

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/cm³, 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.

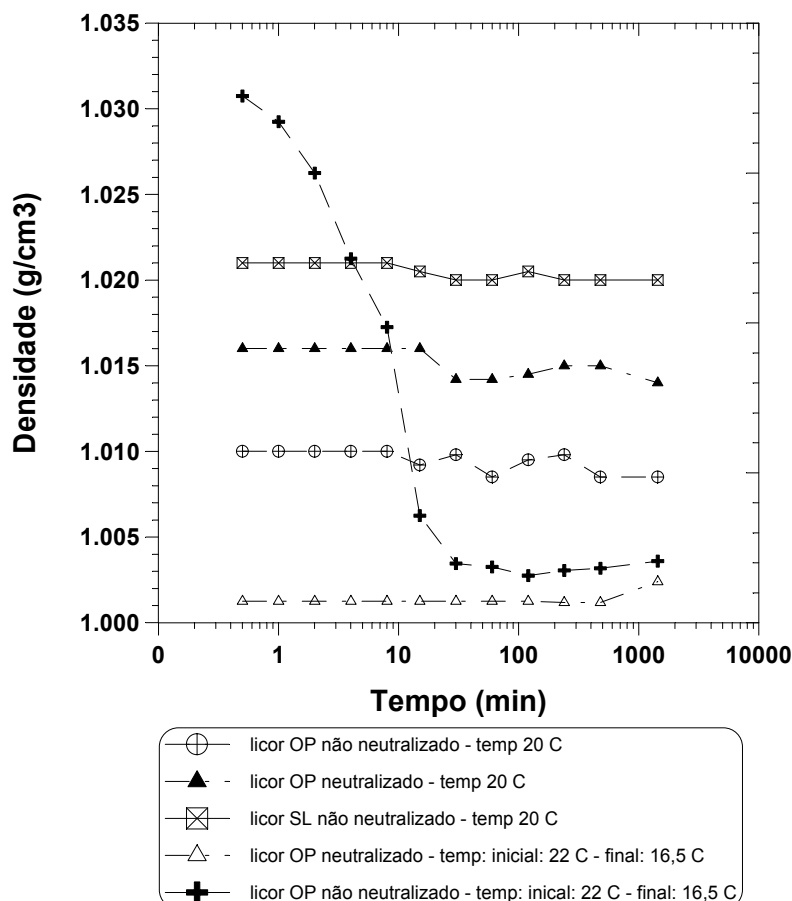


FIGURA 3.52: Variação com o Tempo da Densidade dos Soros Utilizados nos Ensaio de Sedimentação.

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.

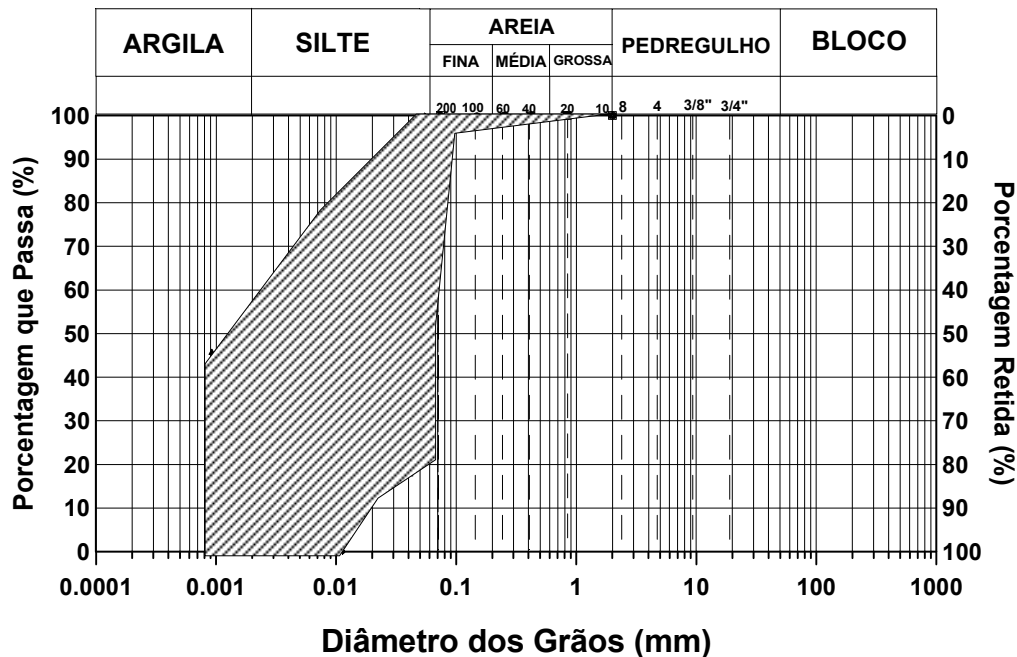


FIGURA 3.53: Faixa de Variação das Curvas Granulométricas Obtidas para a Lama Vermelha OP Neutralizada.

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.

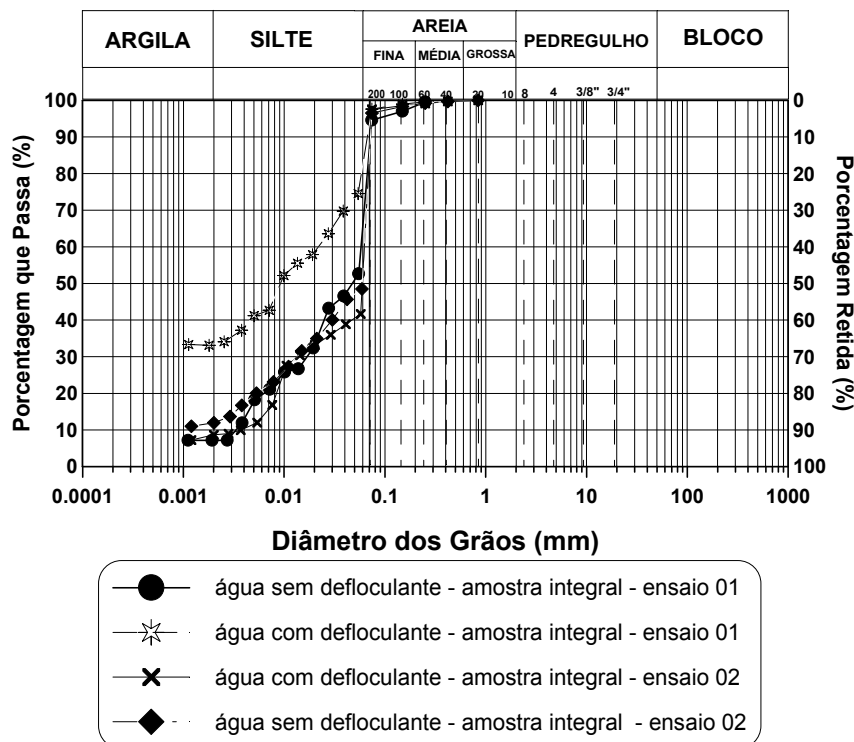


FIGURA 3.54: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaios em Água – Amostras Integrais.

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.

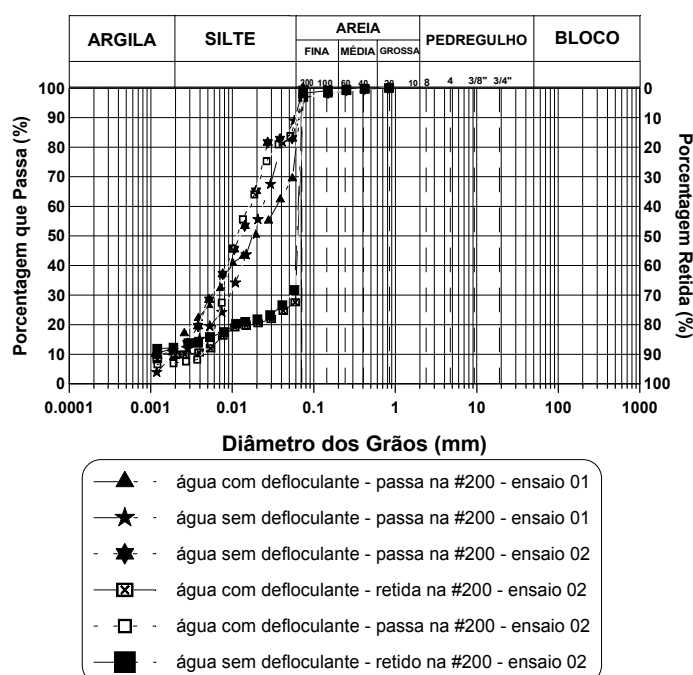


FIGURA 3.55: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaio em Água – Fração < #200 e > #200.

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.

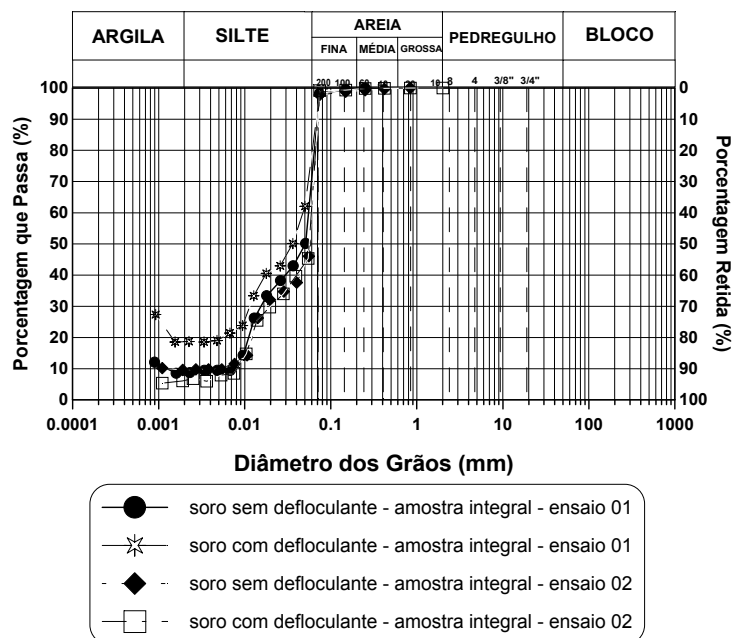


FIGURA 3.56: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaios em Soro Cáustico – Amostra Integral.

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.

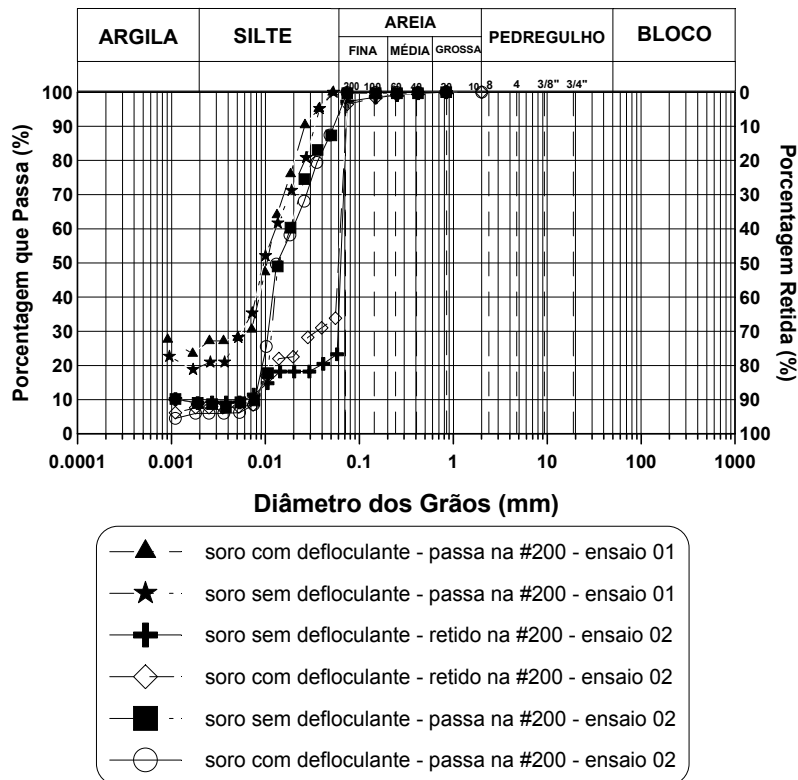


FIGURA 3.57: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada – Ensaio em Água – Fração <math>< \#200</math> e $> \#200$.

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

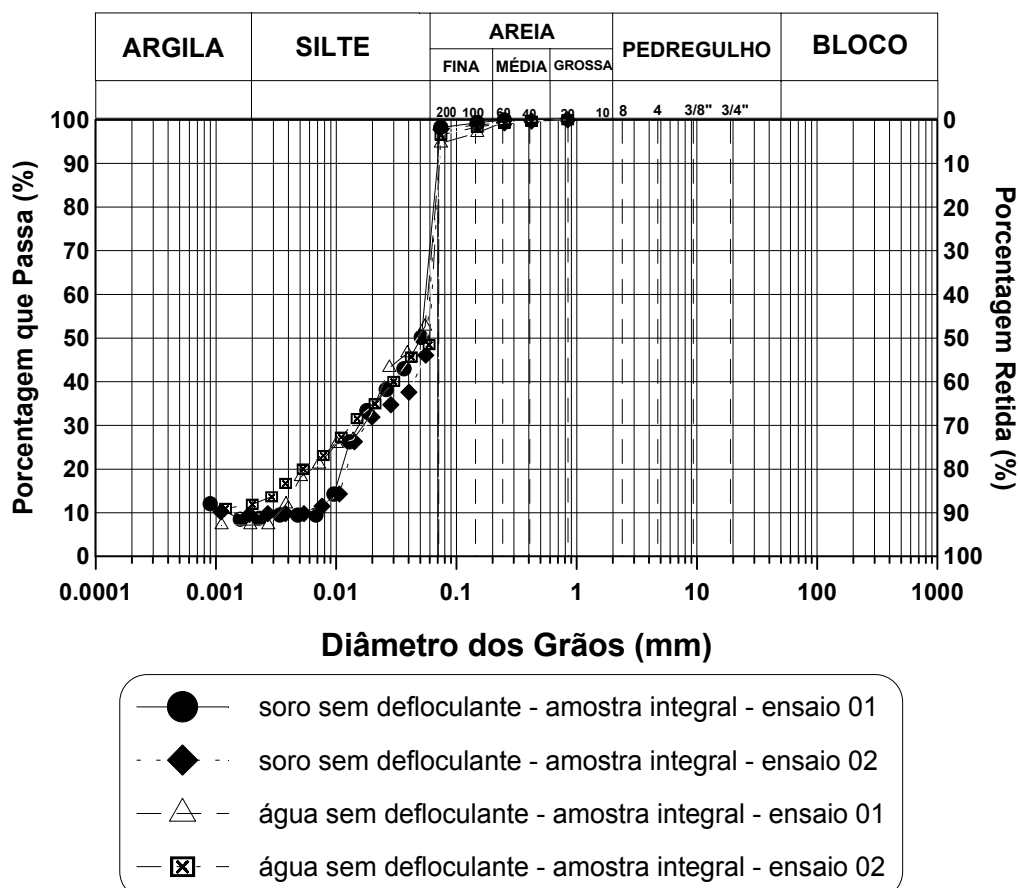


FIGURA 3.58: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Sem Defloculante – Amostra Integral.

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.

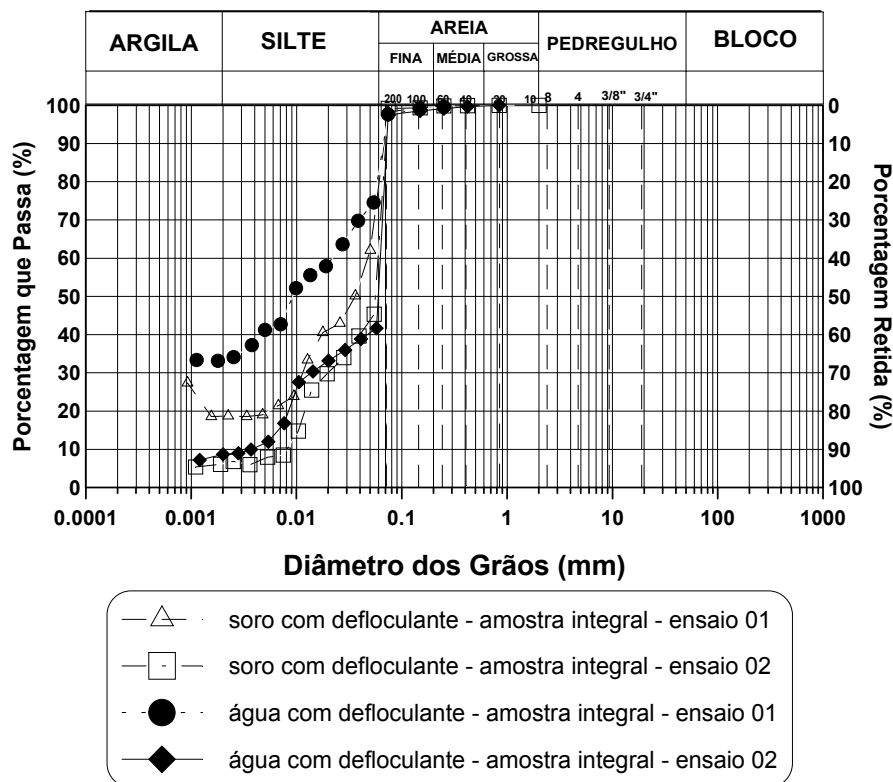


FIGURA 3.59: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Com Defloculante – Amostra Integral.

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.

ENSAIOS EM ÁGUA			
ENSAIO 01		ENSAIO 02	
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:
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
ENSAIOS EM SORO CÁUSTICO			
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

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.

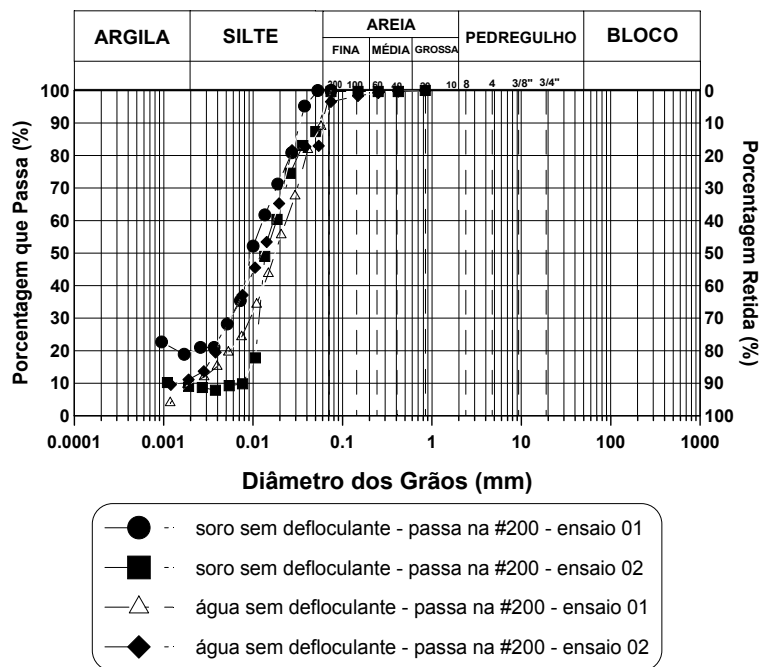


FIGURA 3.60: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Sem Defloculante – Fração <#200.

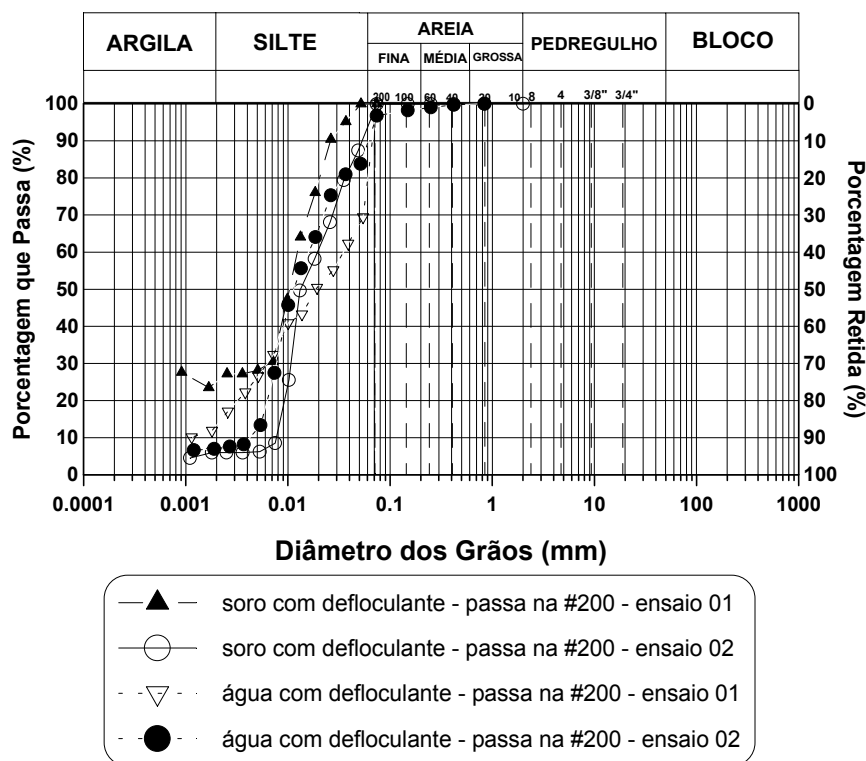


FIGURA 3.61: Comparação Entre Curvas Granulométricas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada –Soro Cáustico e Água Com Defloculante – Fração < #200.

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.

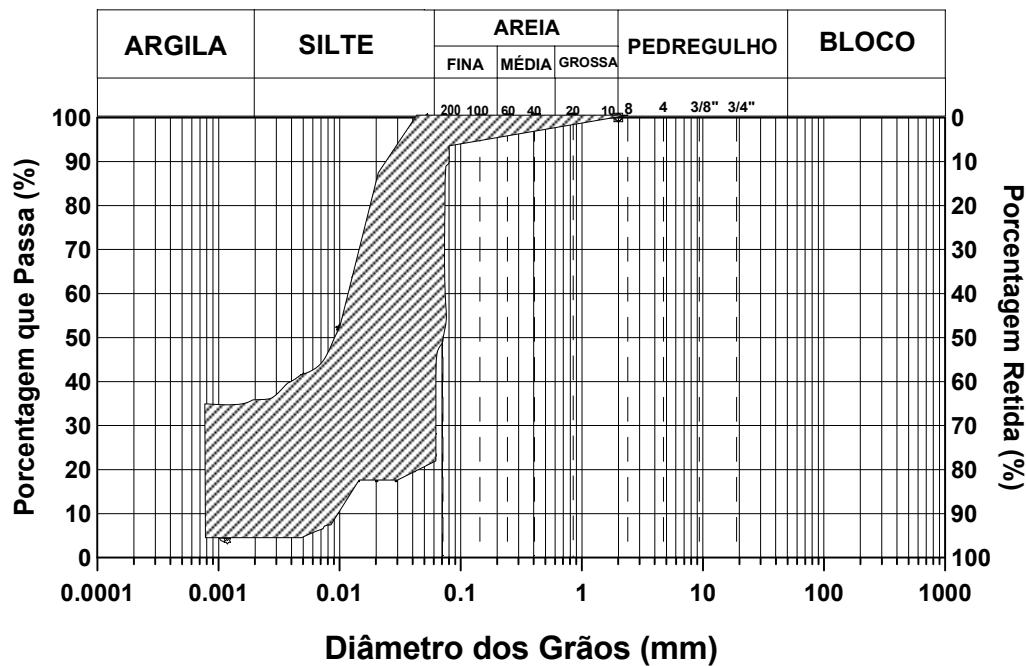


FIGURA 3.62: Faixa de Variação das Curvas Granulométricas Obtidas para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

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.

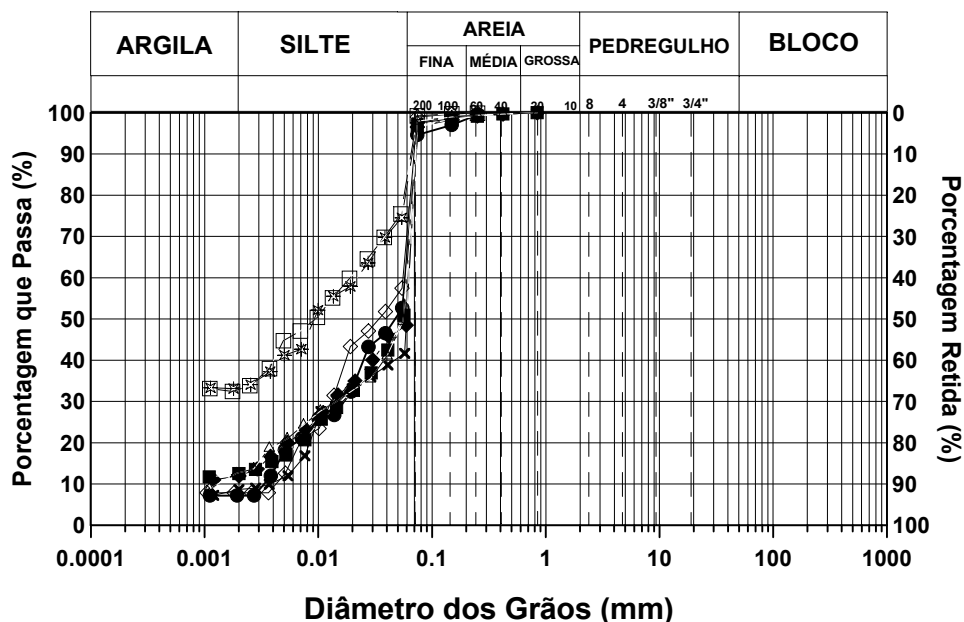


FIGURA 3.63: Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não Obtidas em Água – Amostras Integrais.

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.

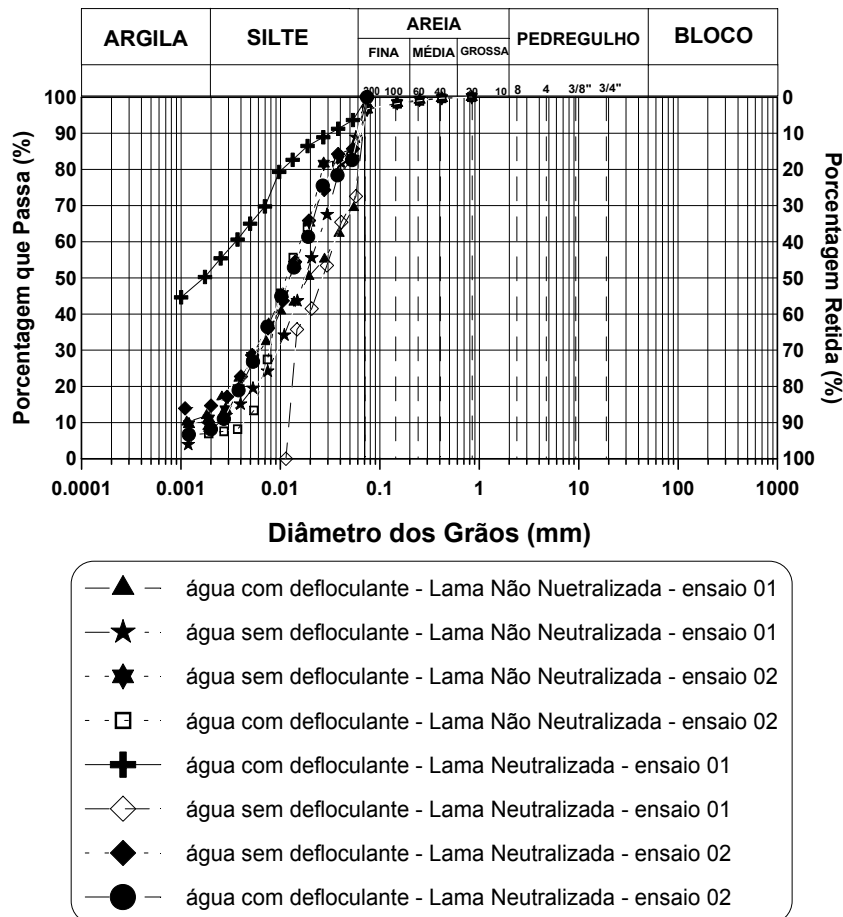


FIGURA 3.64: Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não, obtidas em Água - Fração < #200.

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.

ENSAIOS NA LAMA VERMELHA OP NÃO NEUTRALIZADA					
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
ENSAIOS EM LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA.					
ENSAIOS EM AMOSTRAS INTEGRAIS					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:	SEM DEFLOCULANTE:	COM DEFLOCULANTE:
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
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:
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.

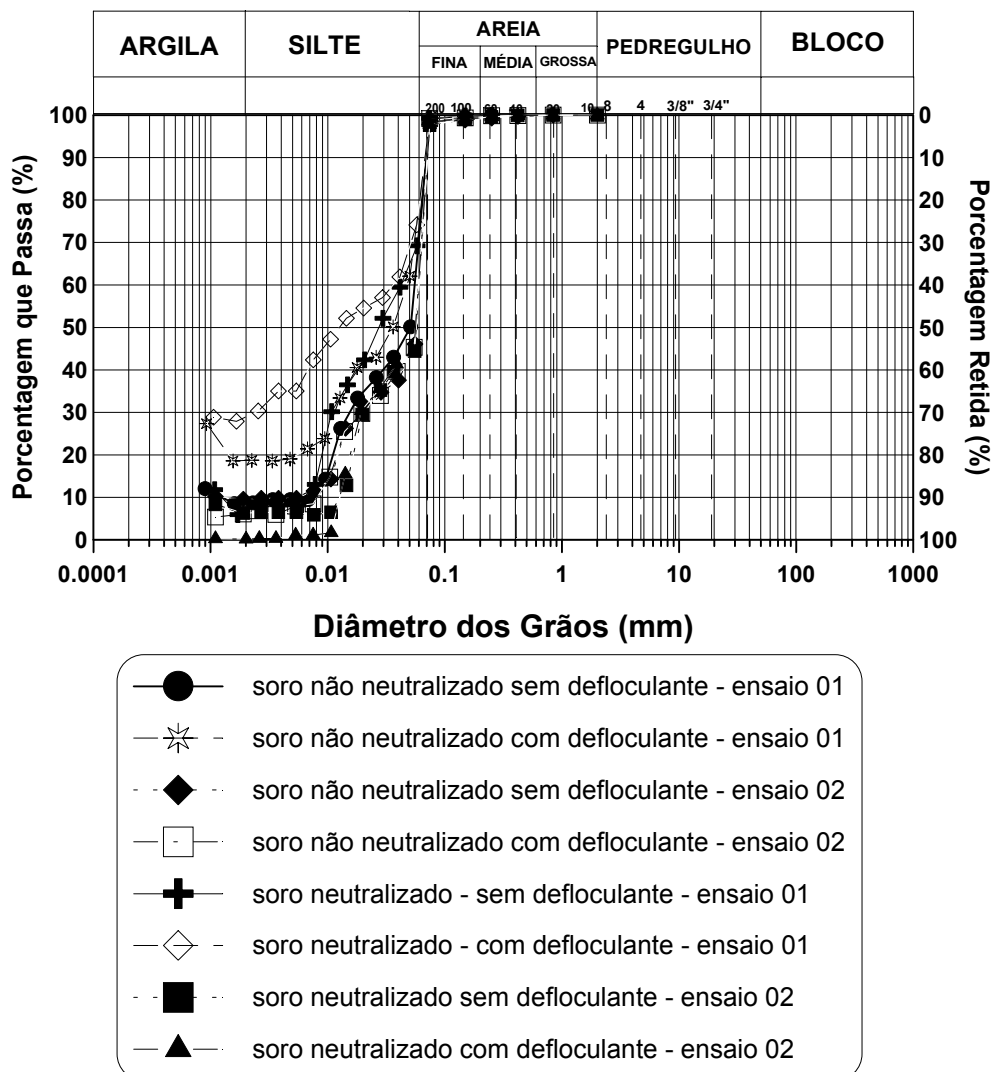


FIGURA 3.65: Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não Obtidas em Soro – Amostras Integrais.

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.

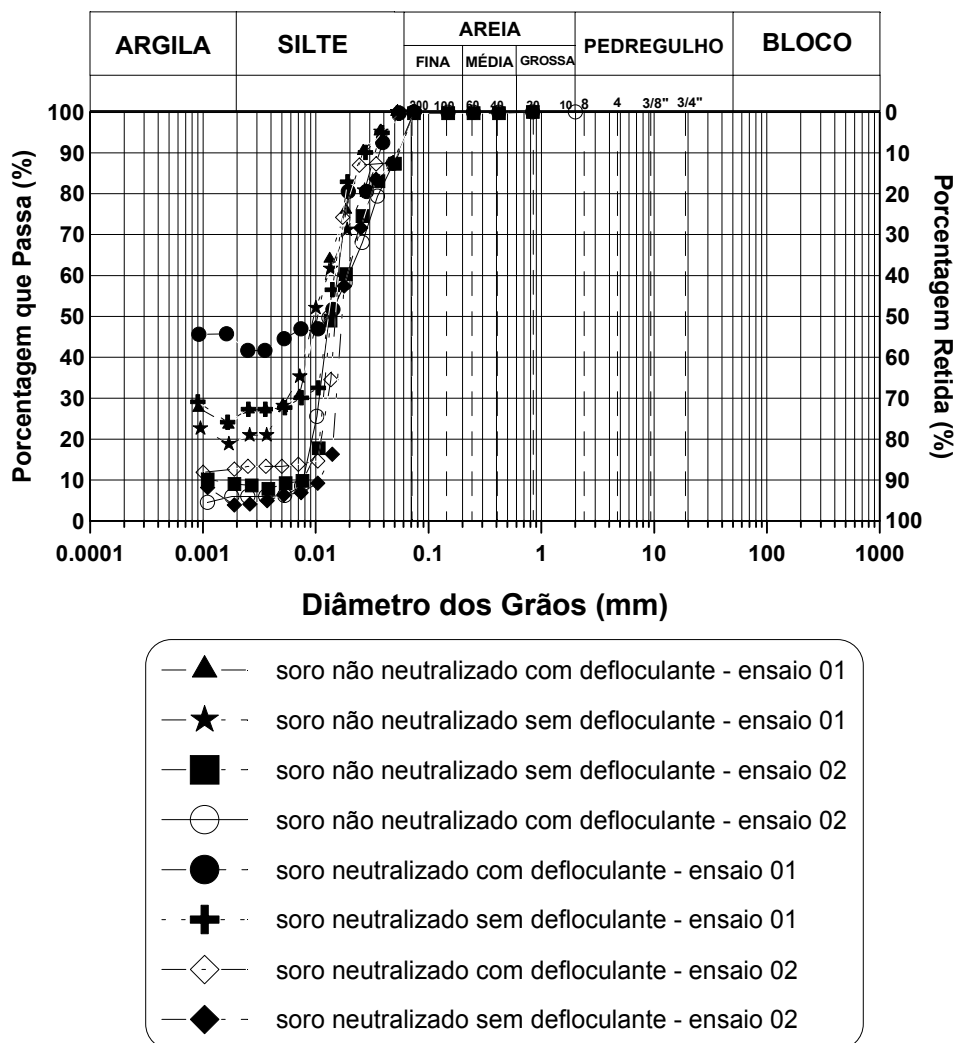


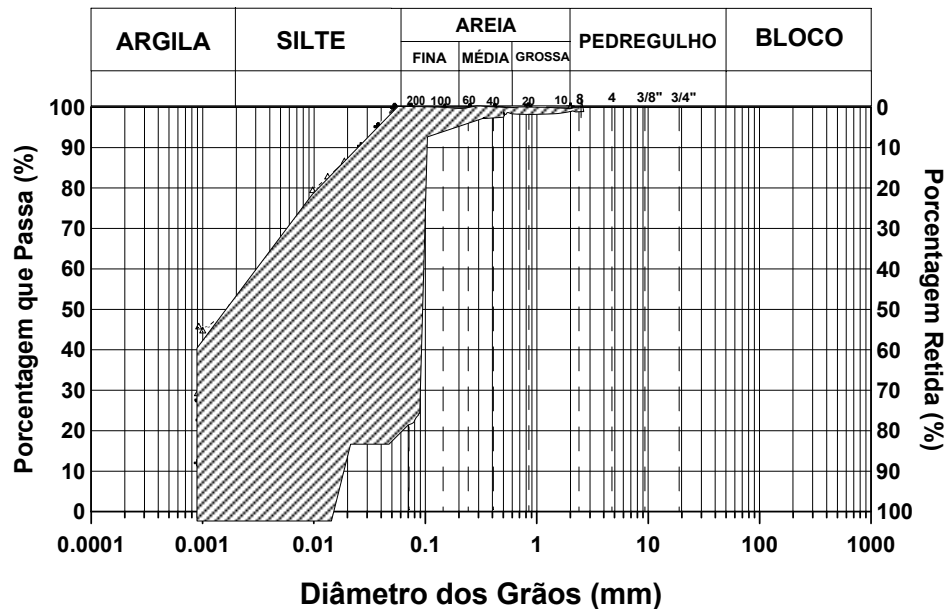
FIGURA 3.66: Comparação entre Curvas Granulométricas das Lamas Vermelhas OP Neutralizada e Não em Soro - Fração < #200

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

ENSAIOS EM SORO NEUTRALIZADO					
ENSAIO 01			ENSAIO 02		
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 DEFLOC.	COM DEFLOC.	SEM DEFLOC.	COM DEFLOC.	SEM DEFLOC.	COM DEFLOC.
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
ENSAIOS EM SORO CÁUSTICO					
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 defloc.	com defloc.	sem defloc.	com defloc.	sem defloc.	com defloc.
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.



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.

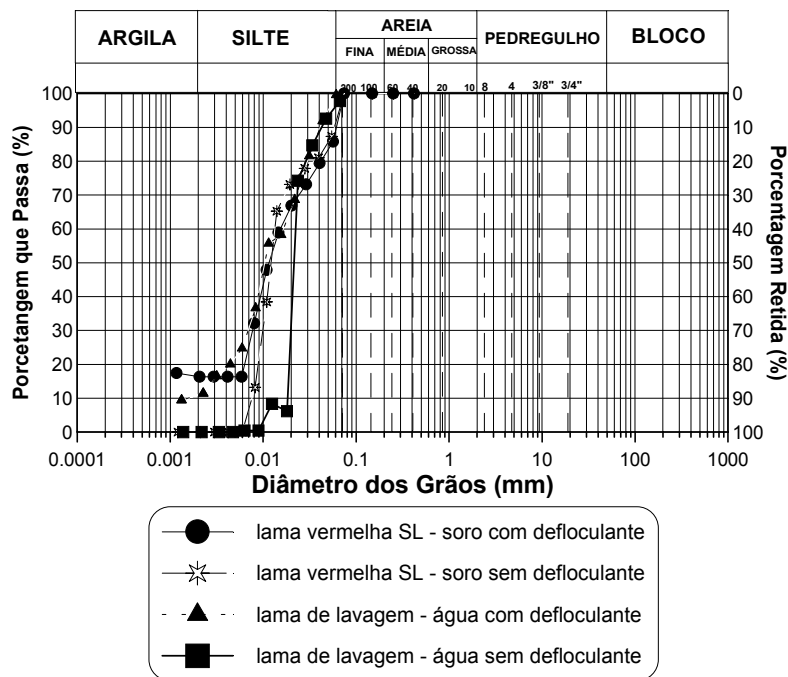


FIGURA 3.68: Comparação entre as Curvas Granulométricas da Lama Vermelha SL em Soro e a Lama de Lavagem de Bauxita em Água - Fração < #200

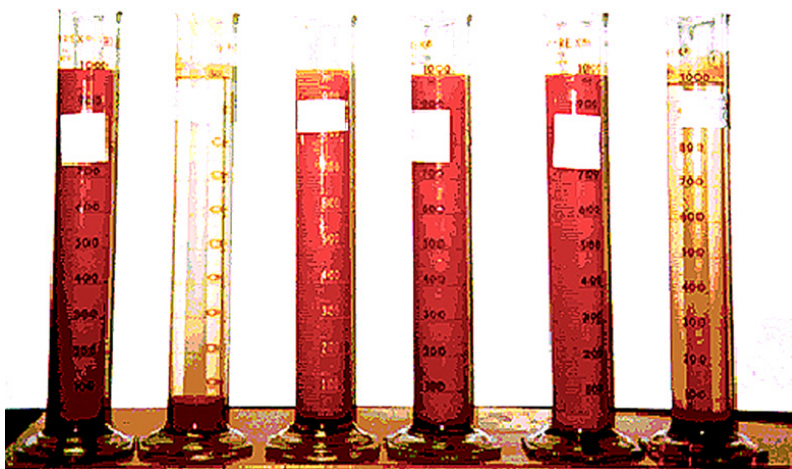


FIGURA 3.69: Alguns dos Ensaios de Sedimentação Feitos nos Resíduos De Mineração e Processamento de Bauxita.

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*)

ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA (m²/g)	
BAUXITAS	
jamaicana	22.8
brasileira	32.5
grega	6.4
LAMAS VERMELHAS	
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 ² /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.

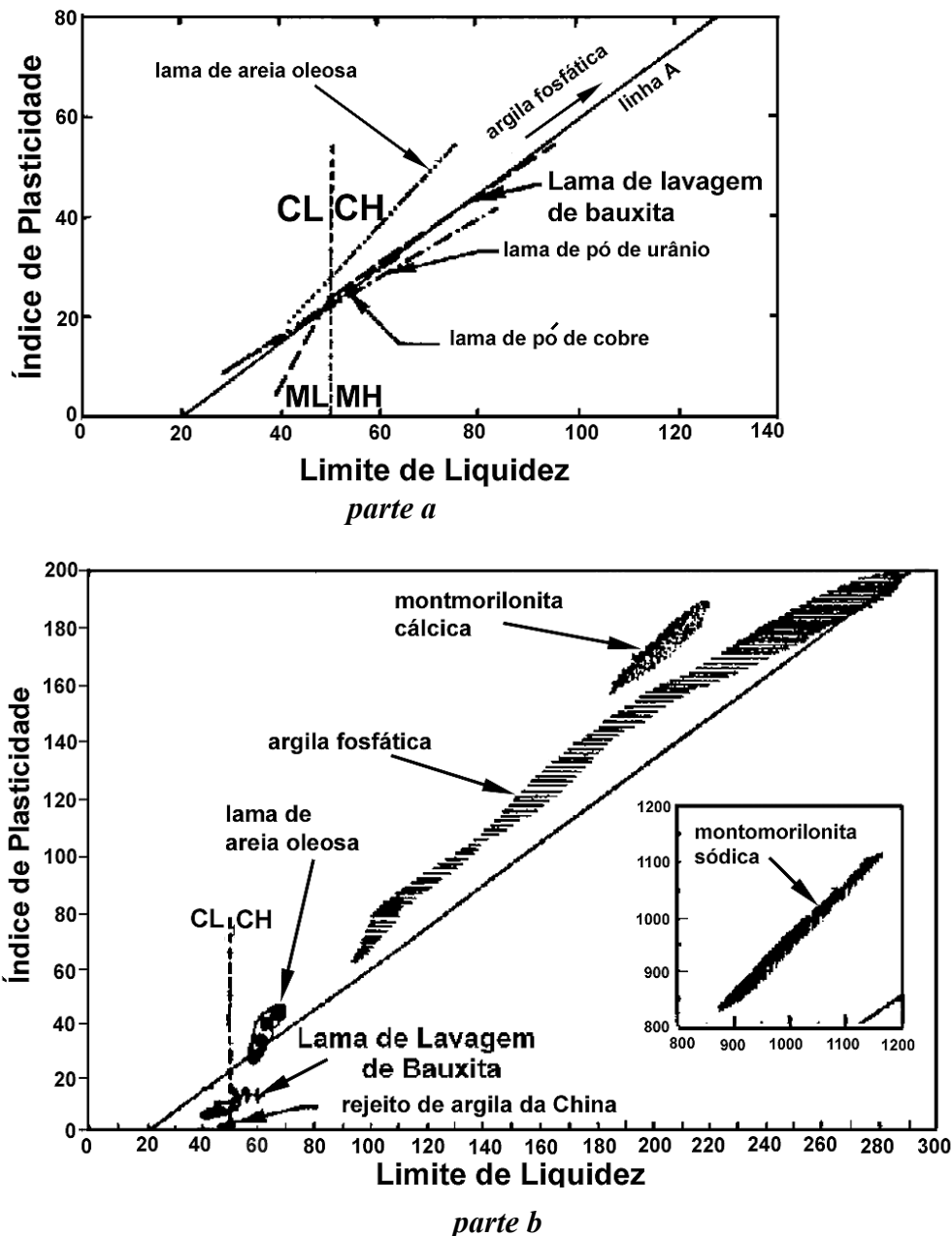


FIGURA 3.70: Gráfico de Plasticidade de Casagrande: Comparação Entre Diferentes Rejeitos e Argilas Remoldadas (*adaptado de Mello, 1985*)

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.

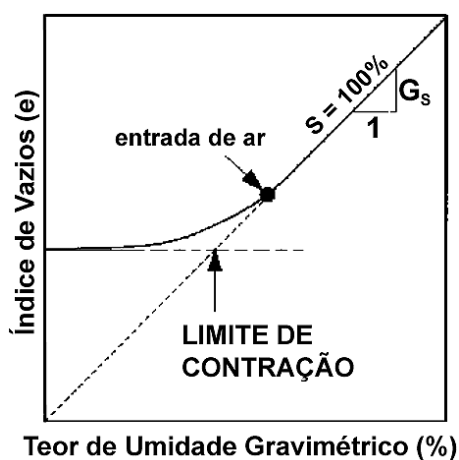


FIGURA 3.71: Definição do Limite de Contração à Partir de Curvas de Secagem
(adaptado de Fredlund et al., 2002)

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).

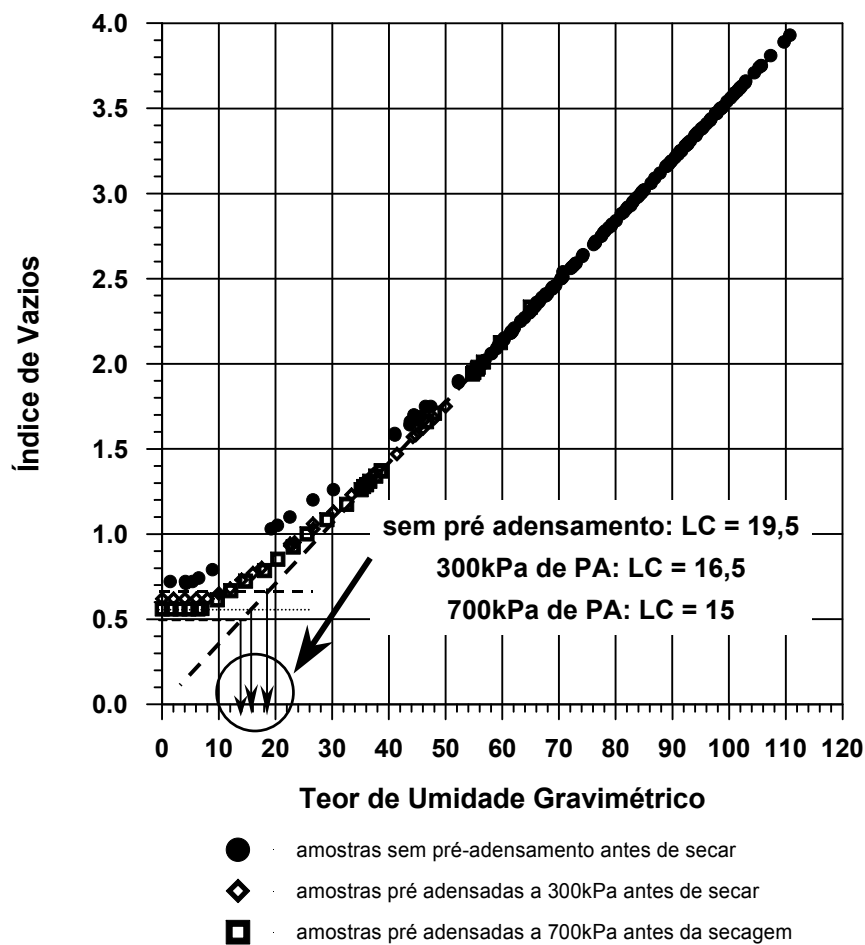
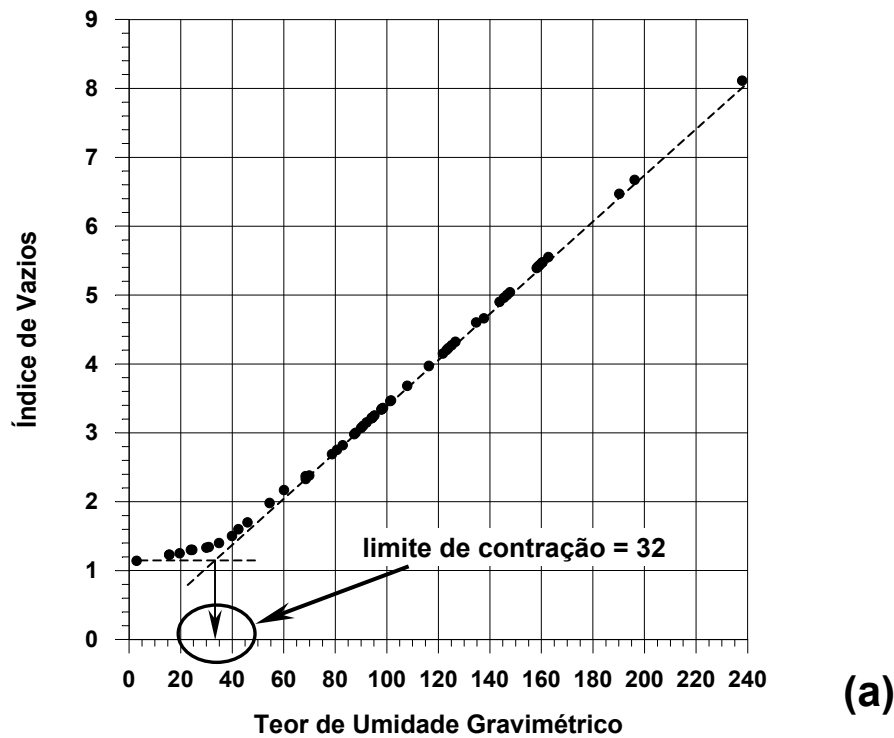


FIGURA 3.72: Curvas de Secagem para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada: (a) Lama Neutralizada e (b) Lama Não Neutralizada.

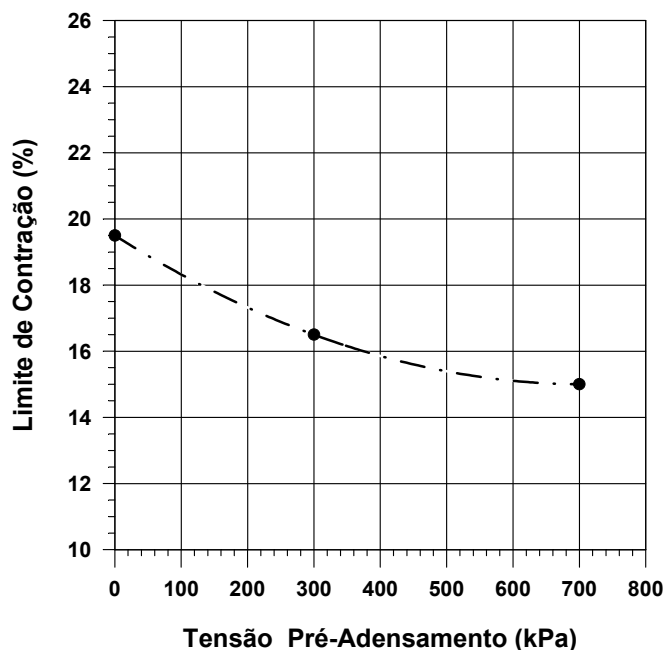


FIGURA 3.73: Variação do Limite de Contração para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Função da Tensão de Pré – Adensamento.

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
ANÁLISE QUÍMICA (%)				
Fe ₂ O ₃	32	12	29	37
TiO ₂	5	13	2	4
SiO ₂	7	8	25	16
Al ₂ O ₃	20	39	27	21
Na ₂ O	9	3	3	11
ANÁLISE MINERALÓGICA				
MAIOR QUANT.	Hematita, goetita	Bohemita, quartzo	Quartzo, hematita	Hematita
MENOR QUANT.	Bohemita	hematita		Goetita, anatásio
DENSIDADES				
	2,9 - 3,0	2,9 - 3,0	2,7 - 2,9	2,6 - 3,5
ÁREA SUPERFICIAL (m²/gr)				
	22	19	13 - 17	14
LIMITES DE ATTERBERG				
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