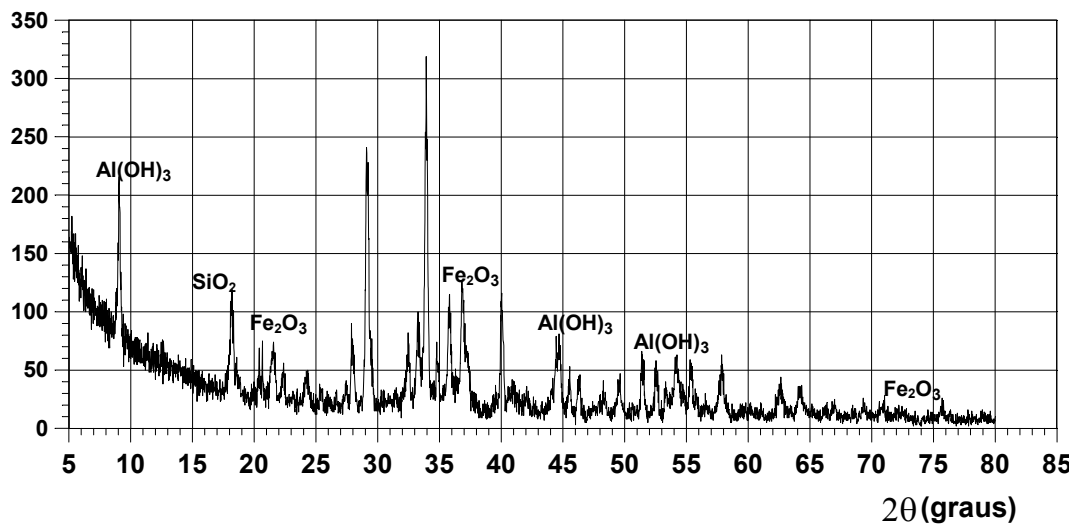
**TABELA 3.17:** Resultados de Difração por Raios X na Crosta da Lama Vermelha OP Neutralizada.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
37-1465	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	thernardita
35-0487	$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	eugsterita
20-0895	$\text{KFeF}_3$	Fluoreto de ferro potássio
31-1050	$\text{K}_3\text{MnO}_4$	Óxido de manganês potássio
11-0293	$\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	brucita
39-0246	$\text{CuFeO}_2$	delafossita
21-1258	$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$	Ringwoodita ferroniana
8-0479	$\text{MgCO}_3$	magnesita
40-0103-	$\text{Ca}_2\text{Ti}_2\text{O}_6$	Óxido de titânio cálcio

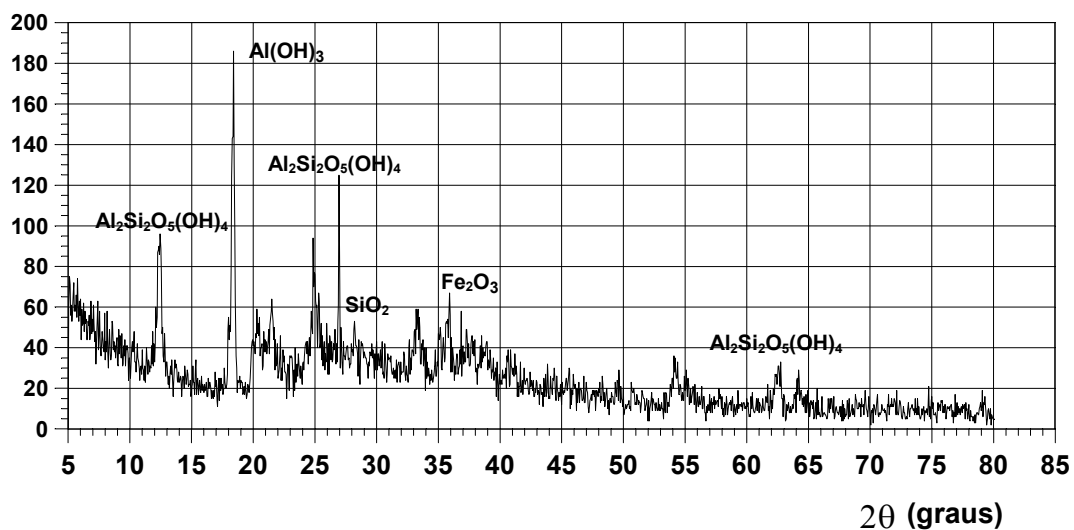


**TABELA 3.18:** Resultados de Difração por Raios X da Crosta Ressecada da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
29-1447	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	trona
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
21-1272	$\text{TiO}_2$	Anatásio
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita



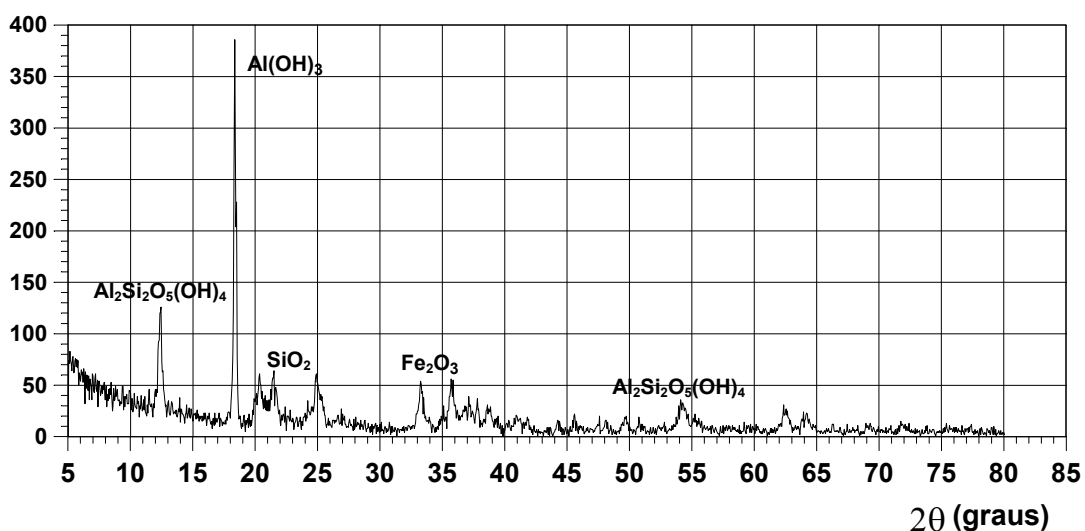
**FIGURA 3.12:** Difratoograma da Crosta Ressecada da Lama Vermelha OP Não Neutralizada.



**FIGURA 3.13:** Difratoograma da Lama Vermelha SL – Material Seco.

**TABELA 3.19:** Resultados de Difração por Raios X na Lama Vermelha SL – Material Seco.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
18-1170	$\text{SiO}_2$	Tridymita
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
38-0449	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Alofana
29-1488	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	caulinita



**FIGURA 3.14:** Difratoograma da Lama de Lavagem – Material Seco.

**TABELA 3.20:** Resultados de Difração por Raios X na Lama de Lavagem – Material Seco.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Hematita
18-1170	$\text{SiO}_2$	Tridymita
7-0324	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Gibbsita
29-1488	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	caulinita

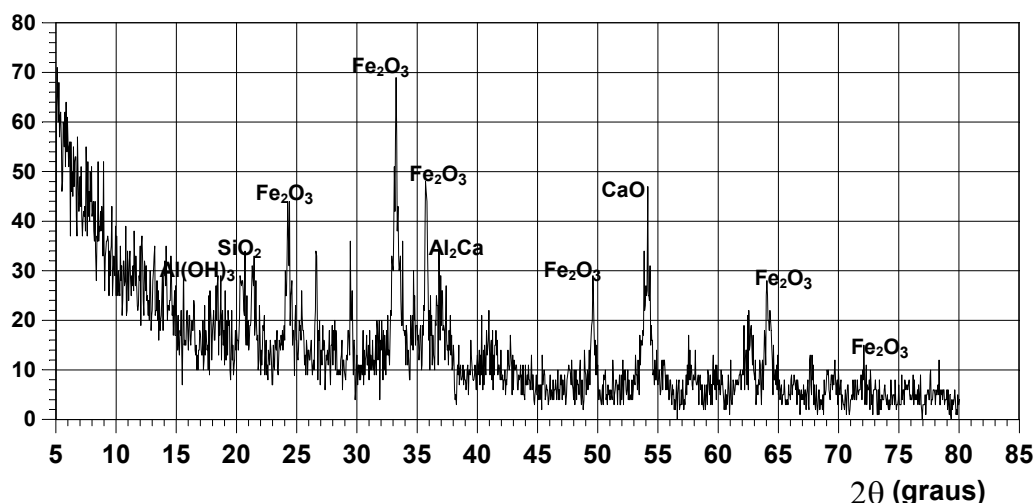


FIGURA 3.15: Difratoograma da Lama Vermelha PC – Material Seco.

TABELA 3.21: Resultados de Difração por Raios X na Lama vermelha PC – Material Seco.

CATÁLOGO	CLASSIFICAÇÃO	
33-0664	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hematita
21-1272	TiO <sub>2</sub>	anatásio
10-0235	KaO <sub>2</sub>	Óxido de potássio
37-1497	CaO	Óxido de cálcio
33-1161	SiO <sub>2</sub>	Quartzo
18-1170	SiO <sub>2</sub>	Tridymita
7-0324	Al(OH) <sub>3</sub>	Gibbsita
34-0177	Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	ulvospinel

Aparentemente, pode ser notado tanto pelos difratogramas quanto pelas tabelas de classificação, que há muito pouca diferença entre os materiais úmidos e os secos, pelo menos em termos qualitativos, mas nada se pode afirmar em termos quantitativos. Isto indica, à princípio, que os processos de secagem não implicam necessariamente na formação de novos elementos, mas não se sabe se há variação nas suas concentrações.

Na Tabela 3.14, foi questionável o aparecimento do elemento sódio isoladamente, uma vez que ele é muito reativo com o oxigênio. Porém, pode ainda

tratar-se de um resíduo de soda cáustica, presente em todo o processo. Também é notada a presença do Na no material seco da lama vermelha OP não neutralizada, devendo ser, igualmente, algum resíduo da soda cáustica (NaOH) que permaneceu após a secagem. Foi percebido, também, o surgimento de um novo óxido, o de ferro-alumínio, em decorrência da secagem da lama vermelha OP neutralizada.

Comparando os resultados da lama vermelha OP neutralizada e da lama vermelha OP não neutralizada, é notada nesta última a presença de um argilo mineral, a alofana, que não ocorre na primeira. Trata-se de um mineral não cristalino ou fracamente cristalino, com um modelo estrutural semelhante ao da caulinita, mas com defeitos tipo omissões de silício nas folhas tetraédricas, ocupadas algumas vezes por alumínio e tendo um conteúdo de água variável. Morfologicamente se apresenta sob a forma de esferas muito pequenas (Gomes, 1986). Sua ausência na lama vermelha OP neutralizada é, muito provavelmente, devido à ação do ácido sulfúrico utilizado para neutralização do material. Há também uma associação do alumínio com cálcio na lama vermelha OP não neutralizada que está ausente na lama vermelha OP neutralizada, também provavelmente em decorrência do uso do ácido.

Para analisar ainda mais quais os prováveis efeitos do ressecamento na composição química-mineralógica dos resíduos, foi feita uma análise para a comparação entre as crostas que se formam nas lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada em decorrência do processo de secagem. O resultado da lama vermelha OP neutralizada está na Figura 3.11 e Tabela 3.17, enquanto o da lama vermelha OP não neutralizada, está na Figura 3.12 e Tabela 3.18.

Na crosta da lama vermelha OP neutralizada, o espectro registrado foi quase idêntico ao da *thernardita*, e isto mostra a combinação do sódio proveniente da soda cáustica com o ácido sulfúrico. A lista extensa dos outros compostos na Tabela 3.17 não indica, como já dito, que eles estejam presentes, mas que alguns picos da leitura da amostra da crosta se encaixou com o deles. Este resultado pode levar à dedução de que estes elementos foram concentrados na crosta ressecada pelo fluxo evaporativo, uma vez que são os constituinte básicos do fluido que constituía a lama.

O resultado da crosta da lama vermelha OP não neutralizada combinou muito bem com as emissões da *trona*, um produto da combinação do sódio com água e gás carbônico, confirmando a ausência do ácido sulfúrico. Estranhou-se, a princípio, a presença do carbono neste material, mas ele pode ter aparecido como o resultado de alguma reação com o meio ambiente. O anatásio, hematita e gibsita presentes podem ser um pouco do resíduo coletado junto com a crosta, não fazendo parte necessariamente de sua constituição. Cabe ressaltar que o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , classificado como gibsita em todas as análises, pode também se tratar de alumínio amorfo (Santos, 1989), o que é, inclusive mais provável, tendo em vista o processo químico pelo qual os resíduos passam. Segundo Fahey (2002), é realmente resíduo de alumina que fica presente no resíduo.

As Figuras 3.13 e 3.14 e as Tabelas 3.19 e 3.20 mostram os resultados da difração em raios X na lama vermelha SL e na lama de lavagem da bauxita que origina esta lama vermelha, respectivamente. Por estes resultados, é possível perceber diretamente, quais os efeitos do processamento pelo Sistema Bayer na composição final do resíduo. Pode ser notada a grande semelhança na constituição dos dois materiais (lama vermelha SL e a lama de lavagem de sua bauxita de origem). O  $\text{Al}(\text{OH})_3$  registrado na lama vermelha SL pode não ser gibsita, mas alumínio amorfo e a quebra da caulinita pode ter originado a alofana, que não foi detectada na lama de lavagem.

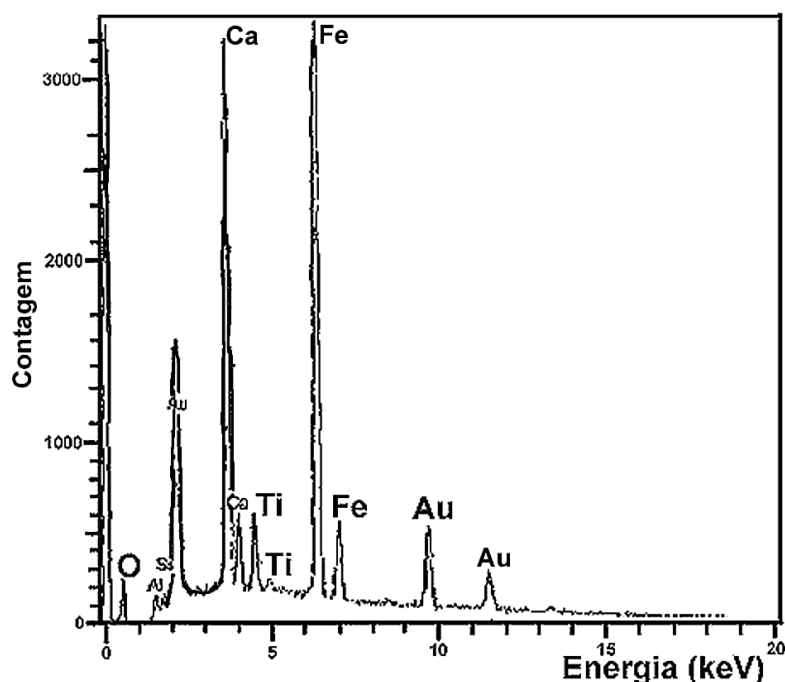
Os resultados obtidos para a lama vermelha PC, da região de Poços de Caldas, estão representados na Figura 3.15 e na Tabela 3.21.

Se for feita uma comparação de todas as lamas de processamento não neutralizadas aqui analisadas, pode ser visto que, em princípio, elas são semelhantes na sua constituição, com o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , o  $\text{SiO}_2$  e a  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  presentes em todas elas. De acordo com Santos (1989), as lamas vermelhas seriam formadas em decorrência da precipitação da reação da sílica presente nas bauxitas, como caulinita ou haloisita (da qual a alofana é um sub tipo), com o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$  – soda cáustica), formando uma zeólita insolúvel. Zeólitas são uma reunião de minerais formados em uma faixa de temperatura ligeiramente superior à da superfície da Terra (Krauskopf, 1982). Outros componentes da bauxita, tais como o ferro e titânio, também permaneceriam

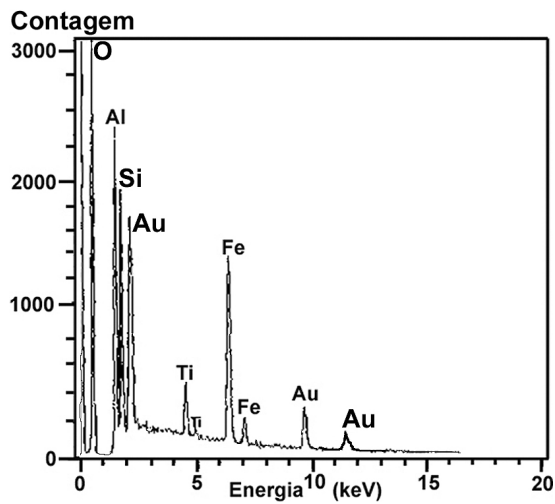
insolúveis, se acrescentando às zeólitas de sódio já mencionadas e completando a formação da lama vermelha. Reese & Cundiff (1955) dão a seguinte fórmula ao silicato de alumínio e sódio, que também é uma zeólita, e que, em geral, está presente nas lamas vermelhas:



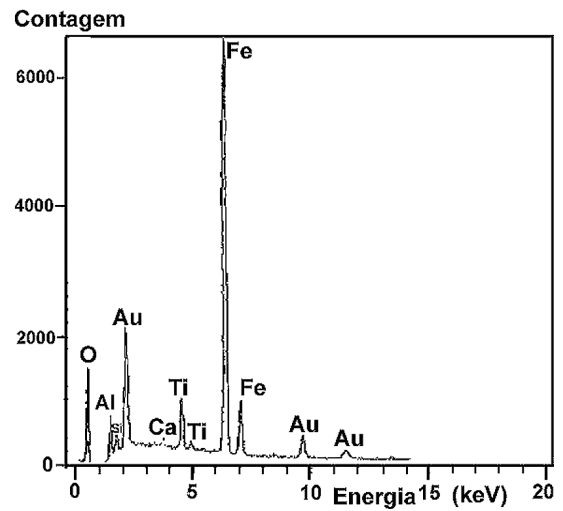
Para esta pesquisa, também foram realizados registros de microscopia eletrônica, cujos resultados serão mostrados logo adiante. Existe acoplado ao MEV, o microscópio eletrônico de varredura, um sistema de espectrografia de raios X, equipado com um detector de lítio-silício, que permite fazer algumas identificações pontuais de elementos presentes nas amostras. Ou seja, da já pequena amostra é selecionada uma região e basicamente se identifica a composição de um de seus grãos. Isto foi feito para os resíduos aqui estudados e os exemplos de resultados estão nas Figuras 3.16 a 3.20. A presença de ouro é devido à película condutora que tem de ser aplicada sobre a amostra. Basicamente foram encontrados os mesmos elementos já identificados na análise químico-mineralógica por difração de raio X.



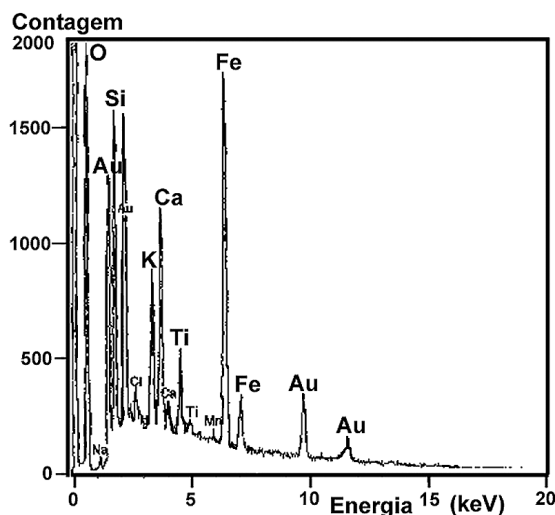
**FIGURA 3.16:** Espectrografia por Raios X (MEV) - Lama Vermelha OP Neutralizada.



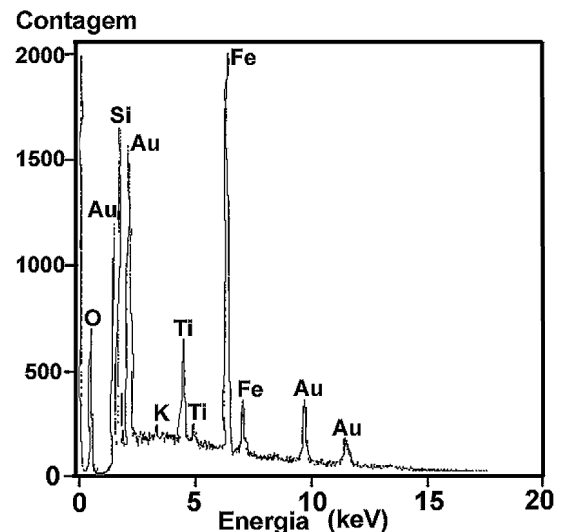
**FIGURA 3.17:** Espectrografia por Raios X (MEV) da Lama de Lavagem de Bauxita.



**FIGURA 3.18:** Espectrografia por Raios X (MEV – Lama Verm. OP Não Neutralizada).



**FIGURA 3.19:** Espectrografia por Raios X Feita no MEV da Lama Vermelha PC.



**FIGURA 3.20:** Espectrografia por Raios X Feita no MEV da Lama Vermelha SL.

### 3.6

#### Resultados de Microscopia Eletrônica por Varredura

As amostras para análise ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) são fixadas sobre um suporte metálico e, após, recobertas com uma fina camada de ouro paládio (cerca de 130 a 180 angstroms de espessura), para torná-las condutoras. As fotomicrografias representam imagens de feixes de elétrons que

são bombardeados sobre a amostra, substituindo o feixe de luz, e focalizados por lentes eletromagnéticas. Maiores detalhes do funcionamento do aparelho e da técnica de preparação das amostras pode ser encontrado em Santos (1989). Os resultados obtidos das fotos feitas de amostras dos resíduos aqui analisados estão nas Figuras 3.21 a 3.31.

O que se percebeu pelas fotos foi que todos os resíduos podem ser considerados homogêneos e com grande quantidade de amorfos. Na Figura 3.24, ampliada 5000 vezes, da lama vermelha OP não neutralizada, o grão redondo visto na parte inferior esquerda pode ser uma alofana. Na Figura 3.26, da lama vermelha PC, pode-se ver partículas de caulinita, e na Figura 3.27, da lama vermelha SL, a formação de cristais tubulares. A Figura 3.29, da lama vermelha SL ampliada 500 vezes, mostra a tendência dos grãos em se agruparem em estruturas porosas, o que pode também ser percebido na Figura 3.31, da lama de lavagem de bauxita ampliada 5000 vezes.

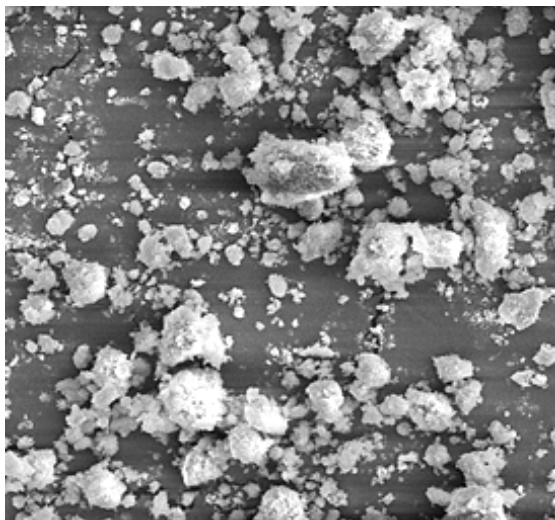
Maiores informações sobre constituição físico, químico e mineralógica de bauxitas e lamas vermelhas podem ser encontradas por exemplo em Li (2001), que estudou o comportamento de bauxitas jamaicanas e também as lamas vermelhas delas derivadas. É mostrado, neste estudo citado, que as propriedades de lamas vermelhas derivadas da mesma bauxita podem se diferenciar muito devido a variações nas condições de operações do Sistema Bayer, tais como temperatura e agentes redutores. Estes fatores podem ser, juntamente com a mineralogia da rocha de origem, importantes na geração do subproduto sodalita Bayer.

Informações sobre características físico-químicas de bauxitas indianas são apresentadas por Vasan et al. (2001) e Singh et al. (1996). Informações sobre lamas vermelhas turcas são apresentadas por Sahin (1998) e Yalçin & Sevinç (2001), onde a estrutura formada pelos seus depósitos é investigada por análises estatísticas. Dados adicionais sobre bauxitas australianas foram encontrados em McCormick et al. (2002). As lamas vermelhas espanholas tem algumas de suas características registradas por López et al. (1998).

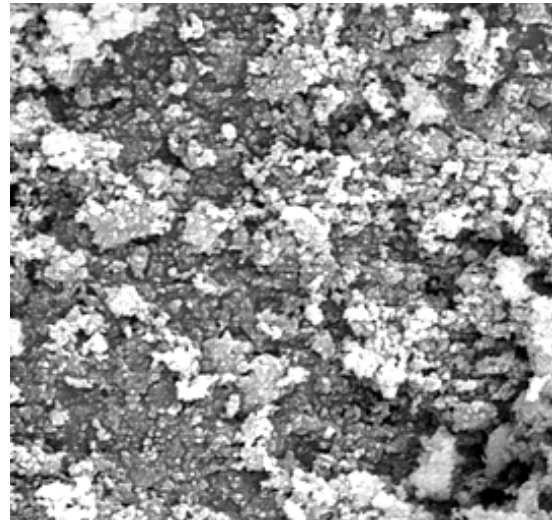
Chevdiv et al. (2001) apresentaram um estudo sobre cargas superficiais de lamas vermelhas originadas de diferentes bauxitas. As lamas vermelhas teriam



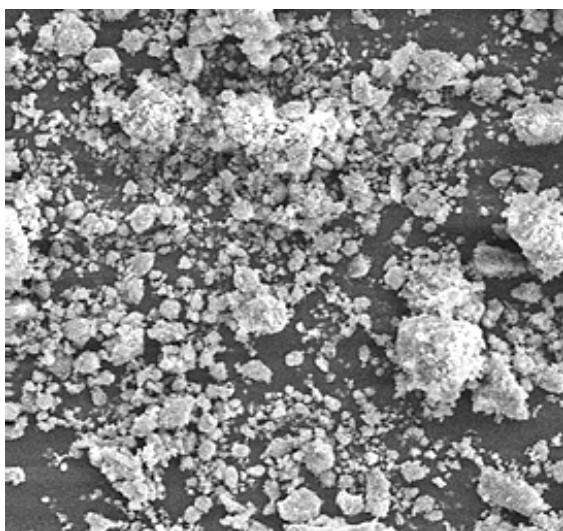
uma significativa carga negativa sob as condições geradas pelo processo Bayer, devido a grupos hidroxilas ionizados na superfície das partículas. A técnica usual de adição de floculantes orgânicos às lamas provocariam a elevação desta carga negativa na superfície, aumentando sua afinidade com íons de potássio, o que pode afetar o seu comportamento final.



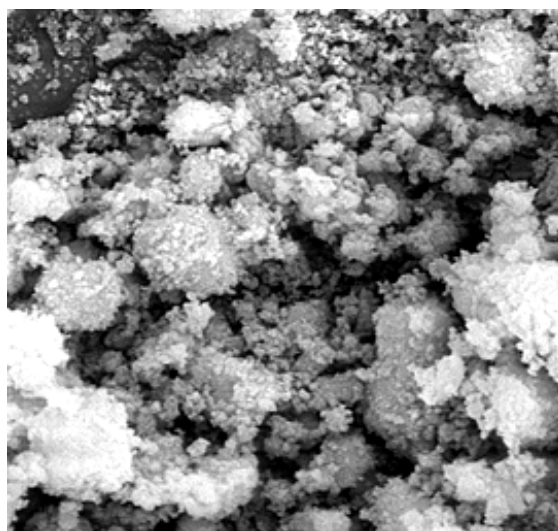
**FIGURA 3.21:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha OP Neutralizada. Ampliação 500 vezes.



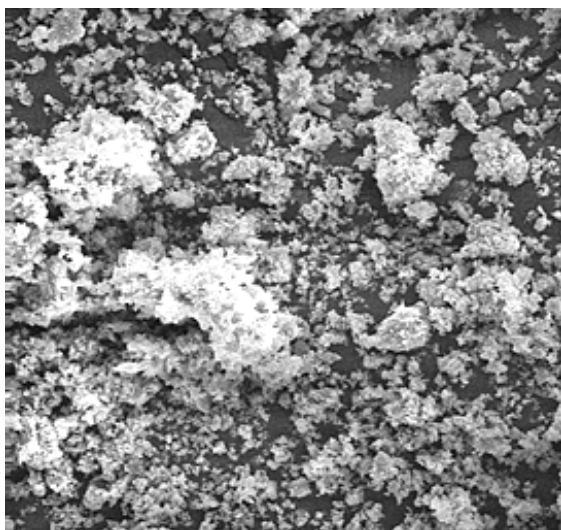
**FIGURA 3.22:** Foto Microscopia Eletrônica Da Lama Vermelha OP Neutralizada – Ampliação 5000 vezes.



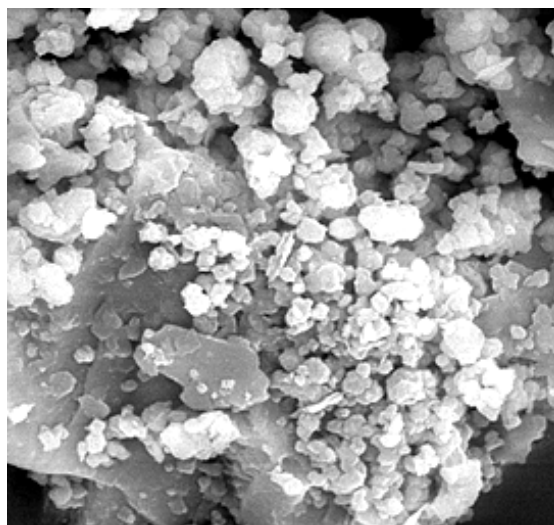
**FIGURA 3.23:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada. Ampliação 500 vezes.



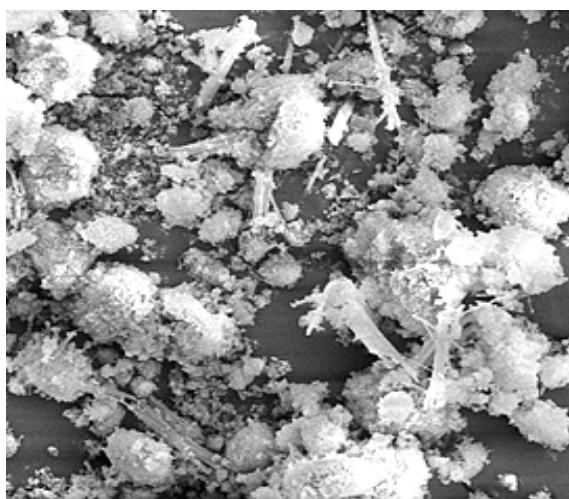
**FIGURA 3.24:** Foto Microscopia Eletrônica Da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ampliação 5000 vezes.



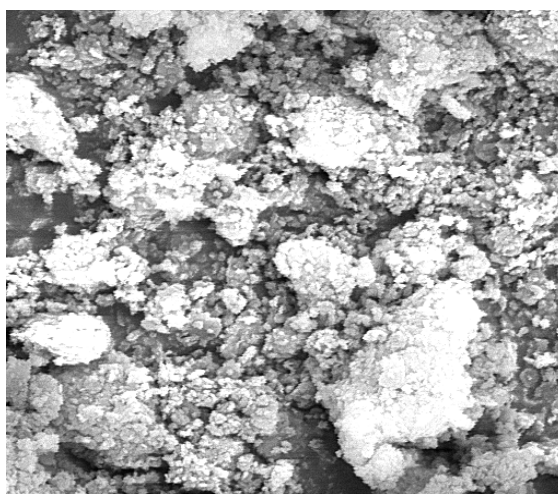
**FIGURA 3.25:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha PC. Ampliação 500 vezes.



**FIGURA 3.26:** Foto Microscopia Eletrônica Da Lama Vermelha PC. Ampliação 5000 vezes.



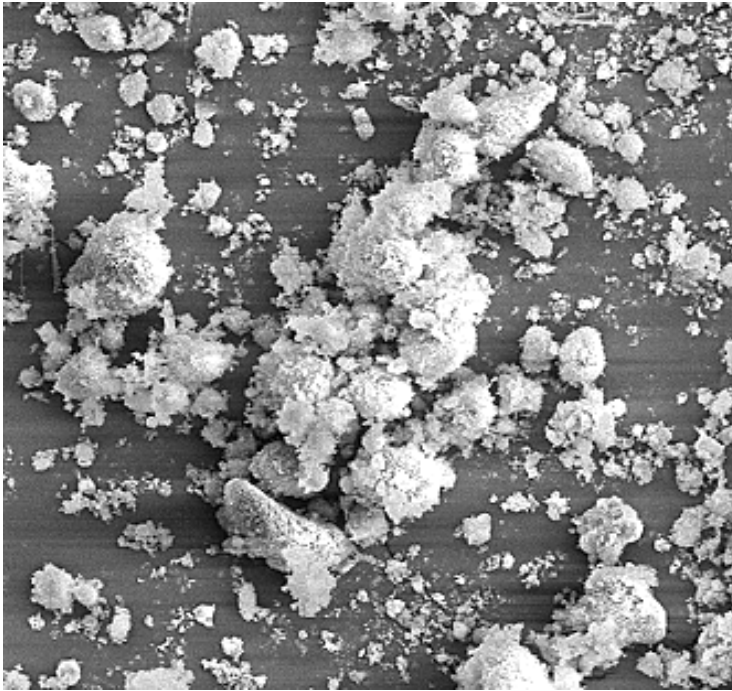
**FIGURA 3.27:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha SL. Ampliação 1000 vezes.



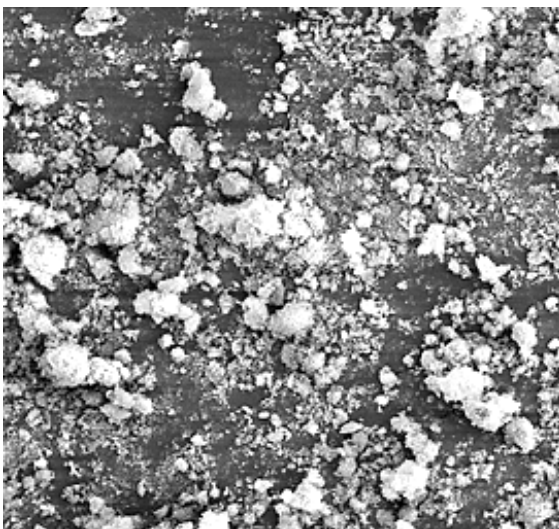
**FIGURA 3.28:** Foto Microscopia Eletrônica Da Lama Vermelha SL. Ampliação 5000 vezes.

Somogyi & Gray (1997) determinaram a capacidade de troca catiônica de uma lama vermelha do Alabama, Estados Unidos, como sendo de 5,2 meq/100g, considerada baixa, se comparada com a da caulinita. Li (2000) estudou o efeito do floculante na capacidade de troca catiônica de lamas vermelhas jamaicanas, todas com pH maior que 10. Com relação ao sódio, esta capacidade variou de 5,58 a

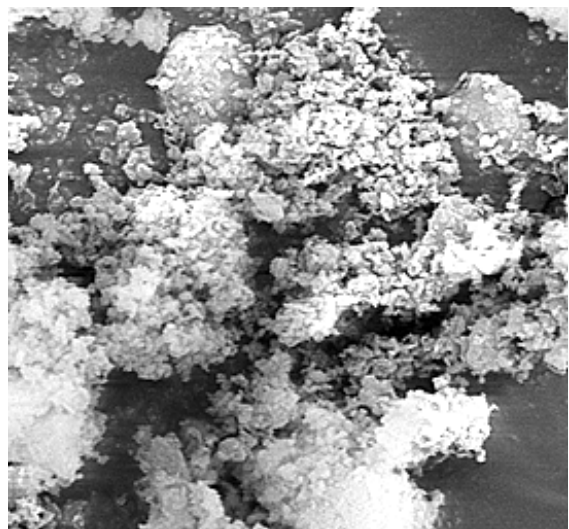
89,08 meq/100g, sendo este último valor obtido com o resíduo misturado a uma dosagem maior de floculante. Com relação ao cálcio, a variação foi de 16,82 a 25,54 meq/100g, o menor valor obtido para a maior concentração de floculante; ao potássio, de 0,22 a 0,42 meq/100g, o maior com mais floculante.



**FIGURA 3.29:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama Vermelha SL. Ampliação 500 vezes.



**FIGURA 3.30:** Foto por Microscopia Eletrônica da Lama De Lavagem De Bauxita. Ampliação 500 vezes.



**FIGURA 3.31:** Foto Microscopia Eletrônica Da Lama De Lavagem De Bauxita. Ampliação 5000 vezes.

### 3.7

#### **Análise da Distribuição Granulométrica**

A granulometria de resíduos de mineração e/ou processamento também é uma característica que está estritamente relacionada à mineralogia da rocha de origem mais ao processo de extração e processamento. Como estas características variam de região para região e mesmo de indústria para indústria, é praticamente impossível que se determine uma curva granulométrica padrão para este tipo de material, no máximo podendo ser definida uma faixa de variação da mesma, e é o que se pretende apresentar nesta seção.

De uma maneira geral, o que se tem registrado sobre a granulometria de resíduos de mineração e processamento é que a maioria está na faixa dos siltes, podendo ocorrer grandes parcelas de areia (mais de 30%), mas também são encontrados resíduos de granulometria muito fina ou extremamente grossos (*Vick, 1983*). Para aqueles rejeitos cuja forma de disposição inicial é na forma de lama, necessariamente eles têm de ter uma granulometria mais fina. No caso de resíduos de final de processamento industrial, como as lamas vermelhas, o uso de floculantes ou não durante a fase de decantação é um dado importante, já que alterará todo o produto final. Tem sido cada vez mais freqüente e de interesse econômico das plantas de processamento, obter este produto final para ser rejeitado mais espessado e com características de alta velocidade de sedimentação para acelerar, inclusive, a sua separação dos elementos nos quais estão interessados e também seu manuseio nos locais de disposição (*Li & Rutherford, 1996*). Por este motivo, é provável que se torne cada vez mais freqüente a adição destes floculantes ao processo. E o uso destas substâncias não é feita de maneira padronizada, e certamente aumentará a possibilidade de se ter maiores diferenças entre as granulometrias entre os rejeitos mineração e processamento inclusive de mesma rocha de origem.

A forma de lançamento nos diques ou barragens de armazenamento influencia na granulometria dos resíduos dentro dos reservatórios, já que pode favorecer a segregação entre as partículas. E com isso, poderão ser criadas zonas com comportamentos diferenciados no lago. As partículas maiores tendem a se

depositar próximo aos locais de descarga, formando praias com ângulos de inclinação que variam de 2° a 10°, enquanto que as mais finas se depositam em locais mais afastados. Após um determinado tempo, os grãos maiores podem criar uma barreira para os menores, formando uma zona de deposição de material variado. Portanto, dentro de um mesmo reservatório, certamente vai se ter resíduos de granulometria totalmente diferente entre si e talvez fosse uma boa prática começar apresentar curvas granulométricas destes materiais com a informação da região do reservatório em relação ao ponto de despejo dos resíduos, as amostras foram coletadas. Entre os cuidados com o lançamento para se minimizar a segregação de partículas está o de utilizar tubos de despejo com bocas voltadas para baixo, alternar pontos de lançamento ou fazer lançamentos de pontos simultâneos, inclusive com o uso de torres no meio do reservatório (*Bromwell, 1984*). Com relação à possibilidade de segregação dentro dos diques de contenção, existem autores como Swarbrick & Fell (1992) que consideram que ela ocorre somente nos primeiros 20-30m à partir do ponto de despejo, sendo justificado tomar como granulometria base do reservatório, aquela que os resíduos apresentam no momento do lançamento. Todo estes aspectos associados à disposição também ressaltam o fato de que não se tem uma curva de distribuição granulométrica típica para estes resíduos depositados na forma de lama, sendo esta informação, um dado local ou, até mesmo, com um certo exagero, “*pontual*”.

À seguir, nas Figuras 3.32 e 3.33, são comparadas algumas curvas granulométricas de diferentes resíduos. No caso das bauxitas, Abrão (1987) não menciona se o resíduo é de lavagem ou de processamento, enquanto que os dados obtidos por de Campos (1986) se referem a lamas vermelhas.

A Figura 3.34 compara lamas vermelhas de diferentes locais, ressaltando a dependência de seu comportamento da rocha de origem e do processamento ao qual foi submetida. Já a Figura 3.35 dá uma idéia de como o mesmo material lançado em um dique ou barragem de contenção pode apresentar características granulométricas diferentes em função do local de coleta da amostra, devido ao problema de segregação das partículas.

### Granulometria

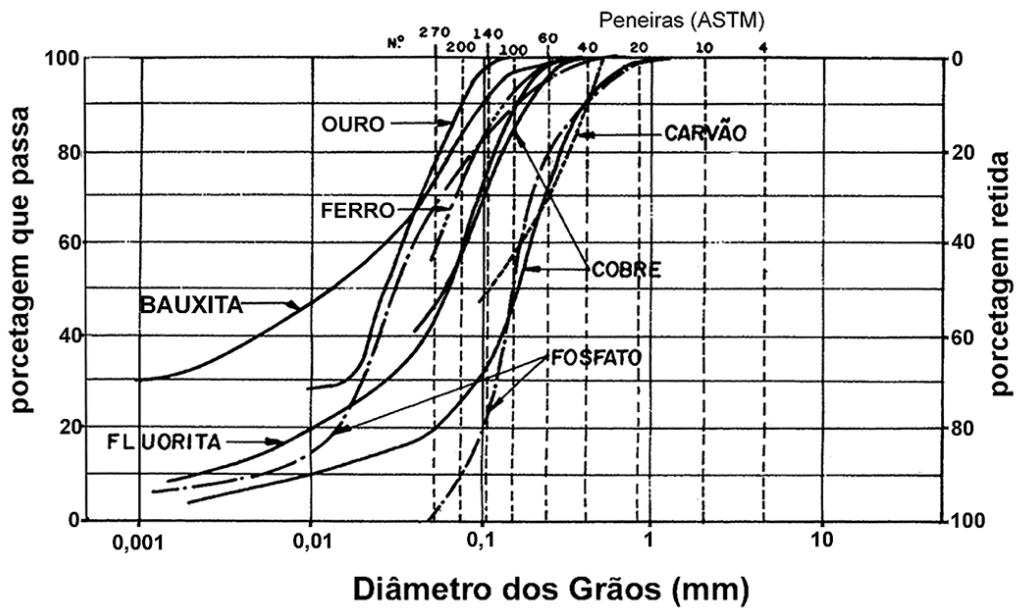


FIGURA 3.32: Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (apud Abrão, 1987)

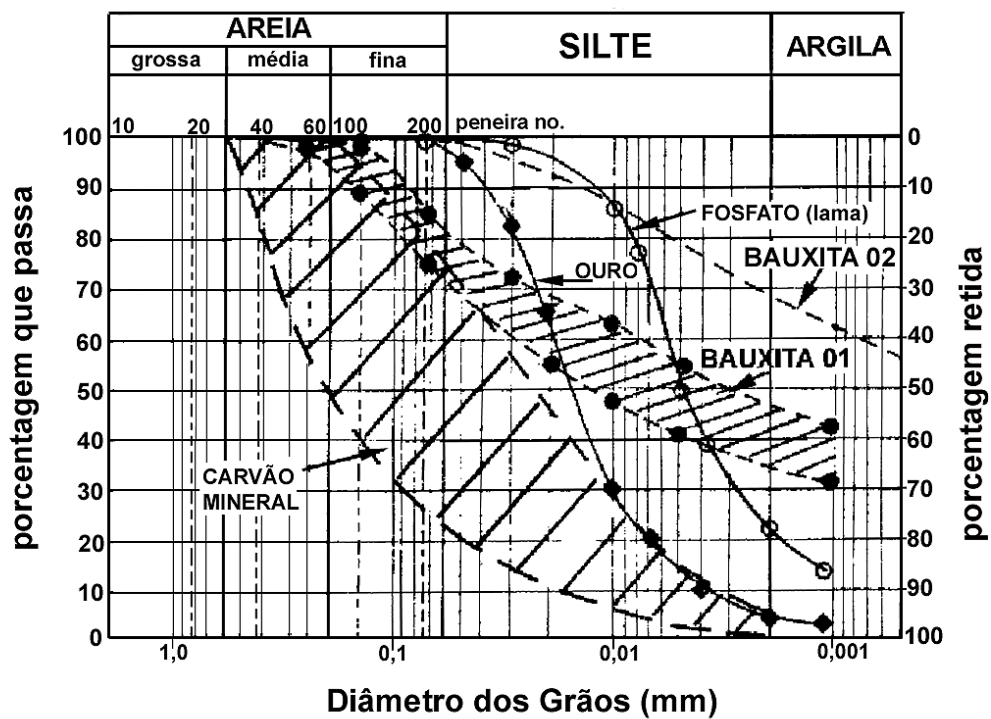
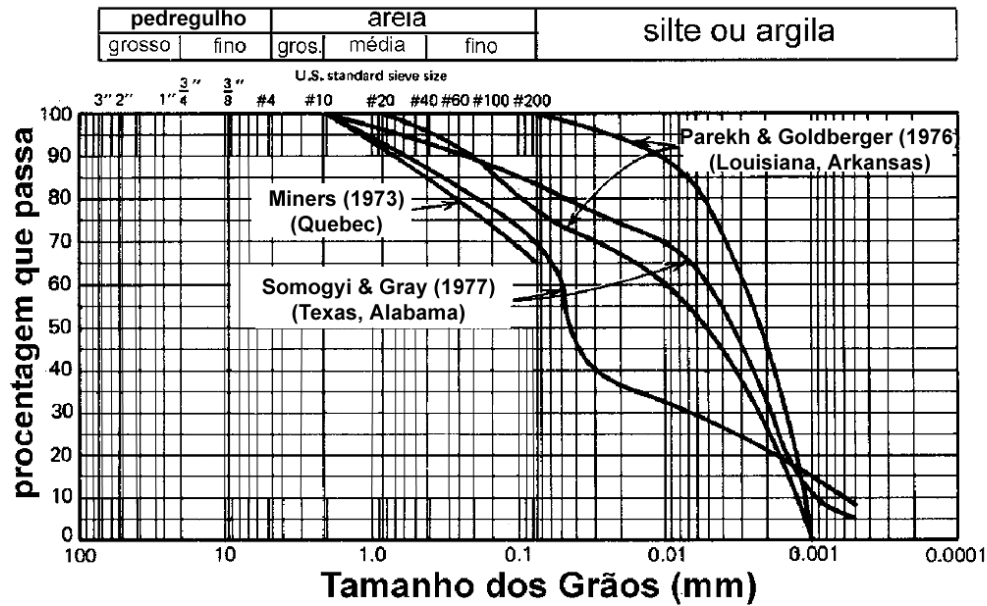
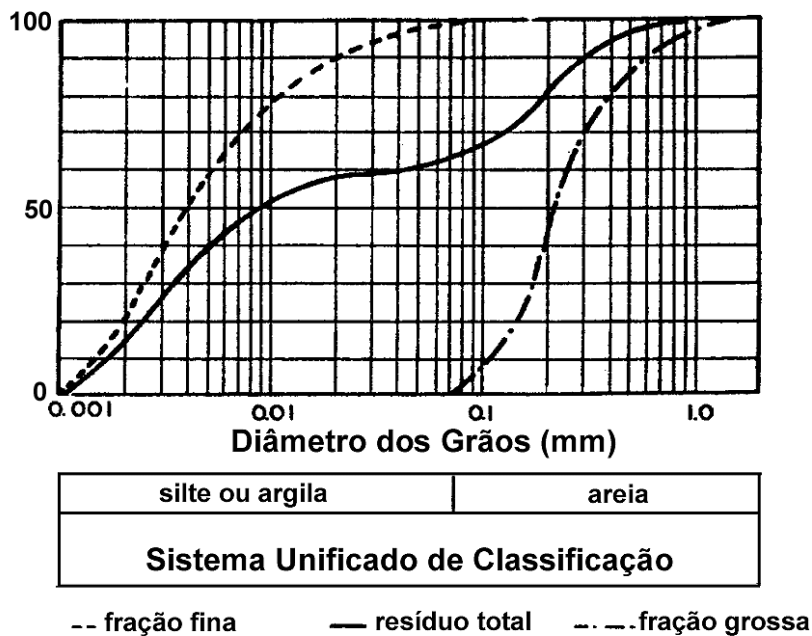


FIGURA 3.33: Curvas Granulométricas de Diferentes Resíduos (adaptado de De Campos, 1986).



**FIGURA 3.34:** Distribuição Granulométrica de Diferentes Lamas Vermelhas  
(adaptado de Vick, 1983)



**FIGURA 3.35:** Diferenças Granulométricas Nas Frações Que Compõe Uma Lama Vermelha  
(adaptado de Cooling, 1989)

As Figuras 3.36 e 3.37 mostram um ponto de despejo no reservatório de disposição de lama de lavagem de bauxita estudado. Pode ser percebido com clareza que as partículas mais grossas formaram uma barreira lateral, direcionando o fluxo dos resíduos, o que certamente provocará zonas de



granulometria bem diversificada dentro do reservatório. As Figuras 3.38 e 3.39 exemplificam o mesmo para diques de contenção da lama vermelha SL. Nestes diques, há vários pontos de despejo nas laterais, bem como torres centrais de lançamento, em uma tentativa de minimizar a segregação das partículas. Porém, pode ser visto que a mesma acontece, tanto em torno dos pontos de lançamento laterais, como em torno das torres, com a concentração dos grãos maiores nas proximidades destes locais, formando praias, com inclinação muito suave. Na Figura 3.39, pode ser percebido, no lado esquerdo, a balsa usada para se fazer as medições de campo, cujos resultados são apresentados em outro capítulo.



**FIGURA 3.36:** Detalhe de disposição de lama de lavagem de bauxita. Notar a concentração de grãos mais grossos na parte superior.



**FIGURA 3.37:** Lançamento de lama de lavagem de bauxita em dique de contenção. Notar concentração de material mais grosso na lateral.



**FIGURA 3.38:** Torre de lançamento da lama vermelha SL. Notar a formação de praia ao seu redor.



**FIGURA 3.39:** Lançamento da lama vermelha SL em pontos laterais do reservatório, com formação de praia.



A lama vermelha OP não neutralizada é lançada em um reservatório formado à partir de uma barragem convencional, em um vale próximo à planta de beneficiamento. Os pontos de despejo são alternados de tempos em tempos, para que se consiga melhorar a distribuição dos resíduos dentro do lago. As Figuras 3.40 e 3.41 mostram como estava este ponto de lançamento na época da realização dos ensaios de campo. Pode ser visto, também, que a segregação de partículas estava ocorrendo. Este ponto de despejo estava localizado aproximadamente no meio do lago formado (ver *Villar, 1990*), e o material mais grosso que se depositou logo em frente formou uma praia que praticamente dividiu o reservatório em dois. Na Figura 3.41, pode ser notada as diferentes colorações da superfície do lago, indicando concentrações diferentes de sólidos. Estes dados são para ressaltar que certamente as curvas granulométricas obtidas destes resíduos dificilmente podem ser consideradas representativas destes lagos de deposição.



**FIGURA 3.40:** Ponto de lançamento da lama vermelha OP não neutralizada, com formação de praia.



**FIGURA 3.41:** Outra vista do ponto de lançamento da lama vermelha OP não neutralizada. Notar as diferenças de concentrações de sólidos no reservatório.

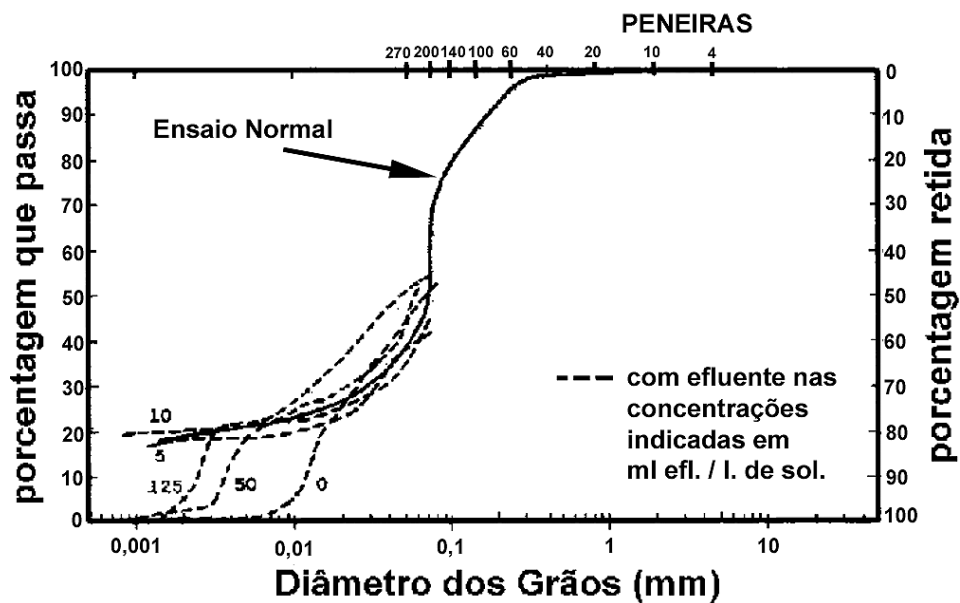
A necessidade de se executar caracterizações geotécnicas em resíduos de mineração e processamento industrial por meio de métodos diferentes daqueles usados para solos convencionais parece um tanto evidente, uma vez que "in situ", quase que de uma maneira geral, eles têm seus vazios preenchidos por um fluido completamente diferente dos solos ditos normais, para os quais foram

desenvolvidas as técnicas usuais de obtenção de curvas granulométricas e limites de consistência. É de se esperar que taxas de sedimentação em soro e água sejam diferentes, bem como a estrutura final do solo e, conseqüentemente, seu comportamento em termos de consistência. Até mesmo entre solos ditos comuns, a metodologia normal usada nos laboratórios pode afetar todos os resultados, fornecendo valores bem diferentes daqueles que se obteria em condições mais próximas da situação de campo (*Gidigasu, 1980, Ignatius & Pinto, 1991*).

Somogyi & Gray (1977) verificaram que a natureza do fluido dos poros, juntamente com a história de tensões já experimentada pela camada e a porcentagem de areia presente na massa sólida rejeitada, são os parâmetros que mais afetam o comportamento das lamas vermelhas. Eles perceberam que a distribuição granulométrica destes resíduos era fortemente influenciada pelo método de processamento, e que as curvas granulométricas obtidas poderiam não dar informações adequadas para estimar, por exemplo, as suas taxas de sedimentação. Notaram, também, que a neutralização do pH, feita por eles com ácido clorídrico, modificava a estrutura final do resíduo, afetando, por exemplo, as suas características de compressibilidade (reduzia a taxa de sedimentação e adensamento).

Ignatius & Pinto (1991) estudaram o efeito de um fluido de pH 13,7 e classificado como uma soda cáustica na dispersão das partículas de um solo argiloso, com caulinita e vermiculita em sua composição. Este é o fluido típico de preenchimento dos vazios das lamas vermelhas. Para isto, realizaram ensaios de caracterização em que a preparação prévia da amostra foi alterada. Eles executaram ensaios de sedimentação em água sem defloculante e em água com quantidades variáveis do fluido. A conclusão que chegaram foi que o fluido cáustico tendia a provocar a dispersão das partículas de acordo com a sua quantidade na solução (ver a Figura 3.42). Para concentrações de 5 a 10 ml de soda por litro de água destilada, o solo se defloculava e para maiores concentrações, novamente se floculava. A explicação, segundo eles, seria devido à variação da concentração iônica do líquido intersticial, influenciando a espessura da camada dupla.

Com relação ao comportamento durante a sedimentação (associado diretamente ao tipo e tamanho de grão presente na suspensão) de lamas vermelhas, Li & Rutherford (1996) chamam a atenção para o fato da composição do material amorfo presente no resíduo, bem como seu teor, ser um fator que influencia em muito. Segundo eles, a fração muito fina das lamas vermelhas poderiam formar minerais de ferro pobremente cristalizados ou não, mas sua forma final vai ter um efeito marcante durante a sedimentação, mesmo que esta fração se constitua uma porcentagem em peso muito pequena em relação à amostra ensaiada. Nos ensaios de sedimentação realizados por eles, a densidade do licor não neutralizado foi da ordem de 1,2 a 1,25 g/cm<sup>3</sup> e era adicionado floculante à amostra, em uma quantidade de aproximadamente 70g por tonelada de resíduo.



**FIGURA 3.42:** Influência do Tipo de Fluido em Ensaios de Granulometria (*adaptado de Ignatius & Pinto, 1991*)

Strahl (1971) também afirma que baixas taxas de deposição podem estar diretamente associadas ao tipo de fração fina dos minerais de ferro coloidais floculados após a etapa de digestão no Sistema Bayer. Parekh & Goldberger (1976), por sua vez, afirmam que fatores químicos tais como pH e a presença de sais metálicos e precipitação de elementos metálicos não influenciariam nas velocidades de deposição e, conseqüentemente, na curva granulométrica final do

resíduo. Somogyi & Gray (1977) mostraram que as curvas granulométricas destes resíduos são fortemente influenciados pela presença de sólidos dissolvidos na suspensão. Já Solymár et al. (1992) acham que a deposição ou sedimentação das partículas de uma lama vermelha, e conseqüentemente o resultado da análise do ensaio de sedimentação, depende não só da composição mineralógica, mas também da sua micromorfologia. De acordo com estes pesquisadores, esta inclusive poderia ser até mais importante que a primeira, já que uma goetita bem cristalizada teria uma maior velocidade de deposição que uma hematita fina dispersada e pobremente cristalizada.

Nos ensaios realizados na PUC-Rio, para obtenção da granulometria total, ou seja, peneiramento do material que passa pela peneira # nº 40 (malha de 0.42mm) e sedimentação no que passa na peneira 200 (malha de 0.074 mm), o resíduo era seco ao ar. Para verificação da tendência de agregação da fração fina, foram executados dois tipos de ensaios de sedimentação, o primeiro com o uso de hexametáfosfato de sódio (45,7 g/litro de água destilada) e o outro, só com água destilada. A influência do fluido na caracterização foi verificada por meio de ensaios de sedimentação em água, com e sem defloculante, e em soro cáustico, também com e sem defloculante. Com o objetivo de verificar o comportamento e influência das frações mais finas que compõe os resíduos, também foram realizados ensaios onde o material retido e passante na peneira #200 eram separados e ensaiados isoladamente. Para estas duas frações isoladas, também foi estudada a influência do uso do defloculante e o do tipo de fluido usado na sedimentação, se soro ou água.

Uma das lamas analisadas, a lama vermelha OP neutralizada, por exemplo, apresentou os resultados de granulometria mostrados na Tabela 3.22. A diferença entre as frações que compõe o resíduo já indica como as características granulométricas mudam de amostra para amostra. O material encontrado no campo deve ter granulometria predominante mais próximo do resultado obtido sem o uso de hexametáfosfato, já que ele não era adicionado aos resíduos antes de seu lançamento no lago de disposição na época da pesquisa. A Figura 3.43 representa a curva granulométrica deste mesmo material (lama vermelha OP neutralizada) obtida por outros pesquisadores de acordo com a técnica usual (usando água no ensaio de sedimentação). Pelos resultados de Alves (1992),

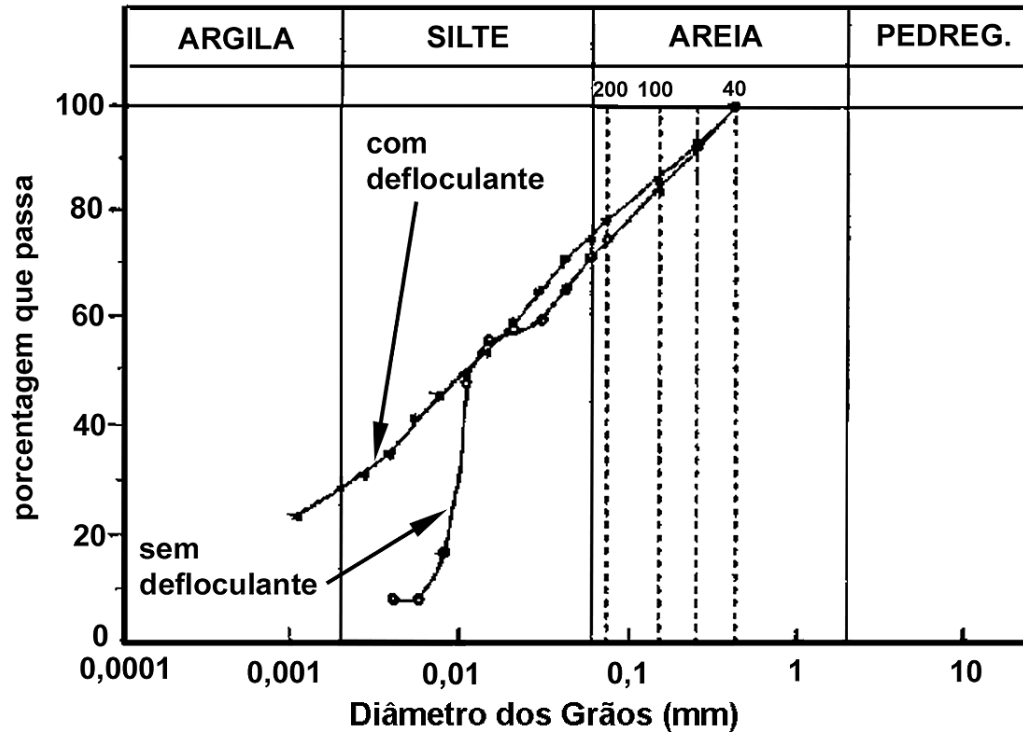
comparando as curvas obtidas usando defloculante e não, pode ser confirmado a tendência de agregação das partículas mais finas (menores que 0,01mm). Os resultados de Santos (2000) foram obtidos pelo uso da técnica usual (com defloculante).

**TABELA 3.22:** Análise Granulométrica da Lama vermelha OP neutralizada (*adaptado de Alves, 1992, De Campos et al., 1994 e Santos, 2000*).

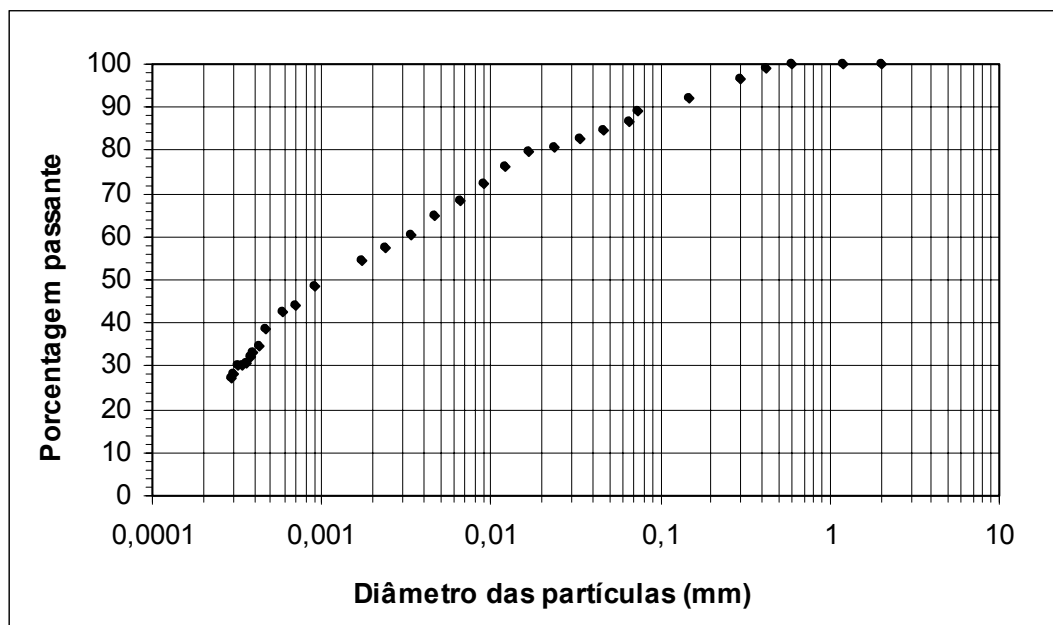
ALVES, 1992		De Campos et al. (1994)	SANTOS, 2000
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE
30% de areia fina	20% de areia fina	25% de areia fina	12% de areia
65% de silte	50% de silte	47% de silte	20% de silte
5% de argila	30% de argila.	28% de argila	68% de argila

Uma influência do processamento na granulometria pode ser percebida através da Figura 3.44, onde estão plotadas as curvas granulométricas da lama de lavagem de bauxita e da lama vermelha SL, que é a primeira processada, obtidas de amostras coletadas em lago já ressecado. Nesta figura também pode ser percebida um pouco da variação de granulometria desta lama vermelha SL, apresentada ao longo da profundidade do reservatório onde foi depositada.

Para as lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada foram realizadas duas baterias distintas de ensaios, chamadas de ensaio 01 e 02, respectivamente. Entre estas seqüências de ensaios houve um intervalo de tempo de quase um ano. Ao longo deste período de tempo, a lama que não estava sendo utilizada continuava imersa em seu soro correspondente (neutralizado ou cáustico), dentro de um grande recipiente, de aproximadamente 1,50m de altura. Aí, esta lama foi deixada sedimentar e adensar por peso próprio, o que pode ter promovido uma segregação de suas partículas com relação ao tamanho e tipo, com as maiores e mais pesadas indo para o fundo. Como conseqüência, é provável haver algumas diferenças nas amostra usadas nos ensaios 01 e 02, já que não foi feita uma homogeneização adequada do material antes da coleta das mesmas, devido a dificuldade que se encontrava para misturar novamente grandes volumes da lama após algum período de adensamento.

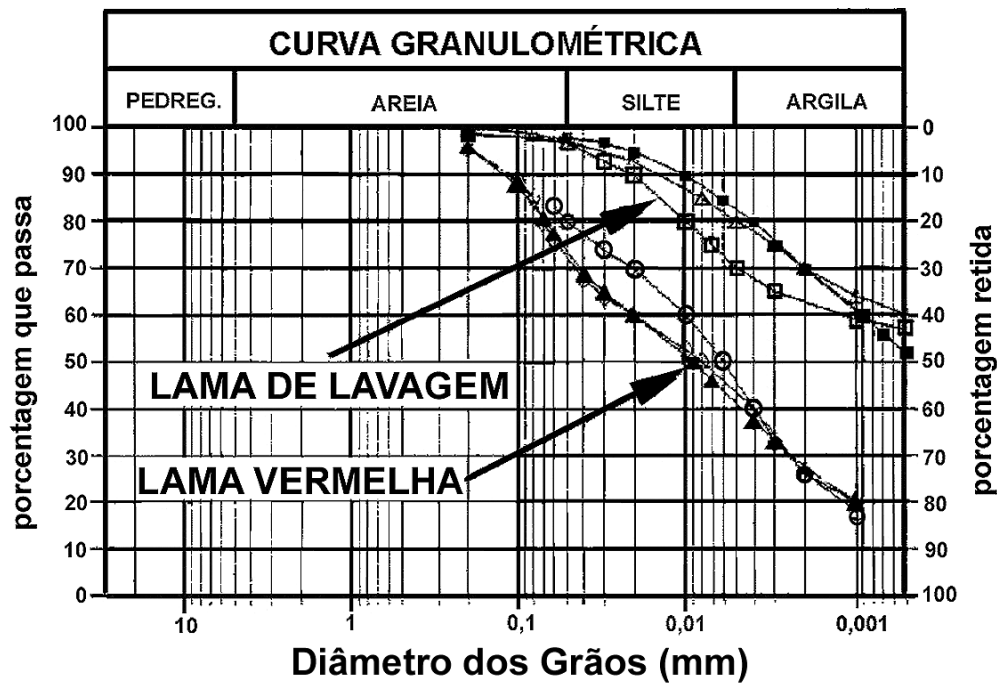


a) Alves (1992)



b) Santos (2000)

**FIGURA 3.43:** Análise Granulométrica Da Lama Vermelha OP Neutralizada (*adaptado de Alves, 1992 e Santos, 2000*).

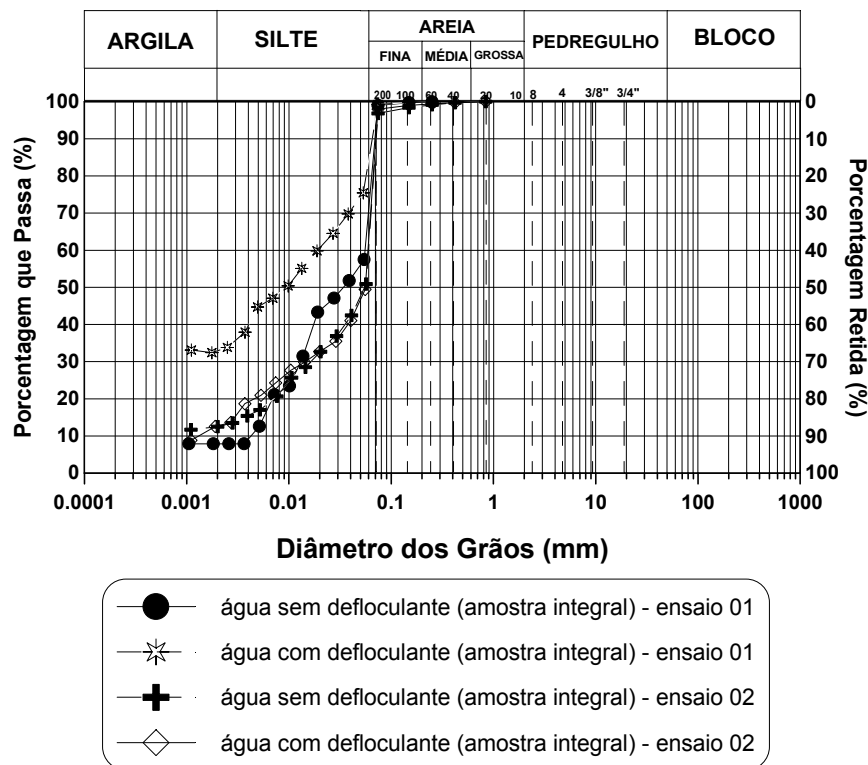


LAMA VERMELHA	LAMA DE LAVAGEM
○ - lago 01 - superfície	□ - lago 01 – 20% de sólidos
▲ - lago 01 – 2,5 m de profundidade	■ - lago 02 – 40% de sólidos
◇ - lago 01 – 5,0 m de profundidade	△ - área de teste – 50% de sólidos

**FIGURA 3.44:** Comparação Curvas Granulométricas das Lama de Lavagem de Bauxita e Lama Vermelha SL.

Na Figura 3.45 estão as curvas granulométricas da lama vermelha OP neutralizada, obtidas de ensaios realizados utilizando água na sedimentação, com e sem defloculante, para amostras ditas “íntegrais”. Estas amostras foram assim chamadas por serem aquelas nas quais não se fez a separação da fração fina (passante na #200) da mais grossa. Pode ser percebido que realmente as amostras utilizadas nos ensaios 01 e 02 apresentam diferenças entre si. No primeiro ensaio, houve uma distinção bem mais marcante entre as curvas obtidas quando se utilizou ou não o defloculante do que as curvas do ensaio 02. A justificativa pode ser uma maior quantidade de partículas mais finas presentes no material usado na primeira bateria de testes, realizada em material coletado da parte mais superior da camada de lama estocada. No segundo ensaio, a ação do defloculante só é percebida nas partículas menores que 0,01mm, havendo muito pouca diferença em

se usar ou não o hexametáfosfato de sódio. Aliás, as curvas não apresentaram nenhuma diferença nas porcentagens globais que constituem cada fração. Já no primeiro ensaio, as curvas com e sem defloculante apresentaram grandes diferenças já para as partículas de aproximadamente 0,07mm, indicando uma elevada tendência a floculação.

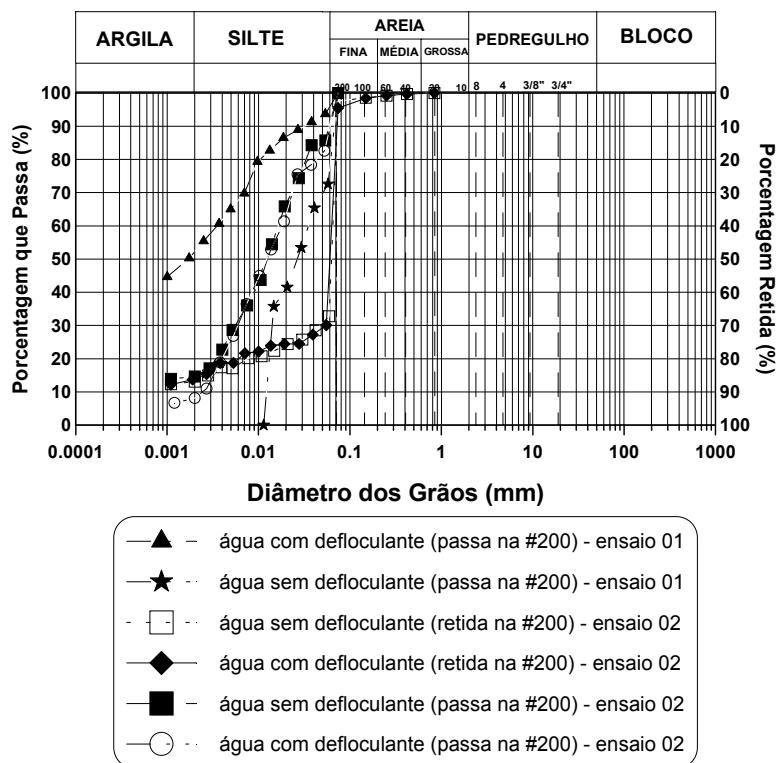


**FIGURA 3.45:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada - em Água, Com e Sem Uso Defloculante, Para Amostras Integrais.

Na Figura 3.46, estão os ensaios realizados em água, com e sem defloculante, para a fração fina que compõe a lama vermelha OP neutralizada. Nesta figura, as diferenças de comportamento entre as duas amostras ficam mais evidenciadas. No ensaio 01, a influência do defloculante nas partículas finas é marcante. A fração que passa na #200 mostra uma forte tendência a flocular, como já havia sido detectado pelas fotos de microscopia eletrônica. Já no ensaio 02, não se nota a ação do defloculante, exceto nas partículas menores que 0,004mm.



Nesta mesma figura citada anteriormente, também é mostrada a curva granulométrica da fração retida na peneira 200, com e sem defloculante. Pode ser percebido que há a presença de aproximadamente 30% de partículas de tamanho menores que 0,06mm, e 14% de fração tamanho argila, que haviam ficado floculados ou aderidos aos grãos maiores. No final, as três curvas do ensaio 02 mostram aproximadamente a mesma quantidade de partículas menores que 0,03mm. A Tabela 3.23 apresenta as porcentagens correspondentes a cada fração para todos estes casos, comparadas com os resultados obtidos nos ensaios usando amostras integrais, resumindo, desta maneira todos os resultados dos ensaio realizados em água.



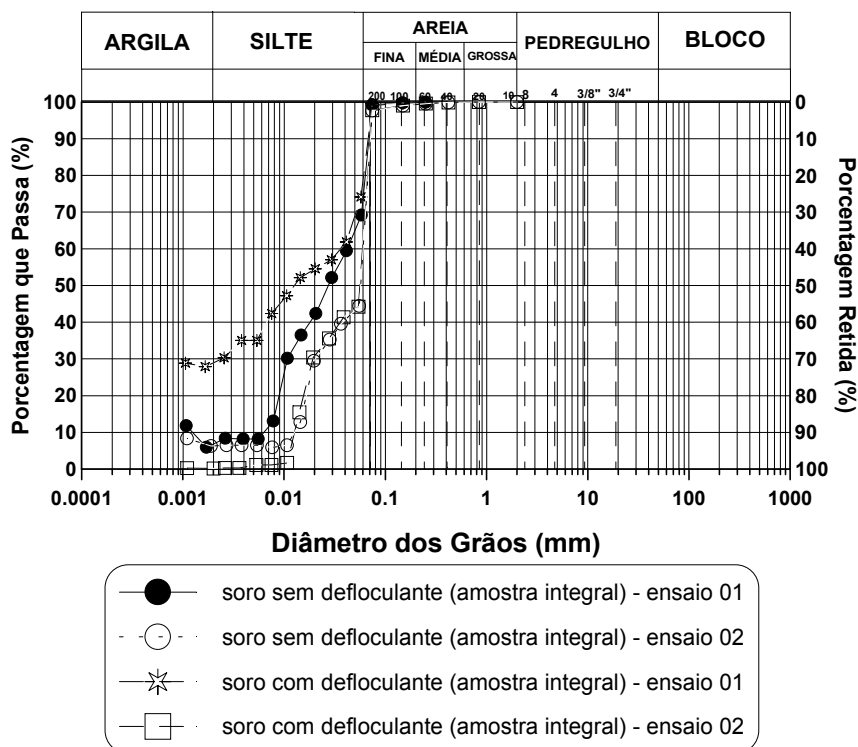
**FIGURA 3.46:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada - em Água, Com e Sem Uso Defloculante, Fração < #200 e > #200.

Na Figura 3.47 estão representadas as curvas granulométricas da lama vermelha OP neutralizada obtidas de ensaios onde se utilizou o soro neutralizado (soda cáustica misturada com ácido sulfúrico, em uma proporção não conhecida, originado um fluido com pH em torno de 8), com e sem defloculante na sedimentação. Novamente pode ser verificado que as amostras usadas no ensaio 02 possuem partículas maiores que as do ensaio 01 e, portanto, também foram

menos sensíveis ao uso ou não do hexametáfosfato de sódio. A combinação soro neutralizado mais defloculante parece que tendeu a flocular os grãos menores que aproximadamente 0,01mm.

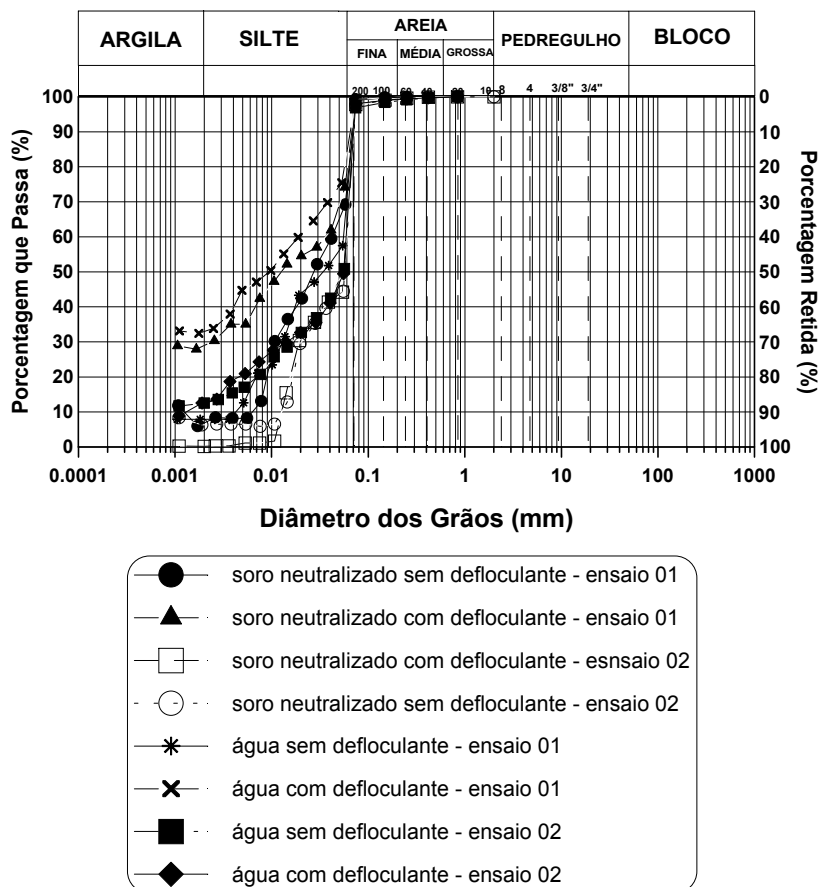
**TABELA 3.23:** Faixa Granulométrica Encontrada em Todos os Ensaios Realizados em ÁGUA na Lama Vermelha OP Neutralizada.

ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
sem defloculante:		com defloculante:	sem defloculante:		com defloculante
35% de areia		15% de areia	49% de areia		49% de areia
58% de silte		53% de silte	39% de silte		39% de silte
7% de argila		32% de argila.	12% de argila		12% de argila
ENSAIOS EM FRAÇÕES < #200 E > #200					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
sem defloculante:		com defloculante:	sem defloculante:		com defloculante
20% de areia		5% de areia	10% de areia		10% de areia
80% de silte		44% de silte	75% de silte		81% de silte
0% de argila		51% de argila.	15% de argila		9% de argila
			sem defloculante		com defloculante
62% de areia			52% de areia		
24% de silte			33% de silte		
13% de argila			14% de argila		



**FIGURA 3.47:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada - em Soro, Com e Sem Uso Defloculante, Para Amostras Integrais.

Na Figura 3.48 é feita uma comparação direta entre os ensaios feitos em água e soro para as amostras integrais da lama vermelha OP neutralizada. Pode ser notado que não há um comportamento muito diferenciado em função do tipo de fluido mas sim pelo uso ou não do defloculante. O limite inferior (partículas com menores tamanhos) é dado pela curva obtida em água com defloculante do ensaio 01, e o superior (partículas com maiores tamanhos) é obtido quando se realiza ensaios em soro com defloculante do ensaio 02. Pode ser notado com mais clareza que o soro neutralizado tende a diminuir o efeito do hexametáfosfato de sódio. Todos os ensaios realizados em água apresentaram uma porcentagem de fração tamanho argila maior que os ensaios realizados no soro neutralizado. Porém, quase todos os ensaios realizados em água também apresentaram uma % de fração tamanho areia maior. Para facilidade de comparação, na Tabela 3.24 foram repetidas todas as porcentagens associadas às frações que compõe o resíduo.



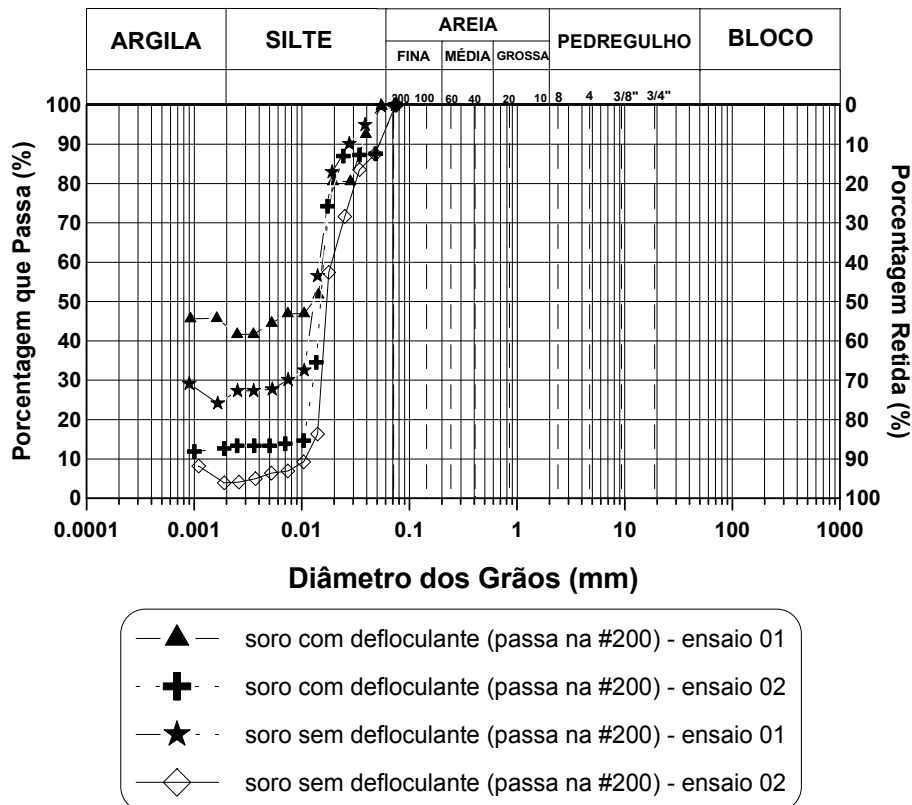
**FIGURA 3.48:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada – Ensaios em Água e Soro, Com e Sem Uso Defloculante, Para Amostras Integrais.

**TABELA 3.24:** Comparação das Faixas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada – AMOSTRAS INTEGRAIS – Ensaios em Água e Soro Neutralizado.

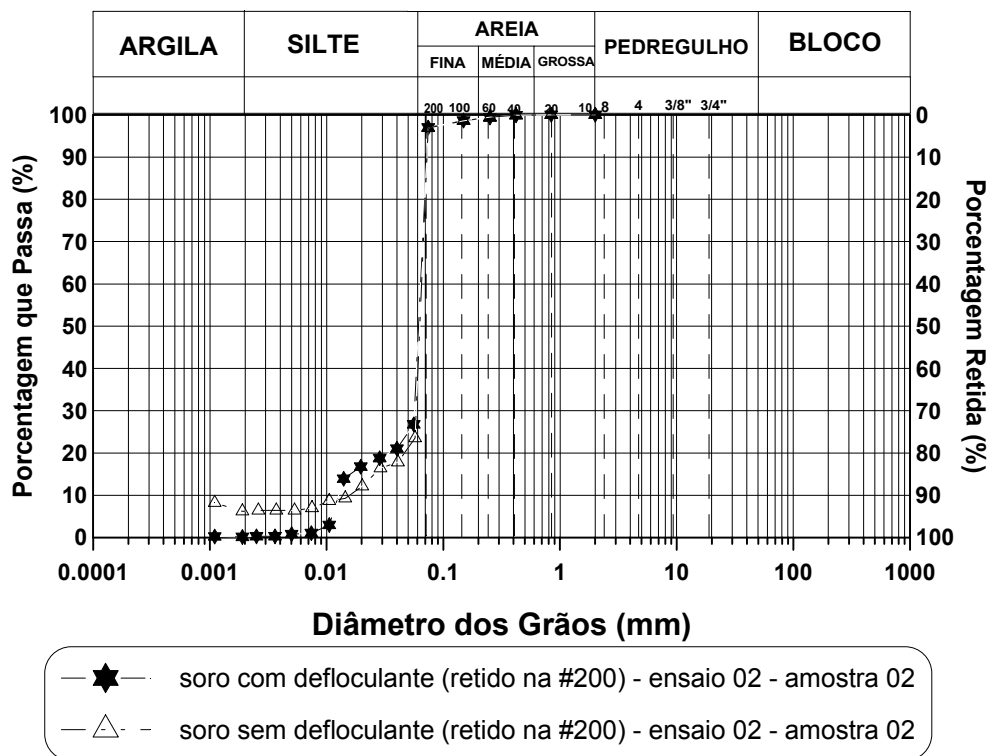
<b>ENSAIOS REALIZADOS EM ÁGUA</b>			
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>	
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE</b>
35% de areia	15% de areia	49% de areia	49% de areia
58% de silte	53% de silte	39% de silte	39% de silte
7% de argila	32% de argila.	12% de argila	12% de argila
<b>ENSAIOS REALIZADOS EM SORO NEUTRALIZADO</b>			
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>	
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE</b>
27% de areia	25% de areia	41% de areia	39% de areia
66% de silte	46% de silte	52% de silte	60% de silte
7% de argila	29% de argila.	7% de argila	1% de argila

Quando se ensaiou somente a fração passante na #200 em soro neutralizado, foi percebida uma maior influência do defloculante nas partículas finas, como pode ser visto na Figura 3.49. No ensaio 02, esta ação do hexametáfosfato só foi mais sensível para frações de tamanho menores que aproximadamente 0,01mm, havendo pouca influência do uso ou não desta substância nas frações maiores.

Já a Figura 3.50 mostra o resultado dos ensaios executados em soro neutralizado para a fração retida na #200. Aí, pode se notar que esta parcela é composta por aproximadamente 30% de grãos finos (silte e argila), que estavam floculados ou aderidos aos grãos maiores, mesma tendência verificada nos ensaios executados em água. Nota-se que o ensaio realizado em soro com defloculante apresenta uma menor fração tamanho argila que o realizado sem o defloculante, e uma maior porcentagem de grãos tamanho silte. Certamente isto deve ser consequência da atuação combinada do fluido com o hexametáfosfato de sódio junto às partículas muito pequenas, alterando seu comportamento, dentro do que tinha previsto Li (2001) e Solymar et al. (1992). E é interessante notar que este tipo de comportamento não foi apresentado pelas frações que passam na #200 (veja a Figura 3.49). A Tabela 3.25 resume todas as porcentagens encontradas para as diversas frações que compõe o resíduo, medidas em ensaios realizados no soro neutralizado.



**FIGURA 3.49:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada - em Soro - Para Fração <math>< \#200</math>.



**FIGURA 3.50:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada - em Soro - Para Fração <math>> \#200</math>.

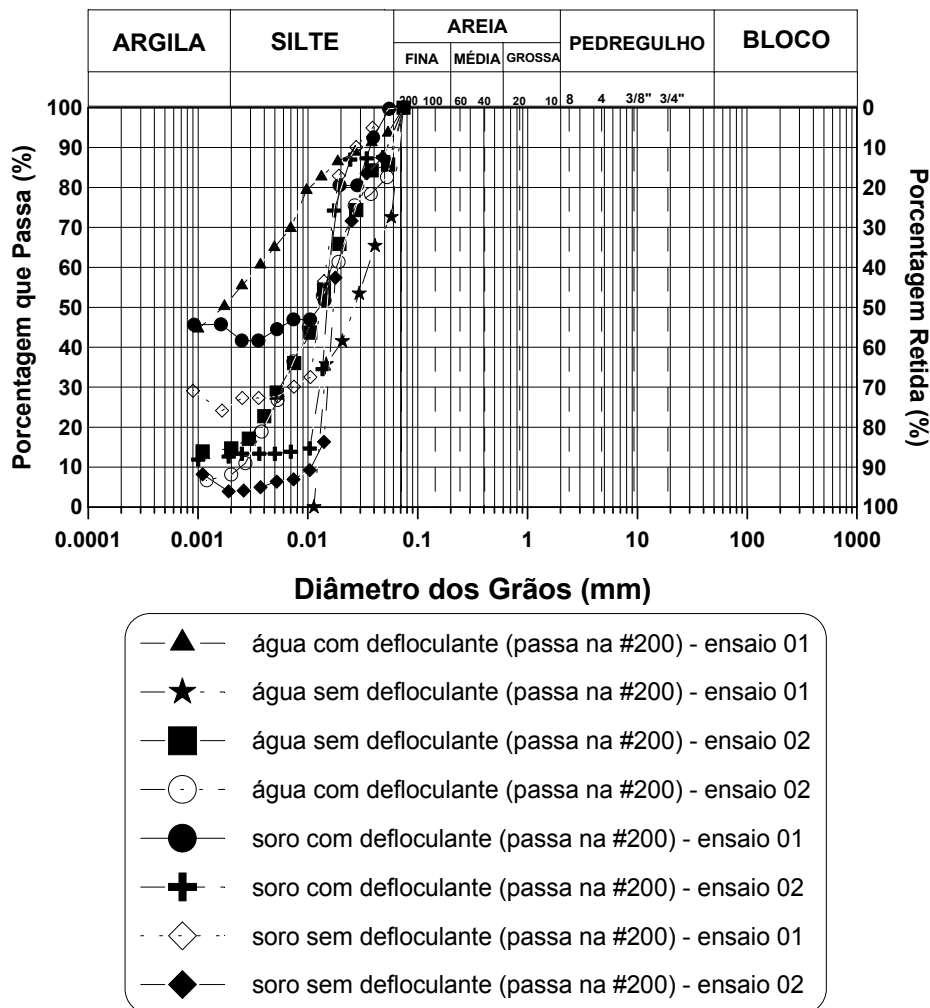
**TABELA 3.25:** Faixa Granulométrica Encontrada Para a Lama Vermelha OP Neutralizada – Ensaios Realizados Em SORO.

ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:
27% de areia	25% de areia	41% de areia	39% de areia		
66% de silte	46% de silte	52% de silte	60% de silte		
7% de argila	29% de argila.	7% de argila	1% de argila		
ENSAIOS EM FRAÇÕES < #200 E > #200					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	63% de areia	56% de areia
75% de silte	58% de silte	89% de silte	80% de silte	30% de silte	43% de silte
25% de argila	42% de argila.	4% de argila	13% de argila	6% de argila	0% de argila

Quando é feita a comparação entre os resultados obtidos de ensaios feitos em soro e água para os ensaios realizados na fração mais fina que compõe o resíduo é que fica mais evidente a influência do tipo de fluido no comportamento de sedimentação (ver a Figura 3.51). A curva obtida com água sem defloculante foi aquela que apresentou grãos maiores ou o meio que favorece a maior tendência a floculação das partículas. Já a curva obtida em água com defloculante mostra o limite inferior de tamanho das partículas, indicando ser a situação onde tem o maior número de partículas isoladas e, conseqüentemente, dando a indicação de seu tamanho real. Pode ser notada uma boa diferença para os casos de sedimentação em água e soro. Nota-se uma maior quantidade de partículas finas em suspensão no soro neutralizado que em água, indicando que na faixa de tamanho silte e argila, este fluido tende a dispersá-las, independente do uso ou não de defloculante, exceto na fração retida na #200. Para facilitar a comparação, as porcentagens das frações encontradas foram resumidas na Tabela 3.26.

Cabe chamar atenção para o fato de que em todos os casos de sedimentação feita em soro, independente dele ser o neutralizado ou não, foi percebida a formação de placas de cristalização muito finas, que se depositavam

no fundo da bureta. Esta mesma cristalização foi verificada de ocorrer no fluido estocado no laboratório, tendendo a aumentar com o tempo de repouso. Portanto, há a hipótese de que esta cristalização poderia alterar a densidade do meio e, desta maneira, influenciar os resultados da sedimentação. Este foi o motivo inicial encontrado para explicar a tendência de elevação das curvas obtidas em soro, na sua parte final, ou seja, após 24 horas de ensaio, quando então estes cristais já poderiam ter se formado. A formação destes cristais também devem ser prováveis de ocorrer nos reservatórios, mas devido à movimentação contínua do líquido sobrenadante ou devido aos lançamentos sucessivos, eles devem ser quebrados e não se saberia, assim, até que ponto poderiam influenciar o comportamento de campo.



**FIGURA 3.51:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada – Ensaio em Soro e Água - Para Fração > #200.

**TABELA 3.26:** Comparação das Faixas Granulométricas da Lama Vermelha OP Neutralizada – AMOSTRAS < #200 e > #200 – Ensaios em ÁGUA E SORO NEUTRALIZADO.

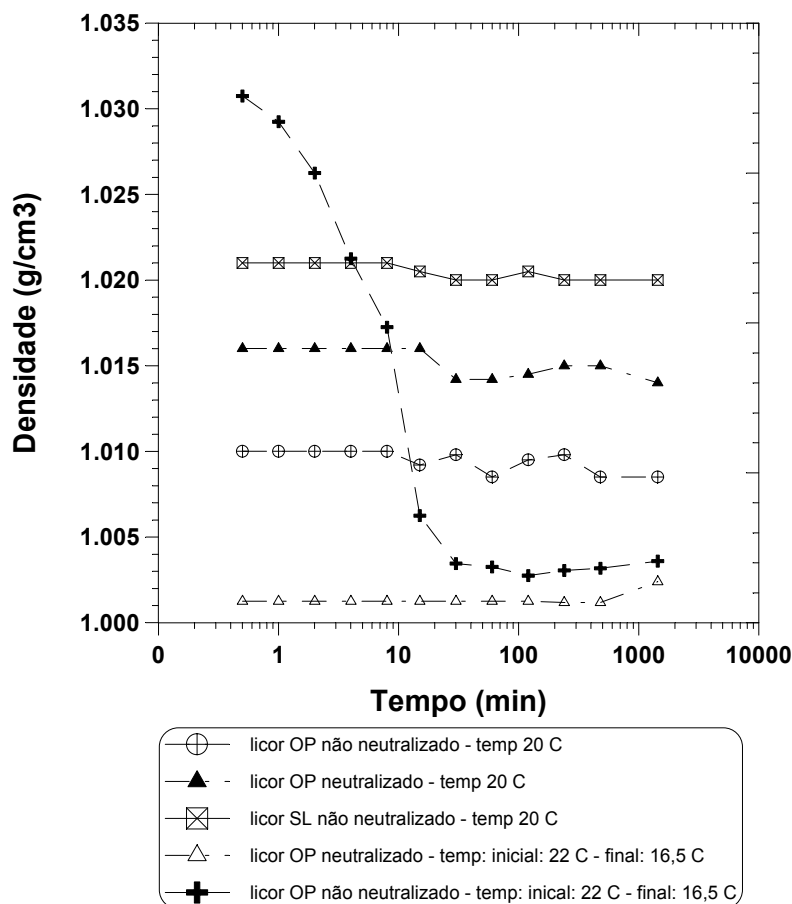
ENSAIOS EM ÁGUA					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE	SEM DEFLOCULANTE	COM DEFLOCULANTE
20% de areia	5% de areia	10% de areia	10% de areia	62% de areia	52% de areia
80% de silte	44% de silte	75% de silte	81% de silte	24% de silte	33% de silte
0% de argila	51% de argila.	15% de argila	9% de argila	13% de argila	14% de argila
ENSAIOS EM SORO NEUTRALIZADO					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE	SEM DEFLOCULANTE	COM DEFLOCULANTE
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	63% de areia	56% de areia
75% de silte	58% de silte	89% de silte	80% de silte	30% de silte	43% de silte
25% de argila	42% de argila.	4% de argila	13% de argila	6% de argila	0% de argila

Para verificar a hipótese acima, a variação da densidade dos diferentes fluidos utilizados nos ensaios de sedimentação foram monitorados por um período de 24 horas. Os resultados estão na Figura 3.52. Os ensaios com temperatura constante foram realizados pouco depois do término da bateria de ensaios 01. Os testes que apresentaram maior variação de temperatura foram executados simultaneamente aos ensaios 02.

Nas curvas mostradas na Figura 3.52, pode ser notado que os valores médios de densidades dos fluidos usados são bem menores dos que aquelas que são consideradas típicas por Li (2001) (1,2 a 1,25 g/cm<sup>3</sup>, para o soro cáustico). Também pode ser verificada dois tipos básicos de comportamento. Um, é o do valor de densidade do fluido ir diminuindo do início do ensaio até aproximadamente uma hora e meia após. Este comportamento seria uma indicação de que neste período estaria ocorrendo deposição de partículas ou dos cristais formados, permitindo que o densímetro descesse na suspensão. Para a grande



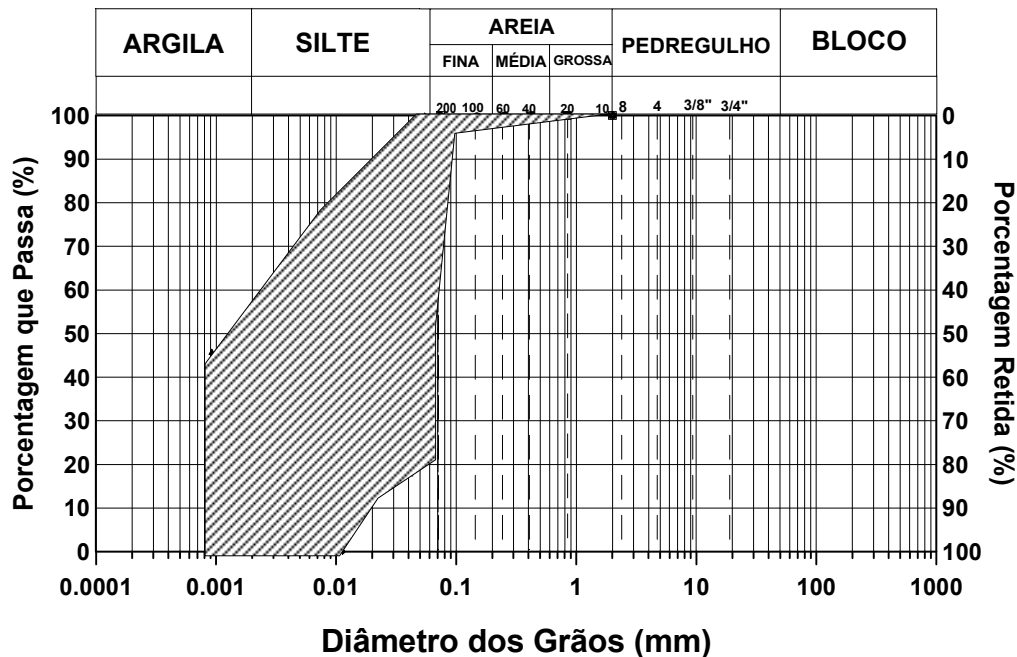
maioria dos soros estudados, isto se deu de forma bem suave, exceto para o soro cáustico durante um intervalo de tempo em que ocorreu uma maior variação de temperatura. O outro comportamento típico registrado foi a tendência de haver uma ligeira elevação da densidade ao final do ensaio (24 horas). Isto pode ocorrer devido ao fato do densímetro estar agora apoiado em uma camada mais viscosa e densa. O cuidado que se teve após a verificação da variação das densidades do soro com o tempo, mesmo que aparentemente insignificante para alguns casos, foi sempre fazer a devida correção no cálculo da planilha do ensaio. A única propriedade dos fluidos que não foi corrigida foi a viscosidade, tendo sido mantida a da água como referência.



**FIGURA 3.52:** Variação com o Tempo da Densidade dos Soros Utilizados nos Ensaio de Sedimentação.

A Figura 3.53 demarca a região do gráfico da faixa de variação encontrada em todas as curvas granulométricas da lama vermelha OP neutralizada, obtidas

tanto em soro neutralizado quanto em água, usando defloculante e não, englobando a amostra integral e só a fração que passa na #200. A Tabela 3.27 evidencia as porcentagens das frações que constituem o resíduo e que delimitam esta região, podendo ser verificada a grande variabilidade dos resultados.



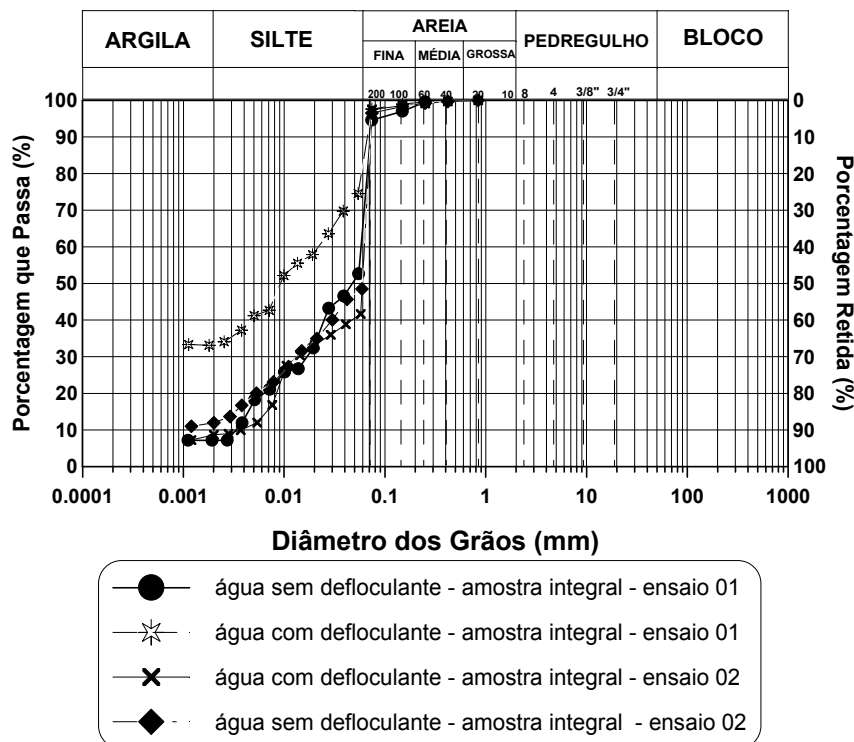
**FIGURA 3.53:** Faixa de Variação das Curvas Granulométricas Obtidas para a Lama Vermelha OP Neutralizada.

**TABELA 3.27:** Faixa Granulométrica Encontrada nos Ensaio Realizados na Lama Vermelha OP Neutralizada.

LIMITE INFERIOR (menores grãos)	LIMITE SUPERIOR (maiores grãos)
0% de areia	63% de areia
49% de silte	37% de silte
51% de argila	0% de argila

As curvas granulométricas mostradas pela Figura 3.54 foram as obtidas para amostra integral da lama vermelha OP não neutralizada, usando água como meio dispersor, para as amostras consideradas “integrais”. Também para este caso foram feitas as duas baterias de ensaios, defasadas entre si por aproximadamente um ano, tempo em que as partículas continuaram imersas no soro cáustico. Como a lama vermelha OP não neutralizada estava estocada da mesma maneira que a

neutralizada, também ocorreu a diferença entre as granulometrias das amostras dos diferentes ensaios provocada pela dificuldade de homogeneização da lama após este longo período de adensamento por peso próprio. Uma hipótese que deveria ser investigada para as duas lamas, é a possibilidade de que a diferença de tempo de imersão em repouso nestes fluidos possa ter originado algum tipo de reação ou alteração química sutil, afetando especialmente as partículas mais finas do resíduo, colaborando para diferenciar o resultado dos dois ensaios.

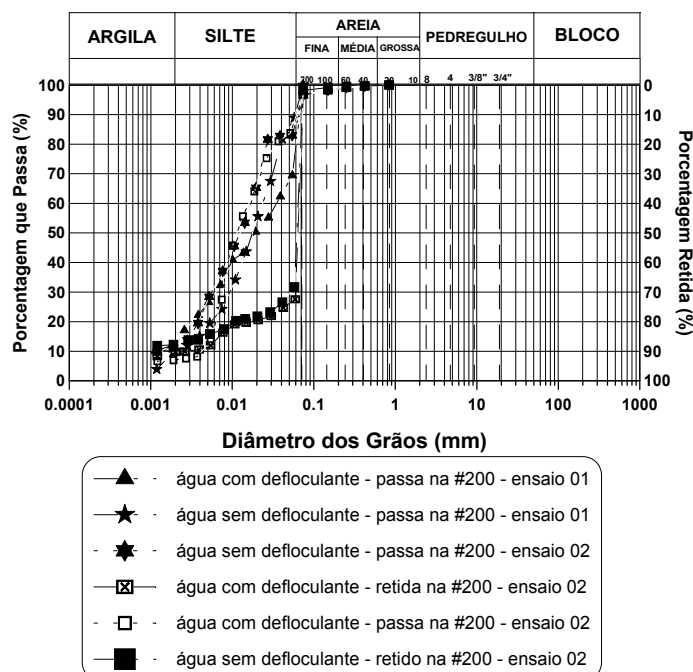


**FIGURA 3.54:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaios em Água – Amostras Integrais.

O que se percebe no gráfico da Figura 3.54 é um resultado bastante semelhante ao da Figura 3.45, o que é considerado normal, uma vez que estes dois materiais só se diferenciam entre si no tipo de fluido e não na composição das partículas. Pode ser notado que as amostras do ensaio 01 são compostas por maior quantidade de partículas mais finas, que tendem a se floccular, justificando, desta forma a maior diferença entre as curvas obtidas entre os ensaios executados usando defloculante e não. Para o ensaio 02, com amostras compostas por uma maior quantidade de partículas mais grossas, foi muito pequena a diferença em se

usar ou não o hexametáfosfato de sódio. Interessante notar é que, no ensaio 02, as curvas obtidas somente em água acusaram uma porcentagem de fração argila maior que a obtida em água com defloculante. Este comportamento também foi identificado de ocorrer em alguns dos ensaios anteriores, realizados com a lama vermelha OP neutralizada, mas só no caso quando se utilizou o soro neutralizado como meio dispersor.

Na Figura 3.55 estão os ensaios realizados na lama vermelha OP não neutralizada, em água, para a fração que passa e a que fica retida na peneira 200. A Tabela 3.28 resume as porcentagens encontradas, juntamente com aquelas dos ensaios em amostras integrais. Interessante notar que, para as frações que passam na #200, houve muito pouca diferença entre as curvas, mostrando que o defloculante tem pouca atuação para esta faixa de tamanho de partículas. Portanto, a diferença encontrada nos resultados das amostras integrais devem estar associadas principalmente a grãos finos que flocculam ou aderem a grãos maiores e ficam retidos na peneira 200. Isto pode ser confirmado nas curvas granulométricas obtidas para este material, indicando que esta fração retida na #200 é constituída na verdade de aproximadamente 30 a 50% de partículas tamanho silte e argila.



**FIGURA 3.55:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaio em Água – Fração < #200 e > #200.

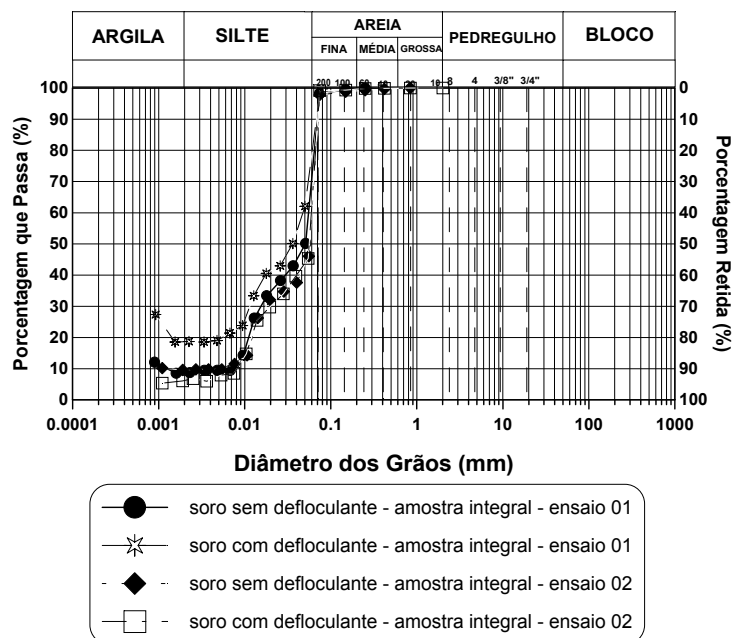
Outra coisa que pode ser percebida, especialmente pela Tabela 3.28, é que o uso do hexametáfosfato de sódio aumentou a composição da fração mais grossa do resíduo em alguns dos casos, também diminuindo a quantidade de fração tamanho argila. Ou seja, o defloculante na verdade, estaria induzindo a formação de flocos de alguns componentes químicos constituintes do resíduo, numa proporção que deve variar com o tipo e forma dos mesmos. Esta hipótese aumentaria a importância de se ter um maior conhecimento da fração coloidal ou da composição dos amorfos presentes no solo no seu comportamento durante os ensaios, como já salientava Li(2001) e Solymar et al. (1992). E pelo visto, este tipo de material tende a formar flocos que ficam retidos na peneira 200 ou ainda, se aderem aos grãos maiores.

**TABELA 3.28:** Faixa Granulométrica Encontrada Para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaios Realizados em ÁGUA.

ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
sem defloculante:	com defloculante:	sem defloculante:	com defloculante:	sem defloculante:	com defloculante:
35% de areia	18% de areia	47% de areia	48% de areia	47% de areia	48% de areia
58% de silte	50% de silte	40% de silte	42% de silte	40% de silte	42% de silte
7% de argila	32% de argila.	12% de argila	9% de argila	12% de argila	9% de argila
ENSAIOS PARA AS FRAÇÕES <#200 E >#200					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante
10% de areia	25% de areia	12% de areia	10% de areia	58% de areia	67% de areia
80% de silte	63% de silte	76% de silte	82% de silte	29% de silte	22% de silte
10% de argila	12% de argila.	11% de argila	7% de argila	13% de argila	10% de argila

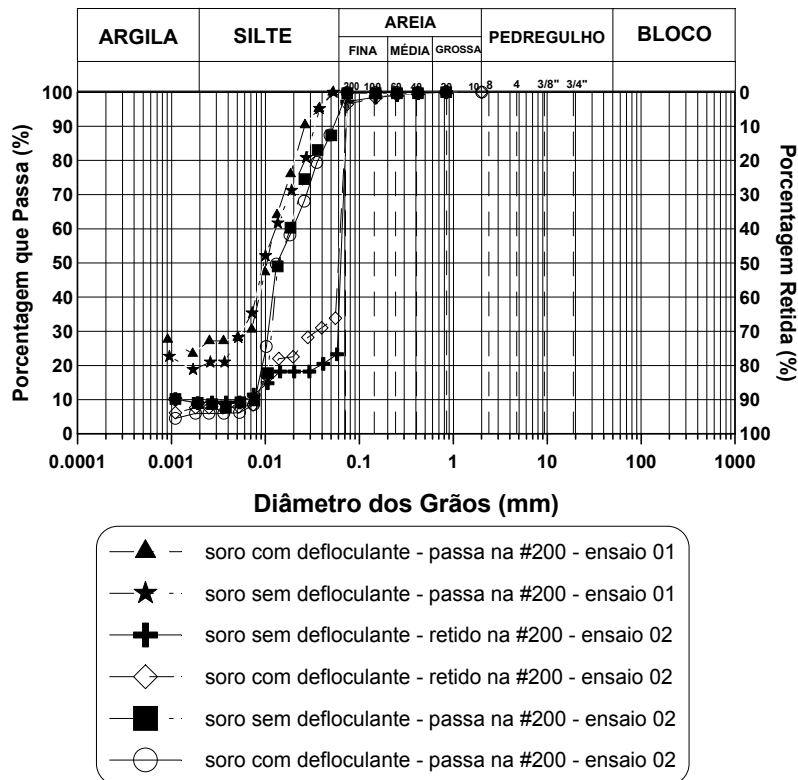
A Figura 3.56 mostra os resultados dos ensaios executados usando o soro cáustico como meio dispersor. Nestes testes, pode se perceber nitidamente o que se supõe ser o efeito da cristalização do fluido, com a curva apresentando uma elevação no trecho final devido a uma elevação da densidade da solução ao final do ensaio, contrariamente ao que acontece nos ensaios usuais executados em água. Nelas, fica também bem evidente que os dados de sedimentação neste soro

cáustico (pH 14), com ou sem defloculante, para o ensaio 02 estão muito semelhantes entre si, ficando bem próximo também dos resultados da curva obtida sem defloculante do ensaio 01. Mesmo a curva com defloculante para o primeiro ensaio, onde teoricamente se trabalhou com amostras mais finas, o efeito só foi mais marcante para a fração menor que 0.01mm. Estes resultados podem indicar uma pouca eficiência do hexametáfosfato neste tipo de fluido e confirmar a indicação de Ignatius & Pinto (1991) de que ele tende a flocular as partículas, dependendo da sua concentração. Nos resultados do ensaio 02, pode ser novamente notado que o ensaio realizado com defloculante apresentou uma porcentagem menor de fração tamanho argila que o executado sem defloculante.



**FIGURA 3.56:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaio em Soro Cáustico – Amostra Integral.

Na Figura 3.57, os resultados dos ensaios realizados em soro com a fração que passa na peneira 200 mostram que o uso ou não do hexametáfosfato não influencia muito nos resultados. Seu efeito só é sentido mais nas frações menores que aproximadamente 0,007mm. No caso do ensaio 01, o uso do hexametáfosfato rendeu o resultado esperado, ou seja, o ensaio feito com ele apresentou uma fração tamanho argila ligeiramente maior. Porém, no caso do ensaio 02, novamente se verifica frações tamanho argila maiores para o teste realizado com defloculante.



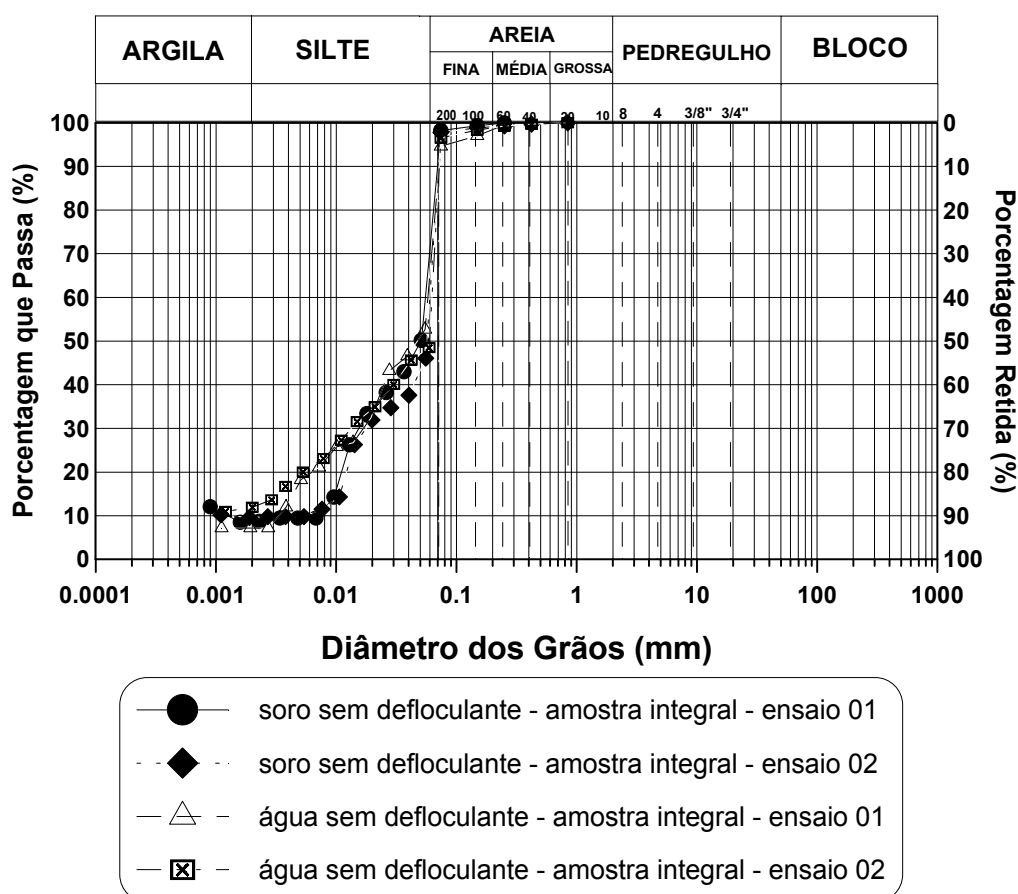
**FIGURA 3.57:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaio em Água – Fração <math>< \#200</math> e <math>> \#200</math>.

Pela Tabela 3.29, que resume as porcentagens encontradas em todos os ensaios realizados em soro cáustico, pode ser verificado novamente que há em torno de 40% de material de tamanho entre silte e argila que compõe a fração que fica retida na peneira 200. Também é percebido que para estes casos, o ensaio que usou defloculante apresentou um teor de fração tamanho argila ligeiramente menor do que quando ele não foi utilizado. Pode ser confirmado que no caso do ensaio 02, todas as curvas granulométricas obtidas de testes onde se utilizou defloculante mostraram uma menor fração tamanho argila e uma maior tamanho silte que as obtidas em soro sem defloculante.

A comparação entre os resultados de granulometria obtidos entre ensaios realizados em água e soro cáustico, para as amostras integrais, sem defloculante, estão na Figura 3.58. Pode ser notado que é pequena a diferença de comportamento dos grãos sedimentando em soro cáustico ou em água. Somente foi percebida uma maior tendência a floculação no soro cáustico para a faixa de tamanho variando de aproximadamente 0,02mm a 0,003mm, provocando uma ligeira diferença entre as curvas.

**TABELA 3.29:** Faixa Granulométrica Encontrada Para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaios em SORO CÁUSTICO.

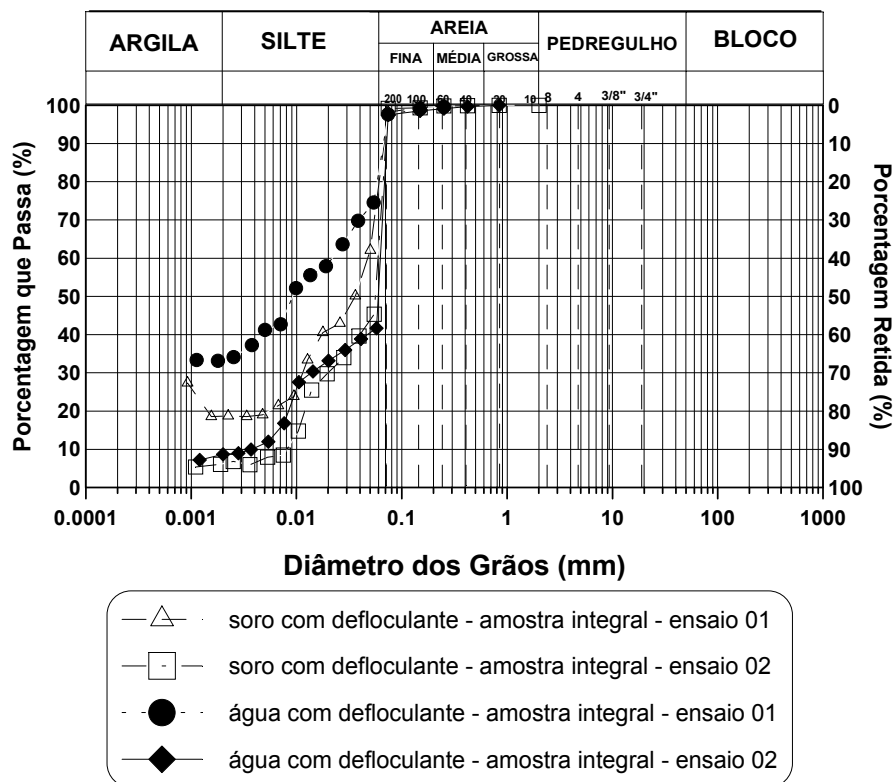
ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
SEM DEFLOCULANTE:		COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:		COM DEFLOCULANTE
30% de areia		22% de areia	41% de areia		40% de areia
60% de silte		59% de silte	49% de silte		54% de silte
10% de argila		19% de argila.	10% de argila		6% de argila
ENSAIOS NA Fração < #200 E > #200.					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	66% de areia	50% de areia
80% de silte	75% de silte	83% de silte	87% de silte	24% de silte	41% de silte
20% de argila	25% de argila.	9% de argila	6% de argila	9% de argila	8% de argila



**FIGURA 3.58:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Soro Cáustico e Água Sem Defloculante – Amostra Integral.



A comparação entre os resultados de granulometria obtidos entre ensaios realizados em água e soro cáustico, para as amostras integrais, com defloculante, está na Figura 3.59. Na presença do hexametáfosfato de sódio, foi grande a diferença entre as curvas obtidas para o ensaio 01, onde se percebe uma maior atuação do defloculante em água, indicando que realmente o soro tendeu a manter as partículas mais floculadas. Já no caso do ensaio 02, a diferença não foi tão sensível assim, mas também pode ser notado que em soro cáustico, a atuação do defloculante foi menos sensível. A curva obtida usando soro cáustico e defloculante no ensaio 02 apresentou a menor fração de finos de todos os ensaios.



**FIGURA 3.59:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Com Defloculante – Amostra Integral.

A Tabela 3.30 apresenta a comparação entre as porcentagens medidas nos ensaios em água e soro cáustico, para as amostras integrais. Pode ser observado que em quase todos os casos, a fração tamanho argila foi menor no soro cáustico. Porém, em todos os casos, a fração tamanho silte foi maior neste tipo de fluido.

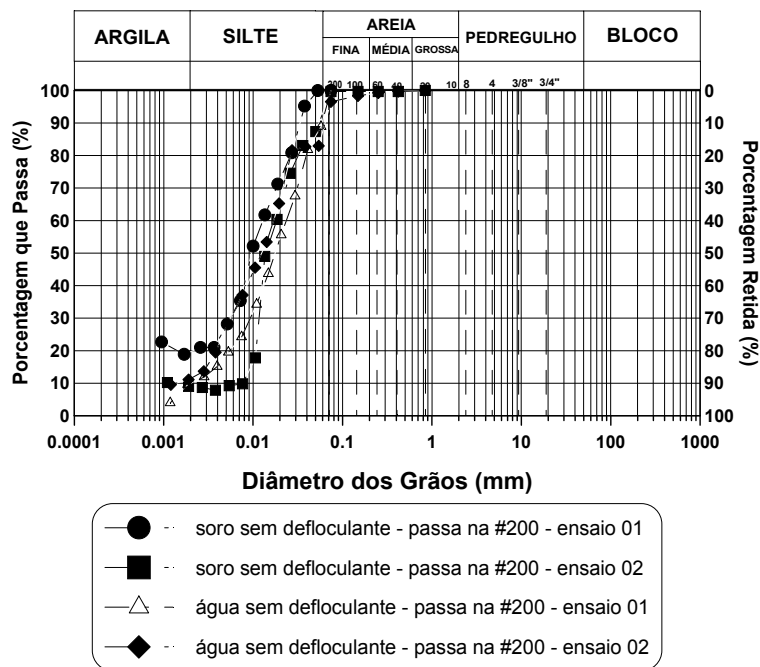
**TABELA 3.30:** Comparação das Faixas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Amostras Integrais – Ensaio em Água e Soro Cáustico.

<b>ENSAIOS EM ÁGUA</b>			
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>	
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>
35% de areia	18% de areia	47% de areia	48% de areia
58% de silte	50% de silte	40% de silte	42% de silte
7% de argila	32% de argila.	12% de argila	9% de argila
<b>ENSAIOS EM SORO CÁUSTICO</b>			
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>	
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>
30% de areia	22% de areia	41% de areia	40% de areia
60% de silte	59% de silte	49% de silte	54% de silte
10% de argila	19% de argila.	10% de argila	6% de argila

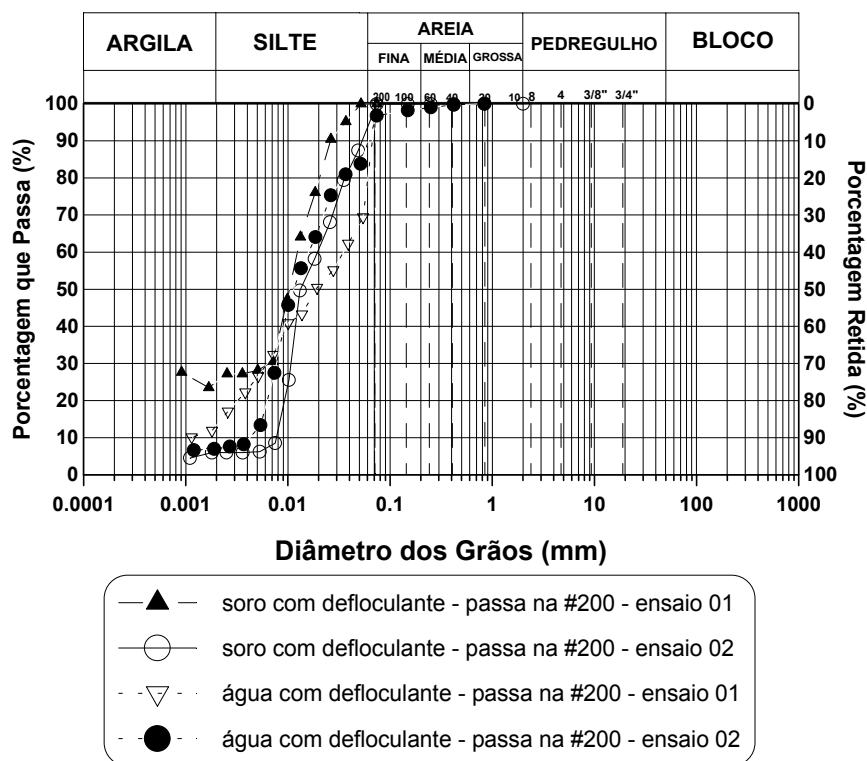
A comparação entre as curvas obtidas para a fração que passa na #200, em soro cáustico e água, sem e com defloculante, pode ser vista nas Figuras 3.60 e 3.61, respectivamente. Nas curvas obtidas sem defloculante, percebe-se pouca diferença entre os resultados, especialmente em relação aos ensaios feitos em água. O comportamento em soro cáustico foi diferenciado em relação aos dois tipos de amostras utilizados, apresentando uma tendência de haver floculação das partículas mais finas para o ensaio 02, enquanto no ensaio 01, esta menor fração estava bem mais dispersa.

Quando se utilizou o defloculante, o comportamento fica mais diferenciado, tanto com relação ao tipo de fluido como às amostras. No caso do ensaio 01, os resultados em soro cáustico foram bem mais sensíveis ao hexametáfosfato de sódio, o contrário do que ocorre com a amostra do ensaio 02. A explicação, novamente, deve estar diferença de composição das partículas finas presentes, uma vez que quando se compara só os resultados do ensaio 02, há pouca diferença entre eles, mas de novo a curva em soro cáustico apresenta uma ligeira tendência a flocular as partículas de menor tamanho. A Tabela 3.31 resume as porcentagens correspondentes às principais frações constituintes do resíduo medidas nos ensaios em soro cáustico e água, para estas situações. Pode ser visto que no caso da fração mais fina, todos os ensaio em soro cáustico apresentaram maior quantidade de fração tamanho silte mais argila que os ensaio em água. Já a

porcentagem de fração tamanho areia, foi maior em todos os ensaios executados usando água.



**FIGURA 3.60:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Sem Defloculante – Fração <#200.



**FIGURA 3.61:** Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Com Defloculante – Fração < #200.

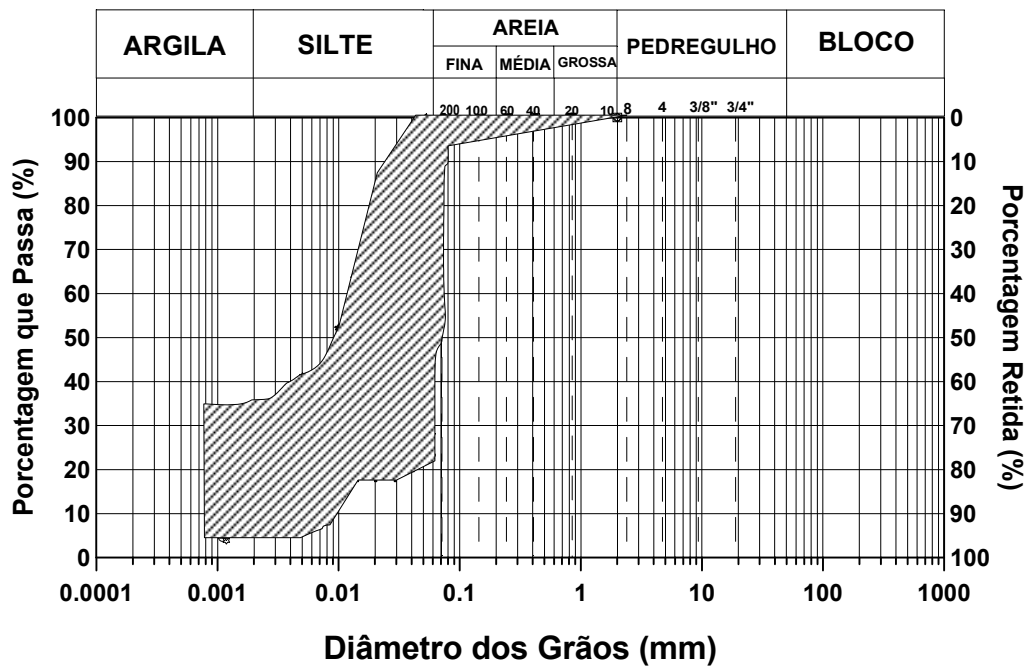
**TABELA 3.31:** Comparação das Faixas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – FRAÇÃO > #200 – Ensaios em Água e Soro Cáustico.

ENSAIOS EM ÁGUA					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante
10% de areia	25% de areia	12% de areia	10% de areia	58% de areia	67% de areia
80% de silte	63% de silte	76% de silte	82% de silte	29% de silte	22% de silte
10% de argila	12% de argila.	11% de argila	7% de argila	13% de argila	10% de argila
ENSAIOS EM SORO CÁUSTICO					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
< #200		< #200		> #200	
sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante	sem defloculante	com defloculante
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	66% de areia	50% de areia
80% de silte	75% de silte	83% de silte	87% de silte	24% de silte	41% de silte
20% de argila	25% de argila.	9% de argila	6% de argila	9% de argila	8% de argila

Na Tabela 3.31 também estão representados os valores obtidos em ensaios realizados na fração retida na #200. Pode ser confirmado que esta parcela na verdade é composta de 30 a 40% de partículas tamanho silte e argila, que ficam floculadas ou aderidas nos grãos maiores. Para este material, os ensaios realizados sem defloculante deram resultados semelhantes, mas se percebe que em soro cáustico há uma ligeira tendência a floculação das menores partículas, aumentando a porcentagem da fração tamanho areia. Quando se usa o defloculante, percebe-se que, independente do fluido, há uma ligeira redução da fração tamanho argila. Curiosamente, o hexametáfosfato de sódio aumentou a porcentagem de fração tamanho areia em água, o que também pode ser percebido nos ensaios realizados nas amostras integrais, em menor proporção (ver Tabela 3.28). Tudo isto vem indicando que estas pequenas partículas que se aglutinam e ficam retidas na #200 junto com os grãos maiores, devem ter uma constituição química - mineralógica diferenciada das demais e influenciar bastante o comportamento do resíduo durante a fase de sedimentação, dependendo do tipo de fluido e do uso ou não do defloculante.

Com relação às curvas obtidas dos ensaios para a fração passante na #200, cabe lembrar os resultados de Ignatius & Pinto (1991), que verificaram que este fluido pode agir como dispersor ou floculador, dependendo de sua concentração, como pode ser visto na Figura 3.42. Uma outra hipótese é que a mudança de propriedades do soro ao longo do tempo afetando, mostrada na Figura 3.52, que pode estar também afetando o comportamento das partículas de tamanho coloidal.

A Figura 3.62 mostra a região que delimita toda a variação de granulometria encontrada para a lama vermelha OP não neutralizada, obtida de ensaios usando tanto soro cáustico quanto água. A Tabela 3.32 ressalta as porcentagens limites das frações que definem esta região.

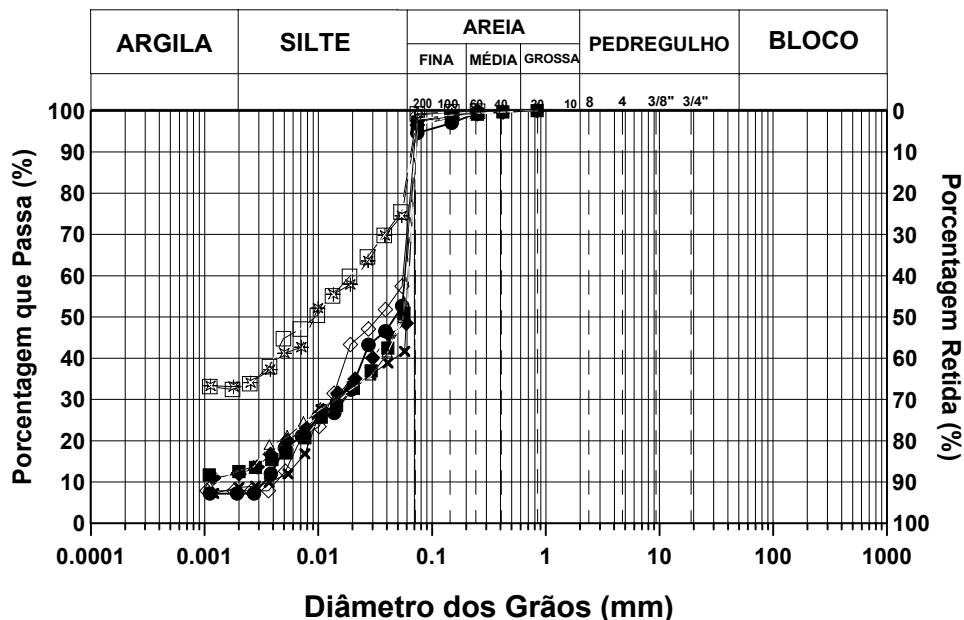


**FIGURA 3.62:** Faixa de Variação das Curvas Granulométricas Obtidas para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

**TABELA 3.32:** Faixa Granulométrica Encontrada nos Ensaios Realizados na Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

LIMITE INFERIOR (menores grãos)	LIMITE SUPERIOR (maiores grãos)
0% de areia	67% de areia
78% de silte	37% de silte
32% de argila	6% de argila

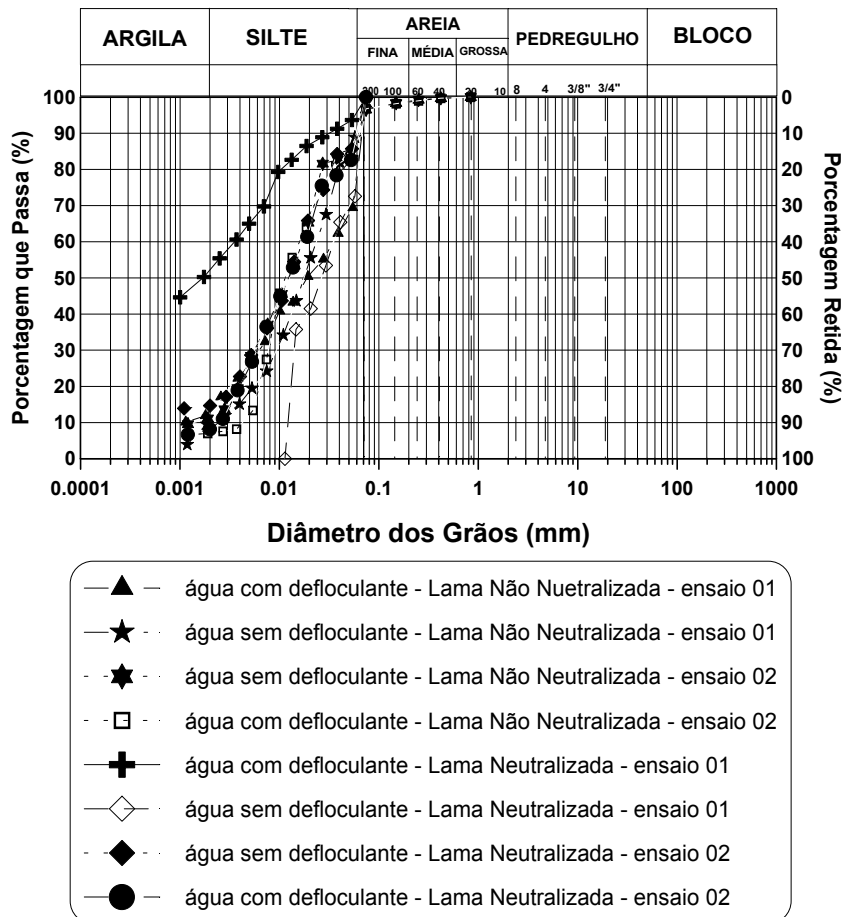
A Figura 3.63 compara diretamente as curvas granulométricas de amostras integrais obtidas em água, com e sem defloculante, das lamas vermelhas OP neutralizada e não neutralizada. Estes resultados confirmam que o comportamento das duas é bastante semelhante em um meio neutro, com o defloculante agindo de maneira bem semelhante nas duas, o que era de se esperar, já que teoricamente, a única diferença que haveria entre as duas seria o fluido. Na verdade, o intuito de se fazer esta comparação entre estes dois resíduos era o de verificar se o tempo de imersão nos fluidos cáustico e neutralizado promoveram alguma alteração no comportamento do resíduo.



**FIGURA 3.63:** Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não Obtidas em Água – Amostras Integrais.

A fração que passa na #200 das lamas vermelhas OP neutralizada e cáustica têm as suas curvas granulométrica obtidas em sedimentação em água comparadas na Figura 3.64. Percebe-se que a lama vermelha OP não neutralizada apresenta uma menor sensibilidade ao defloculante em todos os casos, enquanto que a lama vermelha OP neutralizada apresentou grande sensibilidade a presença de defloculante no ensaio 01. Isto pode indicar que o contato prolongado com o soro cáustico, onde a amostra esteve imersa durante alguns meses antes de ser preparada para o ensaio, tendeu a agregar mais estas partículas dos resíduo que

passam na #200 em uma ligação que o hexametáfosfato de sódio não consegue mais quebrar, nem quando elas são lavadas, secas e novamente rehidratadas com água pura.



**FIGURA 3.64:** Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não, obtidas em Água - Fração < #200.

A Tabela 3.33 resume todas as porcentagens das frações que constituem os resíduos lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada, para ensaios obtidos em água, facilitando a comparação.

A Figura 3.65 compara as mesmas amostras integrais de lamas vermelhas OP neutralizadas e não neutralizadas, quando sedimentadas em soro. Aqui se nota que o defloculante tem menor atuação no fluido não neutralizado, uma vez que as curvas granulométricas obtidas quando se usa o soro cáustico apresentam menor diferença entre si, havendo ou não o uso do hexametáfosfato de sódio. Os ensaios em soro neutralizado com defloculante apresentaram o limite inferior (grãos

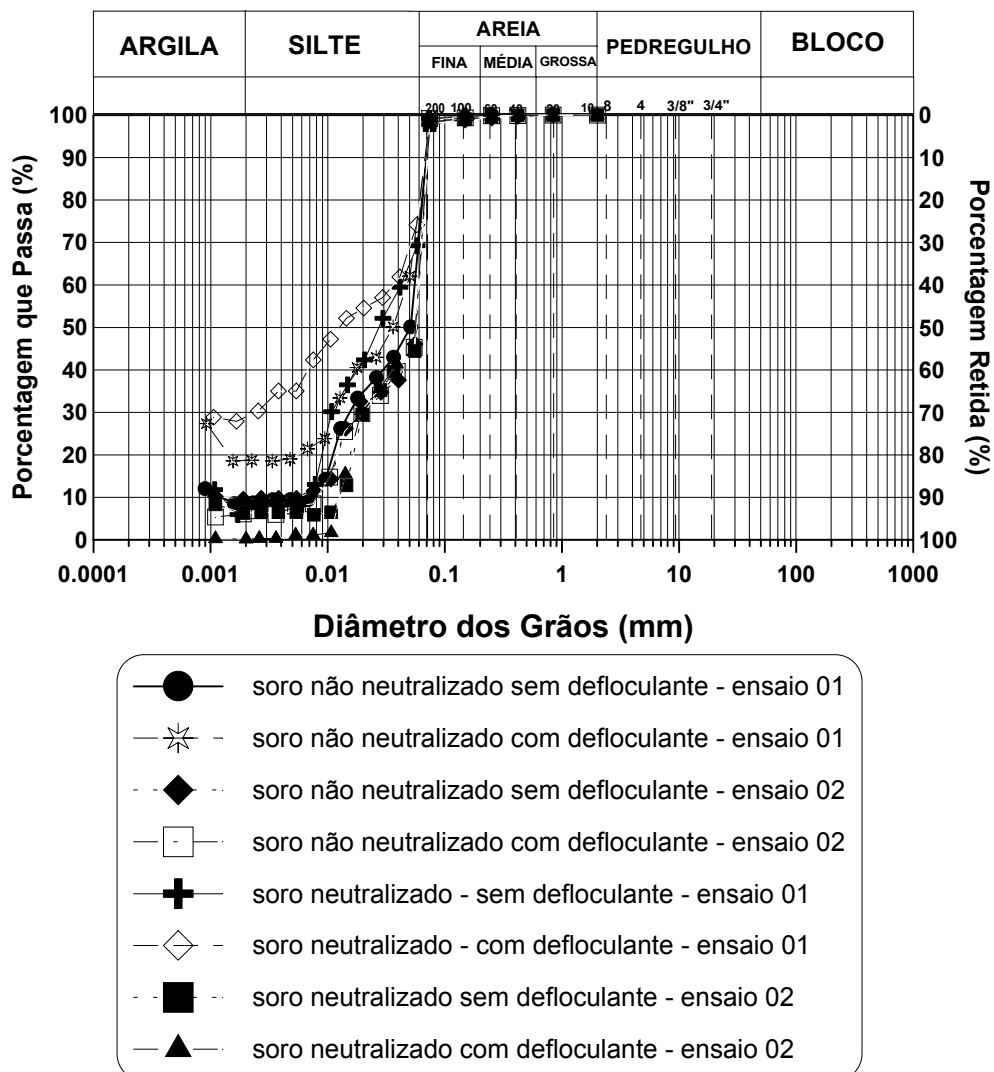
menores) e superior (grãos maiores) para os ensaios 01 e 02, respectivamente. Isto deve ser devido a diferença na composição químico-mineralógica da fração mais fina destas duas amostras, o que originou reações diferenciadas entre elas e a combinação fluido mais hexametáfosfato de sódio.

**TABELA 3.33:** Faixa Granulométrica Encontrada Para a Lama Vermelha OP Neutralizada e Cáustica – Ensaios em ÁGUA.

<b>ENSAIOS NA LAMA VERMELHA OP NÃO NEUTRALIZADA</b>					
<b>ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>
35% de areia	18% de areia	47% de areia	48% de areia	47% de areia	48% de areia
58% de silte	50% de silte	40% de silte	42% de silte	40% de silte	42% de silte
7% de argila	32% de argila.	12% de argila	9% de argila	12% de argila	9% de argila
<b>ENSAIOS PARA AS FRAÇÕES &lt;#200 E &gt;#200</b>					
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>			
<b>&lt; #200</b>		<b>&lt; #200</b>		<b>&gt; #200</b>	
<b>sem defloculante</b>	<b>com defloculante</b>	<b>sem defloculante</b>	<b>com defloculante</b>	<b>sem defloculante</b>	<b>com defloculante</b>
10% de areia	25% de areia	12% de areia	10% de areia	58% de areia	67% de areia
80% de silte	63% de silte	76% de silte	82% de silte	29% de silte	22% de silte
10% de argila	12% de argila.	11% de argila	7% de argila	13% de argila	10% de argila
<b>ENSAIOS EM LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA.</b>					
<b>ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>
35% de areia	15% de areia	49% de areia	49% de areia	49% de areia	49% de areia
58% de silte	53% de silte	39% de silte	39% de silte	39% de silte	39% de silte
7% de argila	32% de argila.	12% de argila	12% de argila	12% de argila	12% de argila
<b>ENSAIOS EM FRAÇÕES &lt; #200 E &gt; #200</b>					
<b>ENSAIO 01</b>		<b>ENSAIO 02</b>			
<b>&lt; #200</b>		<b>&lt; #200</b>		<b>&gt; #200</b>	
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>	<b>COM DEFLOCULANTE:</b>
20% de areia	5% de areia	10% de areia	10% de areia	62% de areia	52% de areia
80% de silte	44% de silte	75% de silte	81% de silte	24% de silte	33% de silte
0% de argila	51% de argila.	15% de argila	9% de argila	13% de argila	14% de argila



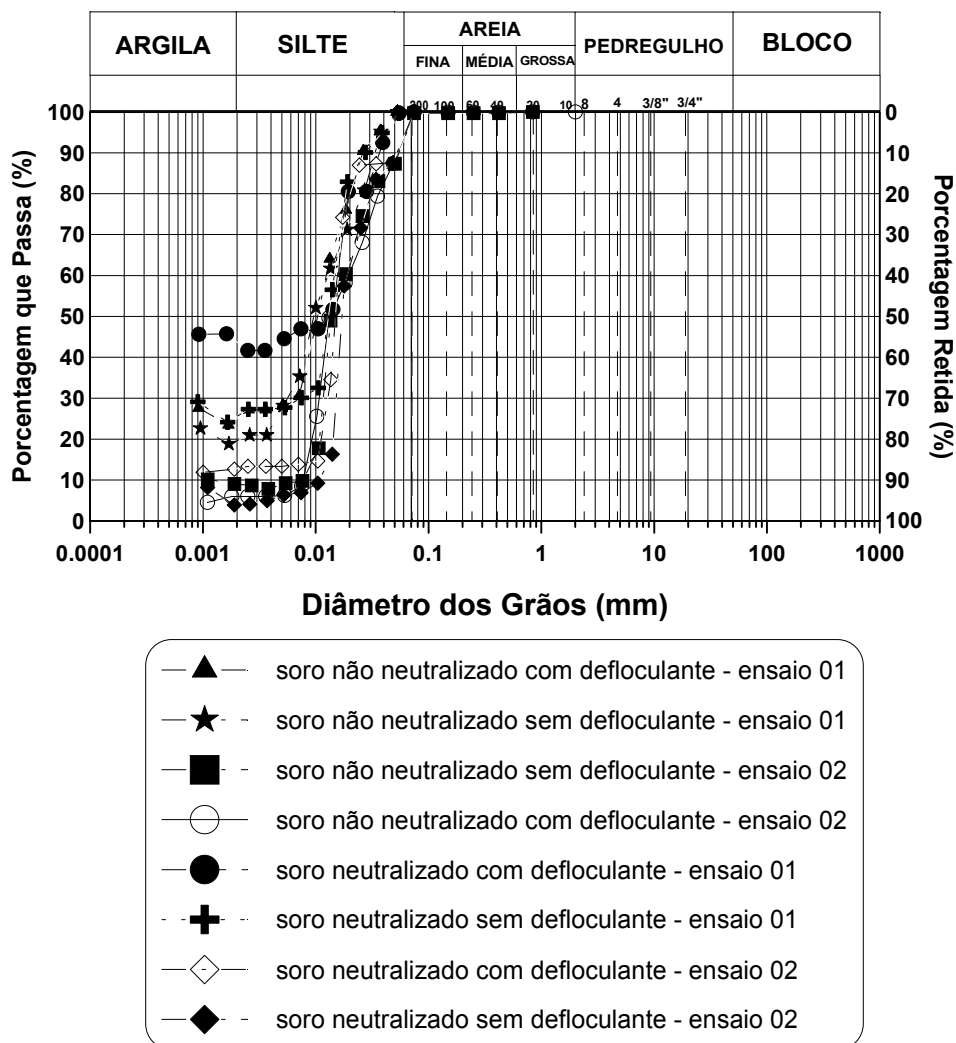
Analisando a Figura 3.66, que compara os resultados obtidos nos ensaios realizados em soro com as amostras constituídas por grãos passantes na #200, é possível ver que no início quase não há diferença entre as curvas dos dois materiais. Para as partículas menores, porém, a curva da lama vermelha OP neutralizada em soro com defloculante se destaca, mostrando que neste tipo de fluido, o hexametáfosfato consegue desagregar os flocos formados, mas não consegue a mesma eficiência no soro cáustico. Para os ensaios realizados com este último tipo de fluido como meio dispersor, quase não há diferença entre as curvas granulométricas obtidas nos ensaios que usaram ou não o defloculante, inclusive também se ajustando bem ao resultado da lama vermelha OP neutralizada (soro neutralizado) sem defloculante.



**FIGURA 3.65:** Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não Obtidas em Soro – Amostras Integrais.

Para facilitar a comparação, a Tabela 3.34 reúne todas as porcentagens das frações constituintes da lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada, medidas em ensaios que utilizaram ou soro cáustico ou o neutralizado como meio dispersor. O que poder ser concluído dos números aí apresentados é que no soro cáustico, a tendência é se ter uma menor a fração tamanho argila do que no soro neutralizado. Assim, o meio cáustico seria o mais indicado para se obter uma sedimentação mais rápida, pois tende a flocular mais as partículas, como já havia concluído Solymar et al. (1992).

A Figura 3.67 mostra a região no gráfico correspondente à faixa de variação das curvas granulométricas das lamas vermelhas OP, neutralizada e não neutralizada, para todas as situações analisadas.



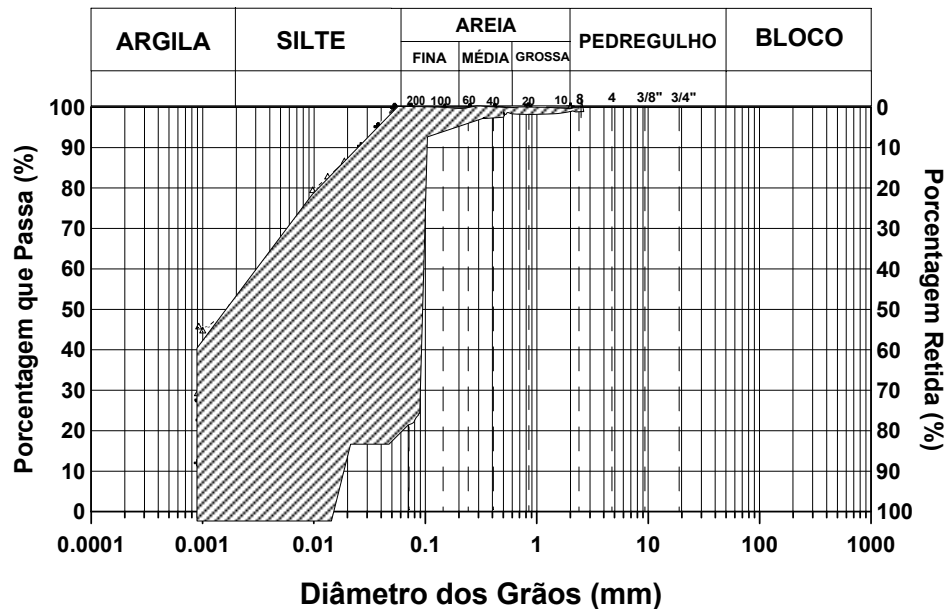
**FIGURA 3.66:** Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não em Soro - Fração < #200

**TABELA 3.34:** Faixa Granulométrica Encontrada Para a Lama Vermelha OP Neutralizada e Cáustica – Ensaios em SORO Neutralizado e Cáustico.

<b>ENSAIOS EM SORO NEUTRALIZADO</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>		<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>		<b>COM DEFLOCULANTE</b>
27% de areia		25% de areia	41% de areia		39% de areia
66% de silte		46% de silte	52% de silte		60% de silte
7% de argila		29% de argila.	7% de argila		1% de argila
<b>ENSAIOS EM FRAÇÕES &lt; #200 E &gt; #200</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>&lt; #200</b>		<b>&lt; #200</b>		<b>&gt; #200</b>	
<b>SEM DEFLOC.</b>	<b>COM DEFLOC.</b>	<b>SEM DEFLOC.</b>	<b>COM DEFLOC.</b>	<b>SEM DEFLOC.</b>	<b>COM DEFLOC.</b>
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	63% de areia	56% de areia
75% de silte	58% de silte	89% de silte	80% de silte	30% de silte	43% de silte
25% de argila	42% de argila.	4% de argila	13% de argila	6% de argila	0% de argila
<b>ENSAIOS EM SORO CÁUSTICO</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>SEM DEFLOCULANTE</b>		<b>COM DEFLOCULANTE:</b>	<b>SEM DEFLOCULANTE:</b>		<b>COM DEFLOCULANTE</b>
30% de areia		22% de areia	41% de areia		40% de areia
60% de silte		59% de silte	49% de silte		54% de silte
10% de argila		19% de argila.	10% de argila		6% de argila
<b>ENSAIOS NA Fração &lt; #200 E &gt; #200.</b>					
<b>ENSAIO 01</b>			<b>ENSAIO 02</b>		
<b>&lt; #200</b>		<b>&lt; #200</b>		<b>&gt; #200</b>	
<b>sem defloc.</b>	<b>com defloc.</b>	<b>sem defloc.</b>	<b>com defloc.</b>	<b>sem defloc.</b>	<b>com defloc.</b>
0% de areia	0% de areia	7% de areia	7% de areia	66% de areia	50% de areia
80% de silte	75% de silte	83% de silte	87% de silte	24% de silte	41% de silte
20% de argila	25% de argila.	9% de argila	6% de argila	9% de argila	8% de argila

A comparação entre a fração passante na #200 entre a lama vermelha SL, usando soro cáustico e água, e a lama de lavagem de bauxita, mesma jazida da lama vermelha SL, está na Figura 3.68, sendo esta mais uma verificação do efeito do processamento no resíduo. Neste caso, a sedimentação em água sem defloculante da lama de lavagem delimita a faixa de variação granulométrica, apresentando os grãos mais grossos, uma indicação da tendência das partículas flocularem. As curvas obtidas em ensaio usando soro cáustico mostram pouco efeito do hexametáfosfato de sódio como defloculante. Este mesmo efeito havia acontecido com lama vermelha OP não neutralizada, que também tem soro

cáustico como fluido. Percebe-se que o resíduo de processamento é mais fino que o de lavagem, uma vez que ele apresenta resultados bem semelhantes ao da lama de lavagem em ensaio com defloculante. É comum que a bauxita seja bem moída antes de ir para os digestores de soda cáustica, no Sistema Bayer.

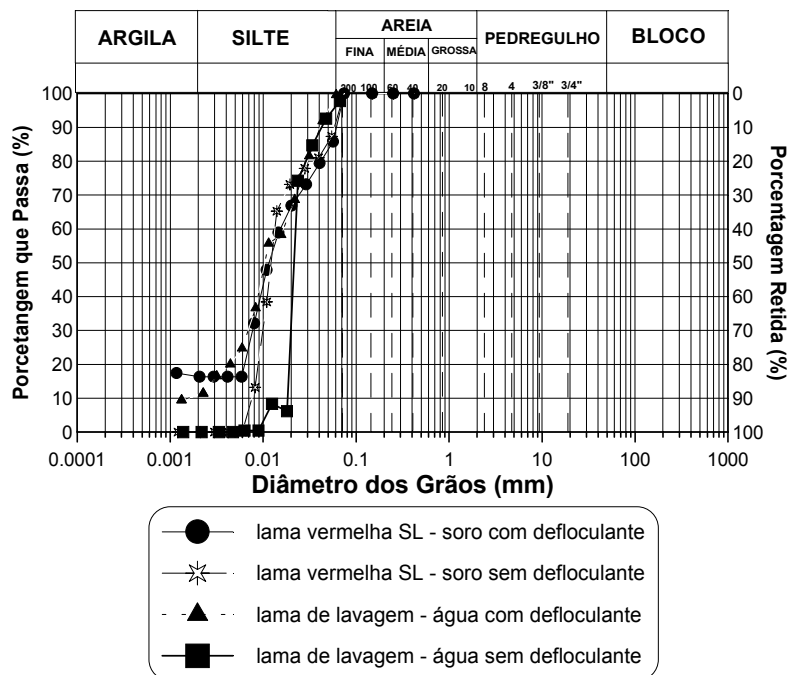


**FIGURA 3.67:** Faixa de Variação Encontrada Para as Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não.

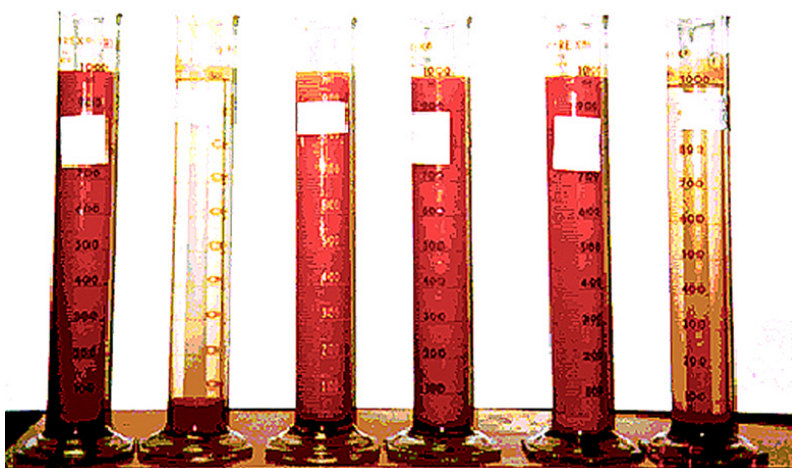
Com relação à Figura 3.44, nota-se uma proporção muito maior da fração tamanho argila do que a apresentada pelos ensaios de sedimentação em soro cáustico da Figura 3.68. Na Figura 3.44, a lama de lavagem também se apresenta bem mais fina que a de processamento e também mostra uma fração argila maior do que a apresentada nas curvas da Figura 3.68. Isto, porém, pode ser devido ao uso de amostras de uma área diferente nos ensaios da Figura 3.44 em relação àquelas usadas nos ensaios apresentados pela Figura 3.68. Estes últimos foram executados em amostras recolhidas de uma área de teste, coletada já com 60% de teor de sólidos e provavelmente, com maior presença de material mais grosso, enquanto que os primeiros, foram realizados em amostras coletadas em um teor de sólidos muito mais baixo, diretamente do reservatório de disposição.

A Figura 3.69 mostra alguns ensaios de sedimentação feitos, em três lamas diferentes. As duas primeiras provetas, da esquerda para direita, estão com lama de lavagem de bauxita, amostras de diferentes locais, em água, os dois com defloculante e amostras integrais. A primeira estava no início do ensaio, enquanto

a Segunda, no fim. Em seguida, as outras duas estão com a lama vermelha OP neutralizada, bem no início, em água com e sem defloculante, também amostras integrais. As duas últimas, na extrema direita são da lama vermelha OP não neutralizada, uma em água sem defloculante e a outra com, sendo que a última já estava em final de ensaio e a penúltima, no início.



**FIGURA 3.68:** Comparação entre as Curvas Granulométricas da Lama Vermelha SL em Soro e a Lama de Lavagem de Bauxita em Água - Fração < #200



**FIGURA 3.69:** Alguns dos Ensaio de Sedimentação Feitos nos Resíduos De Mineração e Processamento de Bauxita.

### 3.8

#### Área Superficial Específica.

Área superficial específica é a soma das superfícies de todas as partículas contidas na unidade de volume (ou peso) do solo e será maior quanto mais fino ele for (*Lambe & Whitman, 1969*). Ela pode servir como uma indicação do tempo de sedimentação, ou seja, quanto maior a área superficial, mais lento será o processo de deposição.

As áreas superficiais específicas de alguns resíduos de bauxitas, tanto de lavagem quanto de processamento, estão mostradas na Tabela 3.35. Aí, pode ser notada a similaridade dos valores obtidos para os resíduos com os da rocha de origem. A variação dos resultados entre os diferentes locais devem ser principalmente devidos à diferença entre a composição química mineralógica dos materiais comparados e técnica de processamento, já que a granulometria final da bauxita antes da digestão em soda cáustica pode variar de local para local. Por estes dados, nota-se que os resíduos brasileiros estão entre os mais finos. A Tabela 3.36 mostra os valores de área superficial específica encontrada para bauxitas da região sudeste do país e suas conseqüentes lamas vermelhas.

**TABELA 3.35:** Área Superficial Específica de Diferentes Lamas de Lavagem e Vermelhas (*adaptado de Zambo, 1977*)

<b>ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (m<sup>2</sup>/g)</b>	
<b>BAUXITAS</b>	
jamaicana	22.8
brasileira	32.5
grega	6.4
<b>LAMAS VERMELHAS</b>	
jamaicana	36
brasileira	34.5
grega	7.3
África Ocidental	19
Austrália	15

**TABELA 3.36:** Área Superficial Específica de Diferentes Bauxitas Brasileiras e Suas Lamas Vermelhas (adaptado de Li & Rutherford, 1996)

AMOSTRA	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /grama)	
	BAUXITA	LAMA VERMELHA
1	10.46	33
2	19.31	50.41
3	14.87	40.02
4	17.60	46.61
5	17.56	47.40
6	19.24	46.72
7	16.82	41.62

Os resultados da Tabela 3.36 mostram que há uma considerável quebra de grãos durante o processo Bayer.

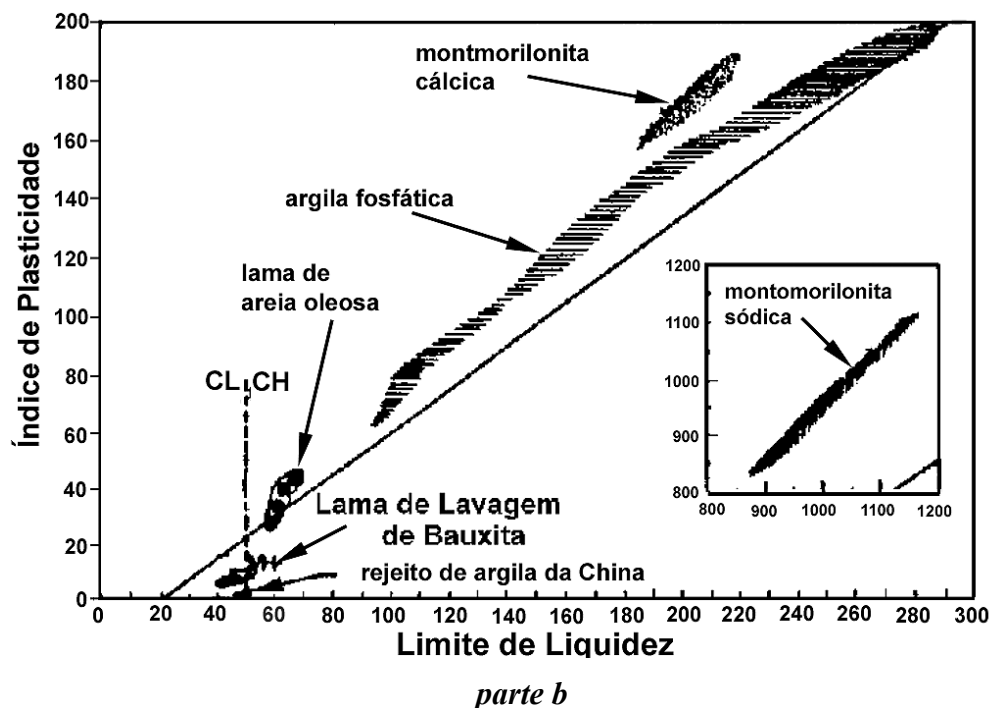
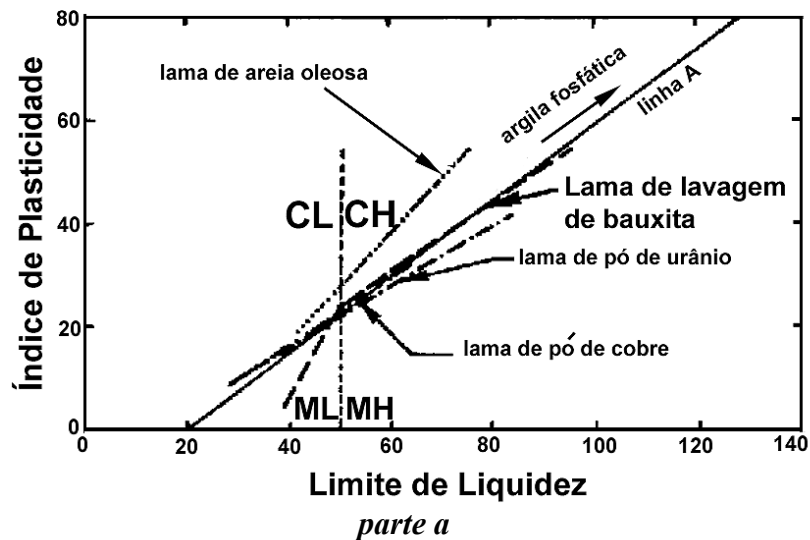
### 3.9

#### Limites de Consistência.

Como poderá ser percebido pelos dados que serão apresentados ao longo desta seção, os resíduos de bauxita, tanto de lavagem quanto de processamento, apresentam de uma maneira geral, índices de plasticidade não muito elevados. E mesmo assim, podem ter característica de resíduo argiloso, com baixas taxas de sedimentação, se comparados com solos naturais (Li & Rutherford, 1996). Porém, cabe ressaltar que há muitas críticas sobre os métodos usais de determinação destes limites de consistência (por exemplo, Sridharan & Prakash, 1998), que são considerados por muitos como totalmente arbitrários e não refletiriam o comportamento real do solo.

A Figura 3.70, partes a e b, representam gráficos de plasticidade comparando diversos resíduos de mineração e processamento, entre eles, a lama de lavagem. Segundo Lotze (1982), os valores de Limites de Atterberg médios para lamas vermelhas européias estariam dentro da faixa de valores apresentados pela Tabela 3.37. De acordo com Carrier III et al. (1983), o índice de plasticidade

de lamas vermelhas em geral variariam em torno de 7 a 9, o que é considerado como muito baixo. Estes valores estão de acordo com os reportados por Somogyi & Gray (1977), para lamas vermelhas do Alabama e do Texas, nos Estados Unidos. O teor de fração areia nos limites de consistência do resíduo do Alabama foi verificado de ter uma influência linear e idêntica no LL e LP.



**FIGURA 3.70:** Gráfico de Plasticidade de Casagrande: Comparação Entre Diferentes Rejeitos e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1985*)



Alguns valores obtidos em laboratório para a lama de lavagem de bauxita, a lama vermelha SL e a lama vermelha OP neutralizada estão apresentados na Tabela 3.38. O método de ensaio utilizado para todos os ensaios foi o recomendado pela Norma Brasileira. No caso da lama vermelha OP neutralizada, material estudado por Alves (1992), foi observado que, sem fazer a secagem prévia da amostra, tem-se um maior índice de plasticidade, caindo o material na classificação MH na carta de plasticidade de Casagrande. Porém, ao se ensaiar as amostras previamente secas, um menor índice de plasticidade é medido, caindo sua classificação no grupo ML. Esta influência da secagem foi verificada de ser mais sentida nos valores do limite de liquidez do que nos do limite de plasticidade, o que mostraria que o material não se re-hidrata e, portanto, não atingiria o mesmo valor de limite de liquidez. O tipo de secagem realizado, se ao ar ou em estufa, não influenciou nos resultados dos limites medidos (Alves, 1992).

**TABELA 3.37:** Valores Médios de Limites de Consistência de Algumas Lamas Vermelhas (adaptado de Lotze, 1982, Somogyi e Gray, 1977)

ORIGEM DA LAMA VERMELHA		LIMITE DE LIQUIDEZ	LIMITE DE PLASTICIDADE	LIMITE DE CONTRAÇÃO
Serra Leoa; Europa oriental, Austrália – média. (Somogyi & Gray, 1977)		42	28	-
européia (Lotze, 1982)		37 ± 5	27 ± 5	22 ± 1,5
Estados Unidos (Somogyi & Gray, 1977)	Alabama	46 a 41	39 a 37	-
	Texas	46 a 44	37 a 35	-

Outros valores de limites de consistência foram obtidos, utilizando tanto o método convencional (com adição de água destilada), como recomendado pela ABNT, quanto com adição do soro correspondente a cada material. Também foram executados ensaios seguindo uma trajetória de secagem, ao invés de só a de umidificação, como é usual. Foram estudadas tanto a fração que passa na #200 quanto a que passa na #40. Esta última faixa de tamanho, em geral, correspondia aproximadamente à fração que constituía 90% de todos os resíduos. Os valores encontrados estão resumidos na Tabela 3.39.

Pela análise destes dados, pode ser verificado que no caso da lama de lavagem, é muito grande a diferença de plasticidade das duas frações (passante na #40 e passante na #200), sendo a fração fina não plástica. Isto poderia ser uma indicação de que os minerais argílicos estariam associados aos grãos maiores, conferindo uma plasticidade muito maior à fração que passa na #40. Quanto aos valores medidos quando se seguiu uma trajetória de secagem, percebe-se pouca diferença nos limites, o que mostraria uma boa capacidade de rehidratação do material. Comparando estes resultados com os da Tabela 3.38, pode ser observado que o índice de plasticidade é bem semelhante, mas os limite de liquidez e de plasticidade, bem inferiores nos ensaios mostrados na Tabela 3.39, provavelmente consequência de uso de amostras diferentes.

**TABELA 3.38:** Valores Médios de Limites de Atterberg Para Alguns Resíduos de Bauxita Pesquisados (*adaptado de Mello, 1985, Alves, 1992, Rodrigues e Moura, 1992, De Campos e outros, 1994 e Santos, 2000*).

MATERIAL	LL	LP	IP	
LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA	62	33	29	
	51	25	26	✓
LAMA VERMELHA SL	43	30	13	
	41	30	11	*
LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA	44	32	12	✘
	60	36	24	✚
	45	31	14	⊛
	48	31	17	*

✓ - valores obtidos por Mello (1985)

\* - valores de Rodrigues e Moura (1992)

✘ - valores de De Campos e outros (1994)

\* - valores de Santos (2000)

✚ - sem secagem ao ar (Alves, 1992)

⊛ - seco ao ar (Alves, 1992)

**OBS:** a lama vermelha OP neutralizada não apresentou fração argila sem o uso de defloculante na preparação da amostra nos ensaios realizados por Alves (1992).

**TABELA 3.39:** Limites de Consistência dos Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita Analisados.

MATERIAL ANALISADO		<#200			<#40			<#40 – por secagem		
		LL	LP	IP	LL	LP	IP	LL	LP	IP
lama de lavagem	ÁGUA	49.4	47.6	1.8	48.1	23.8	24.3	53.8	25	28.8
lama vermelha SL	SORO	42.8	16.1	26.7	40.8	20.1	20.7	-	-	-
	ÁGUA	-	-	-	43	30	13	-	-	-
lama vermelha OP neutralizada	SORO	35.8	28.6	7.2	33.4	27	6.3	48.8	34	14.8
	ÁGUA	38.5	27.1	11.4	41.4	32.7	8.7	-	-	-
lama vermelha OP não neutralizada	SORO	36.5	28.2	8.4	33.9	26.8	7	63.6	29.3	34.3
	ÁGUA	41.2	27.4	13.8	33.5	27.2	6.3	-	-	-

Para a lama vermelha SL, que é o produto direto do beneficiamento da lama de lavagem, pode ser visto que, aparentemente, o processamento feito através do Sistema Bayer mudou sensivelmente o comportamento da fração que passa na #200, já que ela apresenta, agora, uma plasticidade muito maior que a apresentada no caso no resíduo não beneficiado (lama de lavagem). Esta mudança de comportamento, porém, pode ser parcialmente devido à diferenças entre os materiais analisados quanto à sua origem, já que não se pode esquecer a variabilidade das propriedades da bauxita mesmo dentro de uma mesma jazida, mas tudo indica que esta alteração é devida à presença do soro cáustico. Este fluido (pH14) também conferiu plasticidade à fração que passa na #40 da lama vermelha SL, alterando o seu LP, como pode ser visto pela análise dos valores obtidos usando soro e água, permanecendo próximo o valor do limite de liquidez. Isto fez com que a classificação no gráfico de plasticidade de Casagrande passasse de ML para CL, na fronteira. Pelas curvas granulométricas desta lama, no caso de sedimentação em soro foi visto que não houve uma parcela muito grande de grãos tamanho argila (em torno de 15%), o que indicaria ser a mudança da plasticidade realmente uma ação deste fluido. Interessante notar que esta atuação se confirma quando for comparado os valores dos limites das amostras constituídas por grãos passando na #40. Pode ser percebida uma redução no índice de plasticidade da lama vermelha SL em relação à lama de lavagem, para os ensaios realizados em água, indicando uma redução do teor de argilo-minerais. Mas quando se usa o

soro, os valores do índice de plasticidade dos dois resíduos voltam a ficar semelhantes entre si.

No caso da lama vermelha OP neutralizada, é observado que nos ensaios feitos com água, a fração passante na #200, comparada com a passante na #40, é mais plástica. O mesmo pode ser notado se a comparação é feita com os resultados obtidos para os ensaios feitos só com soro neutralizado, apesar de ser pequena a diferença no IP. Porém para este resíduo, o soro neutralizado, se comparado com os resultados dos ensaios executados em água, diminui a plasticidade do rejeito, ao contrário do efeito produzido pelo soro cáustico na lama vermelha SL. Nos resultados conseguidos com o ensaio seguindo trajetória de secagem e usando soro neutralizado, a lama vermelha OP neutralizada se apresenta mais plástica (maior LL, e conseqüentemente, maior IP). Assim, pode ser deduzido que esta lama não tem capacidade de se rehidratar, uma vez que o ensaio seguindo trajetória de umidecimento forneceu valores de LL e IP bem menores. Comparando os resultados da Tabela 3.38 com os da Tabela 3.39, nota-se uma grande diferença em relação aos resultados apresentados por Alves (1992). O mais provável que isto seja em decorrência da diferença entre as amostras. Os ensaios deste trabalho foram executados com lama entregue ao laboratório da PUC-Rio em 1995 e os de Alves (1992), em amostras de 1988.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, o comportamento nos ensaios seguindo trajetória de umidecimento, tanto com soro cáustico ou água, forneceram resultados semelhantes aos da lama vermelha OP neutralizada. Porém, no caso da mostra integral ou composta pela fração que passa na #40, o IP da lama vermelha OP não neutralizada foi ligeiramente superior para os ensaios em soro cáustico se comparados com os resultados obtidos usando água, mostrando o mesmo efeito apresentado na lama vermelha SL. Assim, fica confirmado que o soro cáustico tende a aumentar a plasticidade da lama. Uma grande diferença, contudo, está no valores obtidos quando se segue uma trajetória de secagem. Fica bem evidente a pouca capacidade de rehidratação deste resíduo em relação ao LL. O LP foi pouco alterado, mas o índice de plasticidade aumentou em quase cinco vezes, fazendo a classificação do resíduo pular de ML para CH no gráfico de plasticidade de Casagrande. Estes resultados também sugerem que o processo de ressecamento

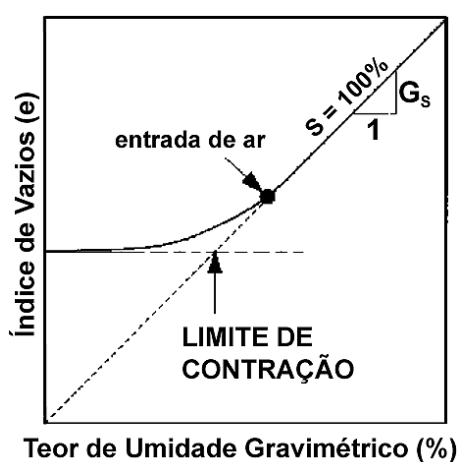
promove alterações significativas no comportamento dos resíduos em relação à sua plasticidade, que não é mais recuperado após sua rehidratação.

Com relação ao limite de contração, foram realizados ensaios em soro e água nos resíduos lama vermelha OP neutralizada e cáustica, seguindo as metodologias indicadas pela ASTM D427 e pela ABNT NBR 7183, com amostras integrais. Existem outras metodologias, como por exemplo a proposta por Sibley & Williams (1993) e o uso de curvas de secagem, como será descrito mais adiante. A técnica utilizada consiste na comparação do volume antes e pós secagem de uma pequena amostra. A medição do volume do solo seco é associada à massa de mercúrio deslocado quando se imerge a amostra retirada da estufa dentro de um recipiente cheio deste metal líquido. Os resultados obtidos em todos os casos da lama neutralizada foram valores variando entre 30 e 35, bem próximo ao limite de plasticidade. Para a lama cáustica, um valor de 18, dentro da faixa indicada por Lotze (1982), foi obtido em uma única medição, mas não mais repetido, ficando todos os outros ensaios entre 34 e 39, ou seja, algumas vezes acima do limite de plasticidade obtido pela trajetória de secagem em amostras também integrais, o que levou estes valores serem considerados suspeitos. Os índices de contração (relação massa de solo seco por volume de solo seco) foram calculados de variar entre 1,5 e 1,6.

Em outros ensaios realizados usando o mesmo procedimento em resíduos de minério de ferro, que constitui uma importante fração do resíduo aqui estudado, também se verificou o mesmo padrão de comportamento, ou seja, o limite de contração medido forneceu valores algumas vezes maiores ou bem próximos aos do limite de plasticidade do resíduo, obtido de maneira convencional, e, em muitos casos, até mesmo superior ao limite de liquidez, algo totalmente incoerente. Uma das prováveis causas para justificar a medição destes valores pode ser o fato da técnica do ensaio trabalhar com massas baseadas em um volume muito pequeno de amostra, sendo que o material é constituído de grãos de densidade muito elevada.

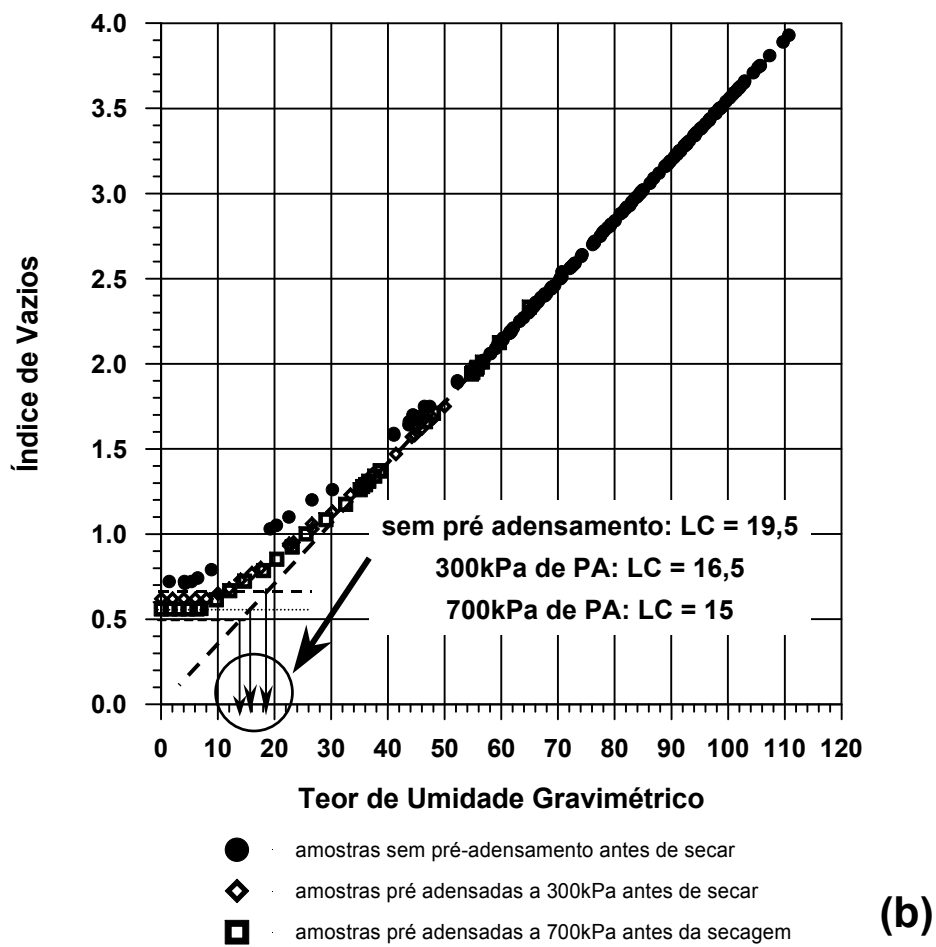
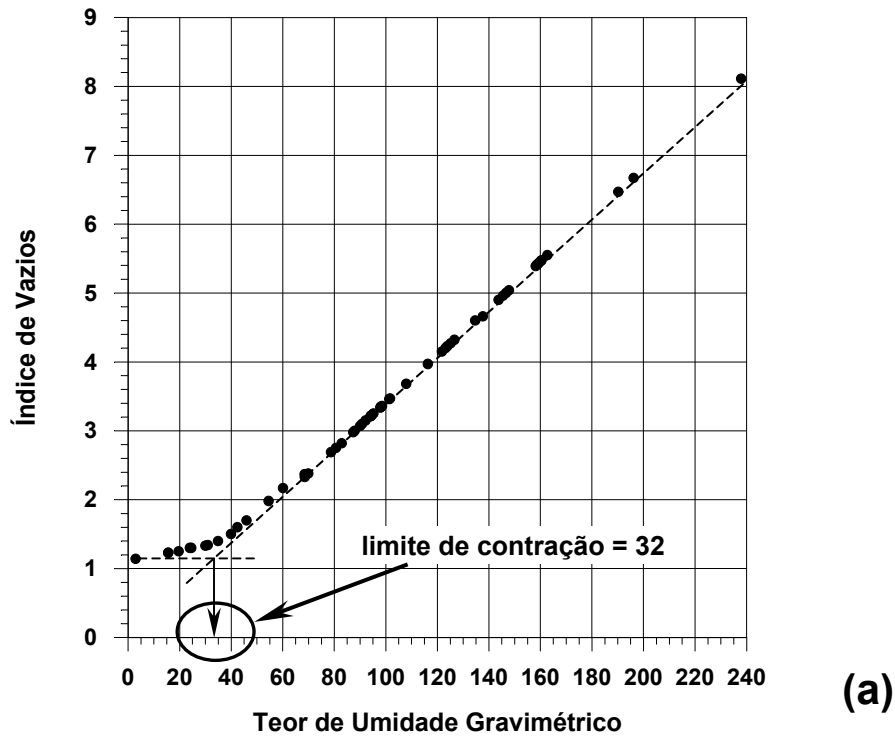
Durante os ensaios de ressecamento realizados e que serão apresentados em um outro capítulo, foram obtidas de curvas de secagem para alguns dos resíduos aqui analisados. Nestas curvas, procurou-se verificar como as propriedades do

solo mudavam à medida que ia perdendo umidade devido a evaporação. Aquela que relaciona o índice de vazios com o teor de umidade gravimétrico pode ser usada para se obter o valor do limite de contração, e é conhecida como curva de contração (Marinho, 1994 e Fredlund et al., 2002). A forma como se obtém o limite de contração destes dados é exemplificada pela Figura 3.71. Pela BS 1377, citada por Marinho (1994), o limite de contração seria a interseção do trecho linear AB (chamado de trecho de contração normal, ao longo do qual as partículas se contrairiam sem interferência do atrito interno) e a linha horizontal passando pelo ponto de índice de vazios mínimo.

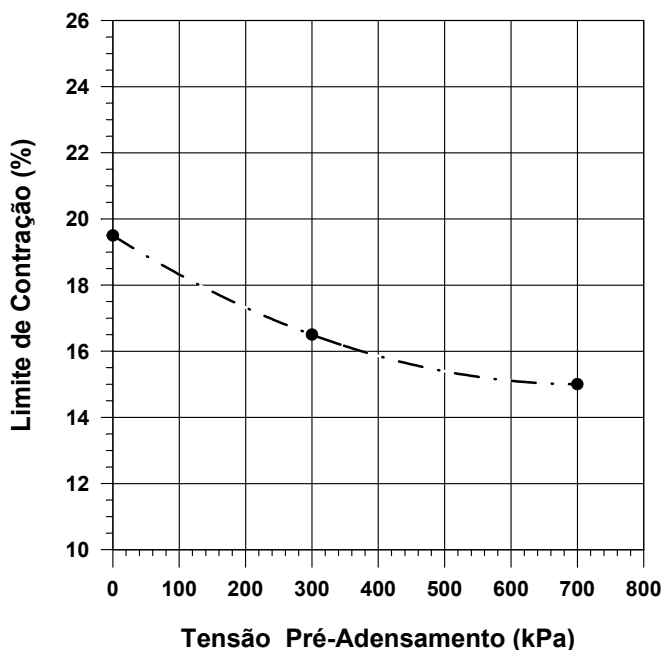


**FIGURA 3.71:** Definição do Limite de Contração à Partir de Curvas de Secagem  
(adaptado de Fredlund et al., 2002)

As curvas de secagem obtidas para as lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada foram então usadas para checar os valores medidos pela técnica sugerida pela ASTM e pela ABNT. A curva de contração para as lamas vermelhas OP neutralizada está representada na Figura 3.72(a). Para a lama vermelha OP cáustica, foram obtidas relações índice de vazios contra o teor de umidade gravimétrico para três tipos diferentes de amostras: uma seca ao ar à partir de adensamento por peso próprio; a segunda, seca após pré adensamento de 300kPa e a última, após um pré adensamento de 700kPa. Os resultados estão na Figura 3.72(b). A Figura 3.73 mostra a variação do limite de contração definido de acordo com a BS 1377 contra a tensão de pré adensamento. Para ambos os casos, o fluido de preenchimento dos vazios era o seu soro correspondente (neutralizado e cáustico).



**FIGURA 3.72:** Curvas de Secagem para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada: (a) Lama Neutralizada e (b) Lama Não Neutralizada.



**FIGURA 3.73:** Variação do Limite de Contração para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Função da Tensão de Pré – Adensamento.

O que se pode observar das curvas de secagem, é que, sem pré adensamento, o índice de vazios mínimo para as lamas vermelhas OP neutralizada e cáustica ocorreram em teores de umidade gravimétrico muito próximos, ficando em torno de 7,5. Porém, o limite de contração das duas variaram muito entre si, indicando uma influência direta do tipo de fluido no comportamento final do resíduo. O da lama neutralizada ficou próximo ao valor fornecido pela técnica sugerida pela ASTM e ABNT, (32 e 32,5 respectivamente, sendo este último uma média dos valores obtidos pela técnica da ASTM). Já o da lama cáustica foi bem diferente entre as duas técnicas, sendo encontrado 19,5 pela curva de secagem e 36,5 pela média de leituras que apresentaram repetibilidade usando a técnica sugerida pela ASTM e ABNT, o que sugere que talvez ela não seja adequada este material. A lama cáustica se mostrou bem mais suscetível a contração, tendo atingido um índice de vazios mínimo de aproximadamente 0,7, enquanto que para a lama neutralizada, este valor foi de 1,2. Ou seja, além de apresentar uma tendência de sedimentar mais rapidamente, a lama cáustica apresenta um comportamento mais favorável para exposição ao ressecamento que a neutralizada. Esta diferença entre as duas lamas deve estar ligada à interação do fluido com partículas muito pequenas, que no caso destes resíduos foram



verificadas de apresentar a tendência de se flocularem ou se aderirem à partículas maiores, ficando retida na peneira 200.

O aumento da tensão de pré-adensamento provocou uma diminuição quase linear no limite de contração na faixa de valores analisada. Foi verificado que uma reta interpolada por estes três pontos apresentaria um coeficiente de regressão acima de 0,92.

### 3.10

#### Densidades e Pesos Específicos.

A densidade da polpa durante o lançamento no local de armazenagem é uma função do meio de transporte empregado. Como na maioria das vezes é bombeada, isto exige com que os resíduos tenham um teor de sólidos em torno de 10 a 30% (em peso), equivalente a  $\sim 10.4 \text{ kN/m}^3$ . Uma vez a lama sendo lançada nos reservatórios de contenção, o "solo" formado pelos processos de sedimentação e adensamento tem seu peso específico variando com a profundidade como os naturais. Desta maneira, é mais indicado que estes valores de peso específicos sejam obtidos no campo através de retirada de amostras, como descrito em outro capítulo mais adiante.

A densidade dos grãos deve ser tomada como característica apenas para uma determinada região do lago, devido aos efeitos de segregação das partículas, como já discutido anteriormente. É um valor altamente dependente da mineralogia da rocha de origem, principalmente do teor de ferro existente. Alguns valores encontrados na literatura ficaram entre 2,7 e 3,0 (*Bulkai, 1983; Vick, 1983; Green et al., 1992*).

Li & Rutherford (1996) encontraram valores de densidade relativa variando de 2,70 a 2,87 para bauxitas brasileiras, da região sudeste, sendo os valores justificados pela presença elevada de gibbissita e aos baixos teores de minério de ferro. As lamas vermelhas oriundas destas bauxitas apresentaram densidade variando de 3,66 a 3,99, tendo sido as diferenças devido ao teor de hematita e

goetita, bem como a outros produtos derivados do processo Bayer. Somogyi & Gray (1977) encontraram densidades variando de 2,84 a 3,16 para a lama vermelha do Alabama, e 3,27 para a lama do Texas.

Em média, encontrou-se para alguns dos materiais analisados, em amostras ditas integrais e por meio de ensaios convencionais para a determinação da densidade, os valores apresentados na Tabela 3.40. O elevado valor encontrado para a lama vermelha OP neutralizada se deve ao fato de que seus grãos são predominantemente constituídos por minério de ferro.

**TABELA 3.40:** Valores Médios de Densidades dos Grãos dos Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita Analisados.

LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA	LAMA VERMELHA SL	LAMA VERMELHA PC	LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA
2,9.	3,1	2,95	3,5
	3,0 a 3,7 (*)		3,47 (✖)
			3,4 a 3,8 (no lago) (*) 3,42 (no lançamento)

(\*) - valores de Rodrigues & Moura, 1992

(✖) - valor de De Campos et al., 1994

(\*) - valores de Santos, 2000

Também se procurou analisar o efeito do fluido na determinação da densidade dos grãos. Para isso, ela foi medida tanto na maneira tradicional (picnômetro com água destilada) como utilizando-se do soro característico de cada lama. Além disto, foi feita a determinação para amostra integral e para as parcelas retidas em diferentes peneiras, com o intuito de verificar a influência da granulometria no resultado do ensaio. Os valores encontrados estão resumidos na Tabela 3.41.

Analisando os valores da Tabela 3.41, pode ser percebido que todos os ensaios feitos com soro deram resultados menores ou no máximo, muito ligeiramente superior para um único caso, que os executados em água, independente da faixa granulométrica e da origem do resíduo, se o soro era neutralizado ou cáustico. Para a amostra integral de lama vermelha OP neutralizada, era de se esperar que esta diferença não acontecesse, já que as curvas

granulométricas indicaram que o soro neutralizado não influenciou o seu comportamento, apresentando resultados quase idênticos, independente do tipo de fluido e do uso de defloculante ou não (ver a Figura 3.50). Para este mesmo resíduo, no caso da fração menor que a #200, foi verificado que as curvas granulométricas obtidas de ensaios realizados em soro com defloculante (que é a situação que acontece da determinação da densidade dos grãos) apresentaram maiores partículas, indicando uma menor atuação do defloculante neste meio (Figura 3.51). Porém, o resultado de densidade para esta faixa granulométrica deste rejeito também foi maior para os testes em água do que em soro.

**TABELA 3.41:** Densidade dos Grãos dos Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita Analisados.

MATERIAL ANALISADO		MATERIAL RETIDO #60	MATERIAL RETIDO #100	MATERIAL RETIDO #200	MATERIAL PASSANTE #200	AMOSTRA INTEGRAL
LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA	ÁGUA	3.66	3.65	3.65	3.57	3.68
	SORO	3.49	3.51	3.49	3.54	3.39
LAMA VERMELHA OP NÃO NEUTRALIZADA	ÁGUA	3.56	3.58	3.59	3.62	3.59
	SORO	3.53	3.54	3.60	3.54	3.55
LAMA DE LAVAGEM DE BAUXITA	ÁGUA	2.96	2.96	2.92	2.92	2.96
	SORO	-	-	-	-	-
LAMA VERMELHA SL	ÁGUA	-	-	-	-	3.16
	SORO	-	-	-	-	2.86

Se os resultados das densidades obtidas para as diferentes faixas granulométricas para os testes realizados só em água da lama vermelha OP neutralizada forem comparados entre si, poderá ser notado que o valor apresentado para a faixa passante na #200 foi o menor de todos. Porém, no caso dos ensaios realizados usando o soro neutralizado, a situação foi exatamente a oposta, sendo a densidade destes grãos, a maior em relação à das outras faixas granulométricas. Isto pode mostrar que o soro neutralizado tem uma ação maior

neste tamanho de partículas, tendendo a aglutina-lo, confirmando as curvas granulométricas. Outra hipótese para o fato desta densidade ter sido menor quando realizado em água, pode ser uma maior concentração de grãos de goetita neste tamanho, mineral que reduz a densidade do minérios de ferro (*Li & Rutherford, 1996*), e o soro neutralizado ter agido mais neste tipo de material, aglutinando-o e fazendo com que a densidade medida em testes que o tinham como fluido, forneçam maiores valores.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, quase não há diferença de valores nem no tipo de fluido para as densidades medidas das diferentes faixas de fração granulométrica. Porém, os valores obtidos de ensaios que fizeram o uso de soro cáustico, forneceram valores ligeiramente inferiores se comparados com os obtidos em água, exceto para o material retido na #200. Pelas curvas granulométricas mostradas na Figura 3.52, no caso das amostras integrais poderia se esperar o contrário, já que foi verificado que em soro cáustico, há uma menor atuação do defloculante. Já para a fração que passa na #200, foi mostrado pela Figura 3.53 que o soro cáustico dispersa mais as partículas do resíduo, se comparado com a água. Portanto, para esta fração, também deve se ter mais goetita, que só foi defloculada no soro cáustico, e não na água, uma vez que a densidade obtida neste fluido para este tamanho de grãos foi o maior de todos.

Se forem comparados os valores de densidades medidos só em água entre a lama vermelha neutralizada e a não, os da primeira foram maiores em todas as faixas granulométricas, exceto, na fração que passa na #200. Considerando que a única diferença entre estes dois materiais é o fato de que ficaram estocadas antes do ensaio em fluidos diferentes, pode ser percebido então, uma aí, uma atuação direta do mesmo. A hipótese é que, durante o período de armazenagem em soro cáustico, a fração coloidal foi separada dos grãos maiores, o que não aconteceu com a amostra estocada em soro neutralizado. Já para os valores de densidade medidos em ensaios que usaram soro, verifica-se que foram maiores aqueles em soro cáustico que em soro neutralizado. Se de novo se tomar as curvas granulométricas como referência, pode ser recordado que no soro cáustico, é menor a atuação do defloculante.

No caso da lama de lavagem de bauxita, percebe-se uma distribuição homogênea das densidades nas diferentes faixas granulométricas, se mostrando, portanto, mais homogênea. Já para a lama vermelha SL, a densidade medida em soro cáustico também foi muito menor que aquela medida usando água durante o ensaio. A sua curva granulométrica, porém, havia mostrado que pouca influência houve com relação ao tipo de fluido, para a fração passante na #200, em termos da ação do defloculante. Portanto, essa diferença de valores obtidos em soro cáustico e água deve ser principalmente devido atuação do fluido nas grãos de maiores tamanhos.

Uma hipótese que deve ser investigada como fonte da diferença de valores entre as densidades de grãos obtidas se utilizando soro ou água está na técnica do ensaio. É comum se ferver o picnômetro durante um período para eliminação de ar na mistura sólidos mais fluido. Só que ao se aquecer o soro cáustico com os grãos, poder se estar favorecendo a formação de novas ligações químicas entre os minerais presentes. Esta técnica é, inclusive, utilizada em algumas plantas, sob condições bem controladas, é verdade, usada para se mudar a constituição química-mineralógica da lama vermelha, com o intuito de fazer com que apresente uma maior velocidade de sedimentação e facilitando o processo de separação do resíduo do produto útil (*Solymár et al., 1992*).

### 3.11

#### **Conclusões**

Ao longo deste capítulo, as principais propriedades e características dos resíduos de mineração e processamento de bauxita foram apresentadas e analisadas. Ênfase foi dada aos índices físicos obtidos de caracterização geotécnica convencional. Estes dados são reconhecidos como importantes de serem investigados, uma vez que muitos de seus comportamentos, tais como adensamento e permeabilidade, são muitas vezes extrapolados destes índices físicos. Portanto, procurou-se fazer uma investigação da técnica de ensaio utilizada, que em geral foi desenvolvida para solos comuns, que tem água como

fluido de poro, e a utilização do fluido no qual estes resíduos são lançados em reservatórios de disposição, numa tentativa de se aproximar mais o ensaio de laboratório da situação real de campo.

Com relação à análise químico mineralógica, o que se constatou é que os resíduos aqui estudado são constituídos em sua maior parte (mais de 60%) por três elementos básicos: o óxido de alumínio, o de ferro (hematita) e o de silício, em proporções diversas. O restante da constituição é bastante variada.

Na caracterização geotécnica, o que pôde ser percebido é que há grande diferença entre o comportamento dos resíduos em água e em fluido. Portanto, é de se esperar que as previsões de comportamento dos mesmos e, conseqüentemente, da vida útil do seu reservatório de disposição, poderão estar sujeita a grandes erros se forem baseadas em ensaios de caracterização realizados de acordo com a técnica desenvolvida para os solos convencionais. Outro grande fator de influência verificado nos resultados, foi a origem da jazida da rocha minerada ou processada, indicando que os índices físicos são parâmetros locais.

Dos dados obtidos para os diferentes materiais analisados, o de maior impacto prático foi a confirmação de que no caso das lamas vermelhas OP, o processo de neutralização tende a produzir um subproduto que tende a sedimentar mais lentamente. A conseqüência imediata é que os lagos de disposição tenderão a ter uma vida útil menor, se comparado com caso do resíduo ser lançado sem neutralizar. Isto já havia sido confirmado por outros pesquisadores, tais como Solymár et al. (1992). Foi detectado que na fração retida das lamas vermelhas OP neutralizada e cáustica, uma grande parcela de finos fica aglutinada (~30%) e é esta fração que promove a diferenciação mais acentuada no comportamento relacionado à sedimentação, devendo, portanto ser melhor estudada. A faixa granulométrica da lama neutralizada oscilou nas diferentes frações que constituem o resíduo, de 0 a 63% de areia; 49 a 37% de silte e 51 a 0% de fração tamanho argila. Já a lama cáustica, de 0 a 67% de areia, 78 a 37% de silte e 32 a 6% de fração tamanho argila.

Com relação aos limites de consistência, os valores considerados representativos e tomados como referência foram aqueles obtidos de amostras que seguiram a trajetória de secagem e usando o soro típico do rejeito ao invés de

água. Esta escolha foi feita por serem estas as condições dos ensaios de ressecamento e, portanto, mais apropriadas e representativas do comportamento dos resíduos para esta situação.

Foi verificado que há uma grande diferença nos valores dos índices físicos quando se varia o fluido de preenchimento dos poros e a trajetória do teor de umidade, se umedecimento ou secagem. Isto sugere que para estes materiais, estes parâmetros talvez deveriam ser obtidos sempre de acordo com a trajetória de comportamento à qual serão submetidos no campo. Para as densidades relativas dos grãos, também serão consideradas como representativas, aquelas determinadas usando o soro e amostra integral, por ser esta a situação mais próxima de campo. A Tabela 3.42 resume os valores adotados.

**TABELA 3.42:** Valores Adotados dos Limites de Consistência.

MATERIAL ANALISADO		LL	LP	IP	LC	Densidade Relativa dos Grãos
lama de lavagem	ÁGUA	54	25	29	-	2,96
lama vermelha SL	SORO	41	20	21	-	3,16
lama vermelha OP neutralizada	SORO	49	34	15	32	3,40
lama vermelha OP não neutralizada	SORO	63	29	34	19,5	3,55

Ainda com relação a estes valores de limites de consistência adotados, cabe ressaltar que várias amostras da lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada para realização de outros ensaios, como o de tração e medição de sucção, foram obtidas com teores de umidade acima destes valores de limite de liquidez registrados pelo aparelho de Casagrande, o que indica que este não deve ser um método adequado para a determinação de tal parâmetro deste tipo de material.

A Tabela 3.43 apresenta um resumo geral das características físicas e geotécnicas de resíduos de mineração e processamento de bauxita, reconhecidos como representativos destes materiais durante a década de 1980 (*Stinson, 1981*), que podem servir para uma comparação com os que foram aqui encontrados e adotados.

**TABELA 3.43:** Resumo das Principais Características de Algumas Lamas Vermelhas  
(adaptado de Stinson, 1981)

PAÍSES	JAMAICA	ÁFRICA	AUSTRÁLIA	BRASIL
<b>ANÁLISE QUÍMICA (%)</b>				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32	12	29	37
TiO <sub>2</sub>	5	13	2	4
SiO <sub>2</sub>	7	8	25	16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	39	27	21
Na <sub>2</sub> O	9	3	3	11
<b>ANÁLISE MINERALÓGICA</b>				
MAIOR QUANT.	Hematita, goetita	Bohemita, quartzo	Quartzo, hematita	Hematita
MENOR QUANT.	Bohemita	hematita		Goetita, anatásio
<b>DENSIDADES</b>				
	2,9 - 3,0	2,9 - 3,0	2,7 - 2,9	2,6 - 3,5
<b>ÁREA SUPERFICIAL (m<sup>2</sup>/gr)</b>				
	22	19	13 - 17	14
<b>LIMITES DE ATTERBERG</b>				
LL	87,1 ± 5,2	76,3 ± 1,8	41,3 ± 0,7	50 ± 10
LP	35,4 ± 2,0	45,2 ± 1,6	34,1 ± 1,1	30 ± 10
IP	51,7 ± 7,2	31,1 ± 3,4	7,2 ± 1,8	20 ± 10