

## 9

# Conclusões e Sugestões para o Desenvolvimento da Pesquisa

### 9.1

#### Introdução

A meta deste trabalho foi avançar no campo de pesquisa da disposição de resíduos da indústria e mineração. A proposta básica foi investigar metodologias que forneçam informações sobre os efeitos de secagem no comportamento de rejeitos de mineração e processamento industrial depositados sob a forma de lama. Assim, as variações adicionais de volume devido à contração provocada pela perda de umidade poderão ser considerados em modelos que analisam o processo de adensamento destes materiais e só consideram recalques devido ao peso próprio e/ou acréscimos de carga no estado saturado do material, como o apresentado por Alves (1992) ou outros. A pretensão foi facilitar a incorporação dos efeitos do ressecamento na previsão do ciclo de vida de reservatórios de disposição destes resíduos, tornando mais realista o cálculo do período de capacidade de armazenamento e suas características finais, dados importantes para se executar projetos mais racionais de recuperação e reintegração do depósito ao meio ambiente.

O que se buscou ao longo deste estudo foi estabelecer técnicas de coleta e interpretação de dados que descrevam o processo de transição da fase saturada para a não saturada de lamas de lavagem e processamento de bauxita de diversos locais, com o auxílio de ensaios de campo e laboratório. Foi estudada a metodologia de utilização de alguns ensaios já existentes, agora aplicados a este

tipo não usual de material. As adaptações consideradas necessárias, tanto ao equipamento em questão como na forma de interpretação, foram sugeridas.

Como se trata de um problema muito complexo, envolvendo muitas variáveis, apenas um primeiro ciclo foi analisado. Este ciclo consistiu em estudar o comportamento de uma única camada que adensa ao mesmo tempo por peso próprio e por efeito de ressecamento solar. Não foi investigado efeito de lançamento de mais rejeitos, ou seja o volume de sólidos foi admitido constante ao longo do tempo, e nem efeitos de infiltração provocados por chuvas e acréscimo de mais soro ou qualquer outro líquido ao reservatório. Uma trajetória única de secagem foi seguida e não foi considerado o efeito de vento. Alguns modelos de comportamento foram propostos. Também foram sugeridos modelos empíricos para um anteprojetado.

Neste capítulo serão apresentadas algumas observações feitas no decorrer da pesquisa sobre o desempenho e resultado dos instrumentos utilizados e ensaios executados. Foi feita a opção de fazer isto por itens, ou seja, cada ensaio ou tema analisado será comentado e aí mesmo, serão feitas algumas sugestões para o desenvolvimento desta linha de pesquisa.

## 9.2

### Caracterização

Um extenso trabalho de caracterização foi executado. Ao longo deste estudo, 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 dos comportamentos destes materiais, tais como adensamento e permeabilidade, são extrapolados destes índices físicos. Portanto, procurou-se fazer uma investigação da técnica de ensaio utilizada, que em geral foi desenvolvida para solos comuns e que tem água como fluido de poro, e a utilização do fluido no qual estes resíduos

são lançados nos 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. A lama de lavagem apresentou como constituição básica, aproximadamente 31% de  $Al_2O_3$ , 28% de  $Fe_2O_3$  e 21% de  $SiO_2$ . A lama Vermelha SL, 31% de  $Fe_2O_3$ , 27% de  $Al_2O_3$  e 12% de  $SiO_2$ ; a lama vermelha PC, 26% de  $Al_2O_3$ , 21% de  $Fe_2O_3$  e 19% de  $SiO_2$ . No caso das lamas vermelhas OP, estas proporções variaram de aproximadamente 50% de  $Fe_2O_3$ , 17% de  $Al_2O_3$  e 6% de  $SiO_2$ .

Na caracterização geotécnica, o que pode 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 poderão estar sujeita a grandes erros se forem baseadas em ensaios de caracterização realizados de acordo com a técnica desenvolvida para os solos convencionais. Conseqüentemente, também a previsão da vida útil do seu reservatório de disposição via estes dados fica bem comprometida. 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 consequência 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, foi decidido que quando se tinha valores obtidos que seguiram a trajetória de secagem e usando o soro típico do rejeito ao invés de água, estes foram tomados como referência. Esta escolha foi pelo fato de ser esta a trajetória e condições em que se estará analisando os resíduos nos ensaios de ressecamento e, portanto, foi julgada de serem mais apropriadas e representativas do comportamento dos mesmos. Ainda mais porque 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 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 resumiu os valores adotados. Amostras da lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada foram moldadas com teores de umidade acima dos valores de limite de liquidez registrados pelo aparelho de Casagrande, uma indicação que este não é um método adequado para a determinação deste parâmetro para este tipo de material.

Uma sugestão é para que seja buscada uma melhor definição dos procedimentos de caracterização de resíduos, especialmente para o material em questão que possui um fluido não usual, e assim se possa chegar a dados que permitam comparações. Por exemplo, no caso de ensaio de sedimentação em soro cáustico e neutralizado, é necessário o monitoramento contínuo de sua densidade e viscosidade, que variam com o tempo em função da formação de cristais, para se chegar a um cálculo mais preciso. O entendimento da fração coloidal não foi feito e ela indicou ter uma influência significativa no comportamento dos rejeitos. Portanto, sugere-se que esta fração seja melhor analisada e que seus mecanismos de interação com as partículas maiores sejam melhor estabelecidos.

### 9.3

#### Curvas de Secagem e Resistência à Tração dos Resíduos.

O estudo de como variam os índices físicos dos resíduos com o teor de umidade ou o grau de saturação, ou seja, a determinação das chamadas *curvas de secagem*, foi realizado por meio de medição direta do volume de amostras em diferentes teores de umidade e com o conhecimento prévio de suas densidades total e relativa dos grãos. A partir daí, pôde ser feita a determinação de todos os outros índices físicos e obter as curvas de secagem para os resíduos.

Através das curvas de secagem obtidas, foram determinados os pontos de dessaturação nos resíduos lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada. Em todas as curvas, este ponto ficou muito bem determinado, bem como aquele associado ao teor de umidade correspondente ao limite de contração. No caso da lama vermelha OP neutralizada, ele ocorreu para um teor de umidade gravimétrico de 68% e um índice de vazios de 2,4. Este valor de teor de umidade está bem acima do valor do limite de liquidez adotado para o material, que foi de 49%, o que reforça que o uso do aparelho de Casagrande não é muito adequado para a determinação deste limite de consistência para este tipo de material. Para o caso da lama vermelha OP não neutralizada, o ponto de dessaturação ocorreu para um teor de umidade gravimétrico de 54% e um índice de vazios de 1,9. A diferença em relação aos valores obtidos para a lama vermelha OP neutralizada pode ser devido a uma combinação de fatores, entre eles, as condições iniciais de secagem, que não foram as mesmas, uma vez que para a lama vermelha OP não neutralizada as amostras tinham índices de vazios inicial bem inferior que o da lama vermelha OP neutralizada, e o fluido de preenchimento dos poros.

Se comparada a taxa de variação de índice de vazios no trecho de contração normal entre as duas lamas, foi verificado que ela foi praticamente a mesma, correspondendo no caso de uma variação no teor de umidade gravimétrico de 10%, a uma variação de índice de vazios de 0,34 para a lama vermelha OP neutralizada, e de 0,36 para a lama vermelha OP não neutralizada.

Á partir das curvas de secagem, foram estabelecidas algumas relações pelas quais fica muito simples conhecendo uma medida de teor de umidade

gravimétrico e a densidade relativa dos grãos, determinar qual o índice de vazios da amostra e, conseqüentemente, qualquer outro índice físico que se queira. Estas relações foram estabelecidas em função do índice de vazios e o teor de umidade gravimétrico e da densidade seca em função do índice de vazios, tanto para a lama vermelha OP neutralizada quanto para a lama vermelha OP não neutralizada, com coeficientes de correlação acima de 0,98 - ver as fórmulas (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4).

Para a lama vermelha OP não neutralizada, também foram obtidas curvas de secagem para amostras que foram previamente pré-adensadas a 300 e 700kPa. Foi visto que o efeito do pré carregamento é mais sensível em um primeiro nível, havendo uma mudança nas propriedades do material muito mais significativa quando da aplicação do primeiro estágio de carga (300kPa), mas pouco alterando quando se varia de 300 para 700kPa. O limite de contração diminui com o pré-adensamento, enquanto a densidade total e seca máxima aumentaram. No caso da densidade total, a máxima passou de  $2,19\text{kg/m}^3$  para a lama sem pré-adensamento para  $2,39\text{ kg/m}^3$  quando adensada a 300kPa e  $2,42\text{ kg/m}^3$  quando a 700kPa. A densidade seca final não dependeu da tensão de pré-adensamento ao longo do processo de secagem.

Foi feita uma tentativa de verificação de anisotropia na estrutura da lama vermelha OP não neutralizada. Para isso, após um de tempo de exposição à secagem de uma certa quantidade de lama, quando os resíduos já estavam em um teor de umidade abaixo do ponto de dessaturação, foram moldadas amostras colocando o molde apoiado no sentido vertical, na lateral do bloco, e não na superfície horizontal exposta ao ar, como usual. As amostras obtidas desta maneira foram chamadas de “transversais”. O que pôde ser observado é que as amostras transversais tiveram um comportamento muito semelhante às amostras pré-adensadas em relação à variação de volume, quando ainda não estavam muito secas, ou seja, para níveis não muito elevados de sucção. Porém, à medida que a secagem avançou e com o conseqüente aumento da sucção, o comportamento das amostras transversais foi se aproximando das chamadas normais. Com relação à densidade total, os valores medidos para as amostras transversais começaram a se diferenciar daqueles das amostras pré-adensadas e caminhar em direção das amostras secas ao ar em teores de umidade ainda maiores, ou seja, para valores

mais baixos de sucção. Portanto, devido ao processo de secagem, durante o qual as maiores contrações foram percebidas de ocorrer em níveis de sucção não tão elevados, o resíduo apresenta uma anisotropia que tende a desaparecer com o aumento da sucção.

Para estudar a resistência à tração dos resíduos, ela foi determinada por meio de ensaios de compressão diametral, ou ensaio brasileiro. As amostras utilizadas foram de 76mm de diâmetro por 20mm de espessura, moldadas de resíduos adensados por peso próprio e secos ao ar e em estufa. A velocidade de ensaio foi de 2mm/min. Em alguns casos, para efeito de investigar o grau de anisotropia do resíduo, também foram ensaiadas amostras transversais.

Os resultados obtidos mostraram uma dispersão de valores entre às amostras que continham fissuras ou vazios devido ao ressecamento e aquelas intactas, especialmente para teores de umidade abaixo do limite de contração e ainda mais para aqueles abaixo do qual o índice de vazios não mais variava (fim do processo de contração). Porém, parece haver a tendência de elevação da resistência à tração com a diminuição do teor de umidade, mostrando a influência da sucção como componente desta resistência, enquanto o solo ainda não apresenta trincas, ou seja, para valores de teores de umidade acima do limite de plasticidade ou o de contração.

Todas as amostras usadas nos ensaios de tração já estavam dessaturadas. Para valores de teores de umidade inferiores ao limite de plasticidade, é de se supor que o tamanho da amostra deve passar a influenciar no ensaio de uma maneira mais significativa, já que terá uma relação direta com a densidade de trincas presentes, o que deve ser melhor pesquisado. Foi considerado que a resistência à tração atingiria seu valor máximo na região do teor de umidade correspondente ao limite de contração e, à partir daí, reduziria em função do trincamento do solo. Este comportamento, porém, também precisa ser melhor investigado, e este estudo fica como sugestão.

Foram obtidas relações entre a resistência à tração e o teor de umidade gravimétrico para as lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada. Comparando os resultados da lama vermelha OP não neutralizada e lama vermelha OP neutralizada secas ao ar, verificou-se que o nível máximo de

resistência à tração atingido para teores de umidade correspondente ao limite de contração foram bastante semelhante para ambas, em torno de 250kPa. Isto é uma indicação de que aparentemente não há uma influência do tipo de fluido na magnitude da resistência à tração. Isto também pode indicar que não houve influência do tipo de estrutura final das amostras, já que as da lama neutralizada foram formadas à partir da sedimentação e adensamento de um meio com menor teor de sólidos que a neutralizada, o que pode ter gerado diferenças na estrutura de ambas. Porém, é reconhecido que um número maior de ensaios tem que ser executado para se chegar a uma resposta mais conclusiva, o que é, portanto, mais uma sugestão para avanço da pesquisa.

A curva estimada de resistência à tração em relação ao teor de umidade da lama vermelha OP neutralizada teve uma queda pós pico mais acentuada do que a lama vermelha OP não neutralizada, o que pode corresponder à diferença entre a plasticidade de ambas. A função que melhor se ajustou aos resultados para valores de teores de umidade acima do limite de contração foi do tipo exponencial e bastante semelhante entre os dois resíduos, como pode ser visto pela comparação entre as fórmulas (4.6) e (4.8). O coeficiente de correlação ficou acima de 0,94 em ambos os casos.

Pelo resultado apresentado pelas amostras transversais, aparentemente não há nenhuma anisotropia no resíduo com relação à resistência à tração. E o efeito do pré-adensamento pode ser sentido no aumento da resistência, passando a curva tensão x deformação também a apresentar aparência típica de material mais rígido, configurado pelo pico mais acentuado. A resistência à tração das amostras pré-adensadas a 300kPa no limite de contração foi de aproximadamente 550kPa.

As curvas que relacionaram a resistência à tração com outros índices físicos, (como o peso específico total e seco, o índice de vazios e o grau de saturação), foram úteis na identificação das amostras que continham fissuras. O valor máximo da resistência à tração foi atingido exatamente para o peso específico seco associado ao teor de umidade correspondente ao limite de contração. Em relação ao índice de vazios, notou-se que a medida que o solo foi contraindo e os grãos se aproximando uns dos outros, a resistência foi subindo seguindo uma função bem

definida. Quando o trincamento devido ao ressecamento se intensificou, essa função não mais existiu, ocorrendo uma grande dispersão dos resultados.

Pela curva que associa os valores de resistência à tração com o grau de saturação, ficou evidente para as duas lamas que há uma relação quase que linear entre a diminuição do grau de saturação com o aumento da resistência à tração até o limite de contração dos resíduos. Esta relação linear foi calculada com um coeficiente de correlação acima de 0,84 para as duas lamas secas ao ar, e foram, portanto, muito semelhantes.

A relação também foi obtida para as amostras pré adensadas a 300kPa, com o coeficiente de correlação de 0,81, para grau de saturação acima do limite de contração. Percebe-se pela fórmula (4.10), que o pré-adensamento aumentou a taxa de mobilização da resistência à tração com a diminuição do teor de umidade, deixando o resíduo mais rígido. O fato da resistência à tração não continuar crescendo com a diminuição do teor de umidade pode se dever ao fato de que esta resistência seria somente uma função das ligações interpartículas que devem ocorrer somente na fração fina constituinte deste tipo de solo, através de ligações de forças intermediárias, não ocorrendo nenhum outro agente cimentante.

Alguns ensaios para a lama vermelha SL pré adensada a 300kPa foram executados. Foram poucos os dados obtidos para se chegar a alguma conclusão, mas pareceu haver uma inflexão na curva para um teor de umidade aproximado de 15%, indicando ser este o valor do limite de contração destes resíduo. É um resultado coerente com os da lama vermelha OP não neutralizada pré adensada sob a mesma tensão, que igualmente possui licor cáustico como fluido de preenchimento dos poros. Também a magnitude da resistência foi semelhante entre estes dois resíduos, sendo aproximadamente igual a 600kPa na região do teor de umidade suposto como limite

Reforça-se a opinião de que é importante que novos ensaios sejam realizados, para que a relação entre a resistência à tração e o teor de umidade seja melhor estabelecido. Um cuidado maior na identificação da qualidade das amostras utilizadas poderá ajudar a explicar a dispersão de resultados que ocorre para valores inferiores de umidade. As curvas de secagem também devem ser conhecidas para confirmação da tendência de comportamento identificada.

## 9.4

### Curvas Características de Sucção

Os procedimentos utilizados para a obtenção das curvas características de dois resíduos de processamento de bauxita, as lamas vermelhas OP neutralizada e não neutralizada foram descritos. Foi experimentada a aplicação de quatro técnicas diferentes: a do papel filtro, uso de dessecadores, medição com transdutor de sucção do tipo *Imperial College* e uso de pequenos tensiômetros instalados no solo durante ensaio para simulação do ressecamento. O procedimento utilizado na aplicação de cada uma delas foi descrito e foi verificado, à partir das curvas características obtidas, que estas técnicas podem ser usadas simultaneamente, se complementando. Uma técnica se mostrou mais prática que outra, dependendo do teor de umidade em que se encontrava o material ensaiado.

Na técnica do papel filtro, os procedimentos utilizados no ensaio foram basicamente os descritos na designação da ASTM 5298-92 e se mostraram fáceis de aplicar. Todas as amostras foram preparadas seguindo a mesma metodologia, e só a trajetória de secagem foi feita. Elas foram moldadas em diferentes teores de umidade e colocadas em um recipiente hermeticamente selado para equalizar com o papel do tipo *Whatman's 42*. O papel no início do teste estava seco, sendo retirado diretamente de sua caixa. A curva de calibração usada foi a proposta pela ASTM, apresentada na designação já citada. O tempo de equalização mínimo foi de sete dias, mas a média utilizada foi de quinze dias, que foi o período considerado mais adequado para garantir a completa equalização. Foi necessário monitorar a perda de umidade do papel após o desmonte das câmaras de equalização e o ganho de umidade após retirá-los da estufa para obtenção de valores aceitáveis. Só se conseguiu manusear amostras com teores de umidade em peso menores que aproximadamente 70% para aplicação desta técnica.

No caso do transdutor do tipo IC, foi necessário o uso de uma pasta de caulim com um teor de umidade pouco acima de seu limite de liquidez, para melhorar o seu contato com o solo. Ela era colocada com uma espessura de aproximadamente 2 a 3mm no máximo. Se estiver mais espessa, foi verificado que ela passa a influenciar nos resultados, especialmente no tempo de

equalização. A técnica de saturação usada, por meio de aplicação de ciclos de carregamento e manutenção de uma pressão elevada constante por 24 horas, se mostrou adequada. O valor máximo registrado antes que o tensiômetro dessaturasse foi por volta de 2300 kPa, mas, em geral isto ocorria em torno de 1220 a 1400kPa, próximo ao valor de entrada de ar da pedra porosa (1500kPa). O período de tempo para que esta dessaturação ocorresse variou de caso para caso, em alguns ocorrendo em poucos minutos (3 a 5 minutos), e em outros, mais de meia hora.

Devido a uma oscilação no sistema de aquisição de dados, os valores medidos de sucção próximos entre zero e 200kPa apresentaram muito ruído. Dos resultados, foi verificado que os valores medidos pelo transdutor do tipo *Imperial College* se ajustaram, em sua maioria, aos medidos pelo papel filtro em contato com o solo, na medição de sucção matricial. Na região do ponto de entrada de ar porém, o que se pode perceber é que vários registros do tensiômetro acusaram elevados valores de sucção, se confundindo com os valores do papel filtro sem contato. Também fora desta região de entrada de ar, para níveis mais elevados de sucção, alguns outros valores medidos pelo tensiômetro IC também se ajustaram bem aos obtidos quando o papel não estava em contato, sugerindo uma medição da sucção total. Assim, uma sugestão é que seja feita a verificação da eficiência osmótica da sua pedra porosa.

Com relação ao uso dos dessecadores, ele se mostrou bem adequado e fácil de utilizar para a obtenção de elevados valores de sucção total. O tempo de equalização verificado foi longo, chegando a quase seis meses em alguns casos para se atingir a constância de peso. Os valores de sucção obtidos dos dessecadores se ajustaram muito bem aos medidos pela técnica do papel filtro sem contato com o solo.

Os mini tensiômetros instalados no interior da lama exposta ao ressecamento só responderam adequadamente até um nível de sucção da ordem de 30kPa, dessaturando à partir daí. Se ao invés de água como fluido de saturação tivesse sido utilizado um outro, mais viscoso, provavelmente se teria medido níveis maiores de sucção. Houve muito boa aderência e contato do resíduo em torno da pedra porosa do instrumento, indicando a adequabilidade da forma de instalação usada.

Foi verificado que a temperatura da sala durante os ensaios influenciava muito a leitura da coluna de mercúrio, provavelmente devido à sua dilatação. Por conta deste comportamento, o procedimento adotado foi sempre fazer as leituras dos tensiômetros pela manhã, após um período de no mínimo 8 horas de equalização da temperatura da camada de solo com o ambiente. Em alguns casos, o tensiômetro condicionou o local de abertura de trincas, de tal modo que alguns deles ficaram com a face exposta no interior da trinca, à medida que o ressecamento avançou.

Os valores medidos por este mini tensiômetros deixaram claro que o solo já apresentava baixos valores de sucção para teores de umidade em torno de 200%. Estes dados auxiliaram em muito o traçado da curva característica, completando as informações para níveis baixos de sucção. A tendência foi considerar todos as suas leituras como sendo de sucção total, ao invés de matricial, já que o rejeito ainda estava saturado. Foi admitido que o que estava sendo registrado foi sucção total devido à uma eficiência osmótica das pedras porosas destes instrumentos. Além disso, a possibilidade de elevada sucção osmótica era esperada, se for levada em consideração a química do fluido de preenchimento dos poros. Fica sugerido que se determine a eficiência osmótica de suas pedras porosas. Pelo formato final da curva característica obtida, parece que o processo de contração influenciou as suas medidas.

Da curva característica da lama vermelha OP neutralizada, foi verificado um teor volumétrico de entrada de ar de aproximadamente 70%. A sucção de entrada de ar foi de apenas 15kPa, considerada muito baixa, se for levada em consideração a granulometria fina do resíduo. O teor de umidade residual foi verificado de ser 4% e o grau de saturação residual, 7%. O nível da sucção osmótica grosseiramente estimado foi de 2000kPa quando o solo apresenta um grau de saturação de 90%.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 5kPa e um teor de umidade volumétrico residual de 5% foram encontrados. O teor de umidade volumétrico de entrada de ar foi verificado de estar próximo a 66%. Esta diferença no valor de sucção de entrada de ar entre os dois resíduos não pode ser creditada só ao tipo de fluido, uma vez que as duas

lamas tiveram condições iniciais ligeiramente diferentes. Foi verificado que o grau de saturação residual era de 6% para o resíduo não neutralizado, também foi muito próximo ao registrado para o neutralizado (7%). Com relação à estimativa da sucção osmótica, para um grau de saturação de 90%, foi verificado haver um nível em torno 1000kPa para o resíduo cáustico, menor, portanto da que foi registrada para a lama vermelha OP neutralizada.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, também foram obtidas as curvas características de sucção mátrica para o resíduo pré-adensado a 300 e 700kPa. Como efeito do pré-adensamento, pode ser percebido a redução do teor de umidade volumétrico de entrada de ar (66% para a sem pré-adensamento; 58% para a pré-adensada a 300kPa e 54% para a pré-adensada a 700kPa). A sucção matricial de entrada de ar também aumentou, passando de 5kPa para o resíduo sem pré-adensamento para 60kPa para a pré-adensada a 300kPa e 3000kPa para a pré-adensada a 700kPa, com teores de umidade volumétrico residuais de respectivamente 5%, 6% e 8%. Este elevado aumento da sucção matricial de entrada de ar mostra bem como o pré carregamento reduziu os vazios da amostra. Os graus de saturação residual variaram de 5%, 7% e 10% para a sem pré-adensamento, a pré-adensada a 300kpa e a 700kPa, respectivamente.

Foi interpolada uma função exponencial, com coeficiente de correlação de 0,998, que associa diretamente a sucção à tensão de pré-adensamento nesta faixa de tensões, e que pode servir como um primeiro indicativo do nível de sucção de entrada de ar esperado após a aplicação de um pré-carregamento.

Pôde ser verificado que a relação entre a sucção e o índice de vazios possui dois pontos de inflexão. O primeiro ocorreu no valor de entrada de ar das amostras, e o segundo, em torno do índice de vazios correspondente ao limite de contração. Estes níveis também foram modelados por funções matemáticas simples, para permitir estimativas iniciais.

A lama vermelha OP não neutralizada atingiu um menor índice de vazios final após o ressecamento que o resíduo neutralizado, como já havia sido percebido pelas curvas de secagem, provavelmente por ter sido “disposta” mais espessada, ou seja, com um maior teor de sólidos inicial, e não por ação do fluido de preenchimento dos poros. Porém, inicialmente apresentou uma taxa menor de

variação do índice de vazios com o ganho de sucção em relação à lama neutralizada. Este comportamento se inverte depois, uma vez que a lama vermelha OP neutralizada atingiu seu limite de contração em um maior teor de umidade.

Na comparação entre as curvas índice de vazios contra a sucção matricial para a lama vermelha OP não neutralizada sem pré-adensamento, pré-adensada a 300kPa e a 700kPa., foi visto que à partir de um determinado nível de sucção, o trecho linear da curva da lama sem pré-adensamento coincide com o da lama pré-adensada a 300kPa, em um comportamento semelhante ao processo de compressão. À medida que o processo de ressecamento avançou, as duas curvas se distanciaram novamente, indo a lama sem pré-adensamento encontrar a curva daquela pré-adensada a 700kPa em uma sucção mais elevada. Esta última tem o trecho linear quase que paralelo ao da lama pré-adensada a 300kPa, indicando que elas possuem o mesmo tipo de comportamento em relação à compressibilidade durante o processo de secagem. Elas também se tornaram coincidentes em um nível mais elevado de sucção, quando o resíduo pré-adensado a 300kPa já está atingindo seu limite de contração.

Na relação entre a resistência à tração e a sucção, foi assumido que há um crescimento contínuo da primeira com a sucção mátrica à partir de um região próxima do ponto de entrada de ar até o limite de contração, região onde ela atingiria seu máximo. À partir daí, com o fissuramento ficando mais intenso, haveria uma diminuição de ganho da resistência com o aumento da sucção matricial. A região do valor de sucção máxima coincidiu nos ensaios realizados com a região do teor de umidade no qual as amostras atingiram sua densidade total máxima, como pôde ser verificado pelas curvas de secagem. Para teores de umidade menores, a densidade total também passou a decrescer. É sugerido, então, que este valor de sucção determina o ponto em que o trincamento começa se tornar ainda mais intenso, havendo uma maior conexão entre as fissuras. Para os dois resíduos ensaiados, foi interpolada uma função potencial associando resistência à tração à sucção matricial, para teores de umidade acima do limite de contração.

Nos ensaios em resíduo pré-adensado a 300kPa, foi verificado que as amostras parecem apresentar uma taxa de ganho de resistência menor com o

aumento da sucção que aquelas sem pré-adensamento. Porém, são muito pouco os dados para que isso seja afirmado de maneira conclusiva. Os poucos resultados obtidos em amostras “transversais” mostraram que, para valores mais baixos de sucção, há um comportamento mais próximo ao das amostras com pré-adensamento. Esta mesma tendência já havia sido identificada nas curvas de secagem. Porém, por estas últimas estava mais evidente que, à medida que a sucção aumentava, esta aparente anisotropia desaparecia, ficando o comportamento das amostras transversais mais próximas das consideradas “normais”. Já aqui na relação entre a resistência a tração e a sucção, os dados são insuficientes para que isso fosse confirmado.

Uma outra sugestão seria determinar as curvas características dos resíduos poderiam novamente, com mais dados em faixas de umidade que não foram ainda bem representadas. O uso de novas técnicas poderia ser empregado. Um parâmetro muito importante em todo o processo quase não foi mencionado. Trata-se da permeabilidade não saturada, que pode ser obtida tanto por meio da curva característica como pelas curvas de secagem, em procedimentos como os descritos em Fredlund et al. (1994) e Brutsaert (2000). Assim, também sugere-se que esta determinação seja realizada.

## 9.5

### **Ensaio de Adensamento: Compressibilidade dos Resíduos**

Nos ensaios de adensamento com taxa de deformação controlada, foi grande a variação das velocidades usadas, bem como as condições iniciais das amostras. Foram realizados testes com duração de quatro dias até de uma hora, em amostras com 200mm, 100mm e 50mm de diâmetro e 60mm, 40mm e 20mm de altura, respectivamente, para se verificar algum efeito de escala.

A saturação adequada das linhas de drenagem do equipamento e não existência de vazamentos é um fator importante para uma correta obtenção dos valores de poropressão e, conseqüentemente, para interpretação do ensaio. O método usado para cálculo foi o de Martinez et al. (1986), e não foi observada, no

caso das permeabilidades, o aumento desta com a diminuição do índice de vazios, como reportado de acontecer nos ensaios de Lima (1996), que justificou este fato pelas às simplificações deste mesmo método de análise. O cuidado maior deve ser na definição da taxa de carregamento quando se utiliza este método simplificado para determinação das permeabilidades, pois foi verificado que quando ela provoca relações de excessos de poropressão com a tensão total na base da amostra superiores que 15 a 20%, os valores se distanciam muito dos obtidos por outros métodos, como o adensamento hidráulico (HCT).

O gráfico de interpretação do ensaio, no que se refere à compressibilidade, em geral apresentou, no espaço log-log, duas características de sensibilidade. Ou seja, se esta lei de compressibilidade fosse aproximada por retas, ela teria duas inclinações, uma mais acentuada no início e outra, após já ter atingido um índice de vazios em torno de 2 a 3, mais suave. A tensão efetiva de referência para este ponto de inflexão foi verificada de ser em torno de 10kPa.

Para os ensaios montados com amostras semelhantes, ou seja, mesmo teor de sólidos, a taxa de deformação não parece influenciar muito os resultados de compressibilidade. Amostras amolgadas apresentaram maior compressibilidade e, as pré adensadas, menor. Amostras não saturadas se comportaram como material pré adensado em termos de compressibilidade. Quando se normaliza as curvas, porém, em relação à variação do volume de vazios da amostra comparado com o volume de vazios inicial, parece haver um ligeiro aumento desta relação com o aumento da taxa de deformação.

Para a permeabilidade, notou-se que quando se normaliza os gráficos, não há uma grande dispersão dos valores obtidos em amostras com mesmas características (teor de sólidos inicial). Resultados de ensaios de adensamento convencional e de tensão controlada se ajustaram bem aos valores fornecidos pelo ensaio CRD, bem como os de ensaios em coluna de sedimentação e adensamento com fluxo restringido, tanto com relação à permeabilidade quanto à compressibilidade, para a lama vermelha OP neutralizada.

Não foram encontradas diferenças significativas nos ensaios realizados no consolidômetro de 200 mm de diâmetro para os de 100 e 50mm, indicando não haver problemas com a escala do ensaio. Percebeu-se que amostras com pequenas

diferenças de densidade relativa dos grãos, mesmo ensaiadas em condições rigorosamente iguais (mesma velocidade e teor de sólidos inicial) apresentam uma grande variação na lei de compressibilidade. Porém, aquelas com densidade relativa dos grãos iguais, mesmo quando ensaiadas com teores de sólidos iniciais diferentes, apresentam resultados próximos.

Como conclusão preliminar, pode ser considerada que a determinação das curvas de compressibilidade por meio do ensaio CRD foi satisfatória, tendo sido mostrado que os resultados obtidos por meio deste tipo de teste se ajustam bem a outros tipos diferentes, como o HCT, o ensaio de coluna e o edométrico convencional. Porém, no tocante à permeabilidade, um estudo mais aprofundado das taxas de carregamento aplicadas deve ser realizado, já que o cálculo deste parâmetro é altamente sensível à esta condição de ensaio. Portanto, para a determinação das leis de permeabilidade, fica sugerido o uso de ensaios do tipo HCT, que apresentaram boa concordância mesmo entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

As relações de compressibilidade e permeabilidade da lama vermelha OP neutralizada são consideradas de estarem bem estabelecidas. Para a lama vermelha OP não neutralizada foi admitido ela possuir as mesmas características da lama neutralizada nesta primeira análise. Porém, mais estudos deverão ser realizados para confirmar este comportamento e também fica como sugestão para próximos trabalhos.

Com relação à compressibilidade da lama de lavagem, também está sendo aceito que as sua compressibilidade está razoavelmente bem definida, faltando, porém, maiores estudos para a permeabilidade, já que os resultados obtidos, apesar de mostrarem uma semelhança com relação à taxa de variação com o índice de vazios, foram muito dispersos.

No caso das lama vermelha SL e PC, foram muito pouco os ensaios realizados e um estudo mais aprofundado seria necessário para se chegar a uma conclusão. Resultados preliminares foram apresentados para os dois resíduos em questão, e que já permitem uma primeira estimativa. Uma faixa de variação das duas características (permeabilidade e compressibilidade) foi apresentada, facilitando uma estimativa inicial à título de anteprojeto.

## 9.6

### Ensaio de Campo:

A metodologia empregada para realização de ensaios de campo se mostrou simples e eficiente, e foi bem descrita. É um procedimento que poderia se tornar rotineiro no locais de disposição de resíduos, fornecendo parâmetros mais adequados para o acompanhamento do comportamento final do depósito e checagem das teorias de previsão de adensamento existentes.

Os resultados para determinação das leis de compressibilidade do material obtidos foram semelhantes aos medidos via ensaio de adensamento em laboratório do tipo CRD, o que também dá uma indicação da adequabilidade deste último para esta finalidade, já que é mais simples que o ensaio do tipo HCT. O modelo de variação do índice de vazios com a tensão efetiva foi verificado de ser bi-linear em um espaço log. x log. O nível de tensão efetiva de referência para a mudança de comportamento é da ordem de 10kPa, o que representa mais ou menos um índice de vazios em torno de 3 para os resíduos.

Com relação à permeabilidade, o ensaio de campo utilizado mostrou que é capaz de fornecer uma estimativa inicial razoável. Poucas medições foram realizadas em camadas mais firmes, e portanto, a escassez de dados ainda não permitiu verificar se o modelo de interpretação utilizado, baseado em proposta de Baligh & Levadoux (1986) e Levadoux & Baligh (1986), é adequado. Para a lama com baixo teor de sólidos (< que aproximadamente 40%), porém, já foi verificado que ele não se ajusta.

## 9.7

### Ensaio de Ressecamento

Foi verificado que, com o uso de uma metodologia simples, os dados obtidos em laboratório sobre o ressecamento de resíduos permitem atingir respostas animadoras quando usados em um modelo numérico. Através dos ensaios, percebeu-se que a técnica de “dry-stacking” é viável de ser aplicada em

lamas vermelhas, o resíduo do processamento da bauxita para obtenção da alumina. Mesmo tendo sido ensaiada em um teor de umidade inicial muito elevado, contrário do que se recomenda na prática, o material apresentou uma taxa de secagem elevada, reduzindo seu teor de umidade em quase 50% em apenas 20 dias. Ao final de 2 meses, o resíduo já apresentava níveis de sucção matricial em torno de 300kPa entre cinco e dez centímetros de profundidade, com resistência à tração próxima a 50kPa. Estes valores conferem à camada, resistência satisfatória para realização de algumas obras sobre a superfície, permitindo se adiantar os trabalhos de reabilitação da área.

O fissuramento ocorrido também foi considerado satisfatório para facilitar a drenagem das camadas que seriam lançadas posteriormente. As fissuras atingiram, em média, ao longo do período de ensaio, de 4 a 6cm de largura, com mais de 35cm de profundidade.

Através destes ensaios, também foi verificado que a densidade de trincas formadas é dependente da espessura da amostra em relação à área superficial exposta para secagem, sendo esta relação mais significativa inclusive que a taxa de evaporação imposta ou a umidade relativa do ar, como já havia sido confirmado por estudos anteriores como o de Corte & Higashi (1964). As amostras menos espessas apresentaram maior densidade de trincas que as de camadas mais grossas, independente do teor de umidade inicial, forma do recipiente e taxa de evaporação. Notou-se também que o fissuramento se iniciava mais rapidamente nas amostras depositadas em um maior teor de sólidos inicial (menor teor de umidade).

A contração vertical total da camada foi de quase 30% nos ensaios com a lama vermelha OP não neutralizada, lançada com 54% de teor de sólidos, e quase 50% na lama vermelha OP neutralizada, lançada com 34% de teor de sólidos. Este valor dá uma idéia do ganho em capacidade de estocagem de uma área de disposição quando se utiliza a técnica de “dry stacking”, se comparada com a técnica de lançamento sob a forma de lama.

Foram registrados a ocorrência de gradientes térmicos que se invertiam com as lâmpadas acesas ou não, com conseqüente alternância do fluxo de calor. Isso poderia levar o solo a trincar por fadiga, devido à ação do carregamento cíclico

imposto pela inversão contínua do gradiente térmico. O nível de sucção registrado para a propagação do trincamento foi em torno de 22kPa para os dois materiais, apesar do ensaio 01 com a lama vermelha OP não neutralizada ter iniciado a formação de trincas com um valor ainda mais baixo, devido à concentração localizada de tensões provocada pela instrumentação.

O tipo de balança usada nestes ensaios poderia ser automatizado, de modo que medidas de variação de peso poderiam ser feitas ininterruptamente. Os tensiômetros usados, também devem ter um outro líquido para saturação ou outro sistema de leitura. Da forma como foram montados, cavitaram a baixos níveis de sucção. Os ensaios deveriam ser reproduzidos, para confirmar a sua repetibilidade. Após estarem bem estabelecidas as características de secagem para estas condições, novas variáveis podem ir sendo introduzidas, tais como vento, lançamento de novas camadas, processos de molhagem e secagem etc. A técnica proposta por Swarbrick (1994) e Koupai et al. (1995) para determinação da permeabilidade não saturada à partir dos resultados dos ensaios aqui realizados também poderia ser empregada.

## 9.8

### Comentários Finais

Dentro da proposta inicial desta pesquisa, a de investigar metodologias que forneçam informações para a incorporação dos efeitos da exposição ao ressecamento solar na previsão do comportamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita dispostos sob a forma de lama, considera-se que o objetivo foi cumprido. Pelo fato de estar manuseando um material totalmente não usual, muita dificuldade foi encontrada até que as metodologias de execução dos ensaios de campo e laboratório fossem estabelecidas de modo que fornecessem resultados coerentes. Através dos erros e acertos efetuados ao longo desta pesquisa, uma base metodológica foi definida. E em uma primeira análise, os parâmetros obtidos via esta metodologia testada se mostraram aceitáveis para utilização em modelos numéricos de previsão de vida útil dos reservatórios de

disposição. Isto é animador, já que, assim, as empresas poderão melhorar seu planejamento de operação, e muito pode ser economizado, justificando a continuidade do investimento nos estudos e pesquisa sobre a disposição de resíduos.

Muito ainda precisará ser estudado para que o comportamento dos resíduos analisados ao longo deste trabalho seja bem definido. Também com relação aos vários métodos de análise e interpretação dos resultados testados e propostos, é necessário fazer muitas aferições e melhorias, e a pesquisa das mesmas constituem a sugestão básica para próximos trabalhos.