

5.3.3.1

METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS DESSECADORES

O objetivo, portanto, com o uso de dessecador é ter um dispositivo onde se pode colocar as amostras sobre um líquido, de modo que transferência de umidade ocorra somente por absorção de vapor. A Figura 5.28 mostra alguns dessecadores com amostras do resíduo equalizando. Cada um dos dessecadores está com uma diferente concentração de solução de NaCl e água destilada, conforme sugerido em Jucá (1990). A sucção mínima medida por este processo foi em torno de 1MPa, e a máxima, 10MPa. Os conjunto foram deixados equalizar por aproximadamente 6 meses. Pesagens foram executadas periodicamente para verificar se as amostras haviam atingido uma constância de peso.

As amostras utilizadas foram as mais variadas possíveis, desde a lama de lavagem de bauxita até a lama vermelha OP não neutralizada. Porém, todas foram preparadas da mesma forma, ou seja, foram homogeneizadas ainda em baixo teor de sólidos, deixadas sedimentar e adensar por peso-próprio, exposta ao ressecamento ao ar e, só então conduzidas aos dessecadores. Os valores medidos foram plotados juntamente com os da técnica do papel filtro sem contato com o solo, sendo apresentados mais adiante.



FIGURA 5.28: Vista dos Dessecadores Usados para Medição de Sucção Total.

5.3.4

Uso de Tensiômetros Durante Ensaio de Ressecamento

Foram executados ensaios de secagem nas lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada, que estão descritos em Villar et al. (1997) e Villar & de Campos (1999) e serão mais detalhados em um capítulo mais adiante, semelhantes aos descritos por Swarbrick (1992). Para estes ensaios, foram construídas caixas de vidro isoladas lateralmente e na base, chamadas de lisímetros, que eram colocadas sobre balanças, para o acompanhamento da perda de umidade do solo ali depositado, durante uma simulação de um processo de ressecamento por meio de exposição a lâmpadas halógenas especiais, que emitem radiação semelhante à do sol.

Nestas caixas, foram colocados tensiômetros de pequenas dimensões para o acompanhamento do desenvolvimento da sucção devido à variação do teor de umidade durante o processo de secagem. Estes tensiômetros foram feitos com tubos “saran”, de aproximadamente 0.3cm de diâmetro e ponta porosa de alta entrada de ar, com 0.5 cm de diâmetro. Eram, então, conectados a tubos de acrílico de 1,9cm de diâmetro, que funcionavam como reservatório de água, dispendo de válvulas para permitir a sua circulação para remoção de bolhas de ar e ressaturação do sistema. Estes tensiômetros eram conectados a uma coluna de mercúrio. Teoricamente, tinham capacidade de medir sucções de até 100kPa, justamente o nível de sucção para o qual se encontrou dificuldades de medição com o uso das outras técnicas aqui mencionadas.

5.3.4.1

METODOLOGIA DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS TENSIÔMETROS DURANTE OS ENSAIOS DE RESSECAMENTO

A Figura 5.29 dá uma idéia da montagem dos tensiômetros. Eles estão dentro do recipiente com água deairada, no centro da figura, parte inferior. No canto esquerdo, pode se notar as colunas de mercúrio através das quais eram feitas as leituras. Elas possuíam um sistema de retirada de bolhas de ar e saturação no topo. Bem acima do recipiente com água onde estão as pedras porosas, estão

reservatórios de acrílico, que também possuíam válvulas para permitir a circulação de água e retirada de bolhas de ar. Cada tensiômetro era conectado a um reservatório deste em separado, que por sua vez eram ligados à uma coluna de mercúrio.



FIGURA 5.29: Vista do Esquema Montado para os Ensaios de Ressecamento: Detalhe dos Tensiômetros.

Foram usadas duas grandes caixas de secagem. Na 01, onde não haveria amostragem, foram distribuídos 5 tensiômetros a 5cm dentro do solo, próximo a cada um dos cantos e um no centro. Dois foram instalados a 10cm, distantes entre si 25cm e a 12,5cm do centro da caixa. Um outro tensiômetro foi colocado a 15cm dentro do solo, também centrado, e outros dois a 20 cm, seguindo a disposição daqueles instalados a 10cm. Na caixa 02, de amostragem, foram instalados 3 tensiômetros, todos no centro da caixa, a 5cm, a 10 e a 20cm dentro do solo. Termopares foram colocados próximos a cada tensiômetro, em ambas as caixas. Os resíduos eram muito bem homogeneizados antes da colocação dos tensiômetros, que tiveram, portanto, instalação facilitada devido à baixa consistência do material no início do ensaio. A leitura de referência inicial foi tomada com os tensiômetros dentro de água, na altura onde seriam instalados.

Como eram realizadas amostragens periódicas, o valor da sucção podia ser diretamente relacionado com o teor de umidade medido. Durante todo o ensaio, como a perda de umidade ao longo do tempo também era monitorada, o teor de umidade aproximado de cada camada onde estavam instalados os instrumentos também podia ser estimado, caso a amostragem não tivesse sido realizada naquele dia. Assim, pôde ser obtida a relação sucção contra teor de umidade em peso ao longo de todo o ensaio, tanto para valores medidos (obtidos das amostragens) como calculados (estimados das leituras de perda de umidade), e compará-la com os valores fornecidos pelas outras técnicas.

5.3.4.2

COMENTÁRIOS SOBRE OS ENSAIOS REALIZADOS COM OS TENSÍOMETROS DURANTE OS ENSAIOS DE RESSECAMENTO

Foram feitos ensaios nestes resíduos com duração de até 120 dias. Os valores de sucção medidos pelos tensiômetros na camada superficial uma semana após o início do ensaio, era de apenas 0.7kPa, aproximadamente. Cerca de um mês após, os valores de sucção registrados na superfície eram de 22kPa e, a 20cm de profundidade, 17kPa. Estes tensiômetros 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 e com um ponto de ebulição maior, provavelmente se teria medido níveis maiores de sucção. A variação da leitura ao longo do tempo destes instrumentos será apresentada mais detalhadamente no capítulo que discute os ensaios de ressecamento.

Foi verificado que a temperatura da sala durante os ensaios influenciava muito a leitura da coluna de mercúrio, provavelmente devido à sua dilatação. Elas eram bem mais baixas enquanto as lâmpadas estavam acesas e a temperatura da sala estava acima de 45°C (chegaram a mais de 60°C em uma ocasião), aumentando sensivelmente após o ensaio desligado, quando então a temperatura descia rapidamente para em torno dos 25°C. Um exemplo desta oscilação das leituras pode ser visto na Figura 5.30, que mostra os registros efetuados por um

tensiômetro instalado a 20 cm de profundidade. 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. Um exemplo de gráfico de leituras à partir deste procedimento pode ser visto na Figura 5.31, se tratando de um tensiômetro colocado à 5cm de profundidade. Também pode ser verificado aí que o ponto de dessaturação do instrumento e que as tentativas de novamente saturá-lo não surtiram efeito à partir de então.

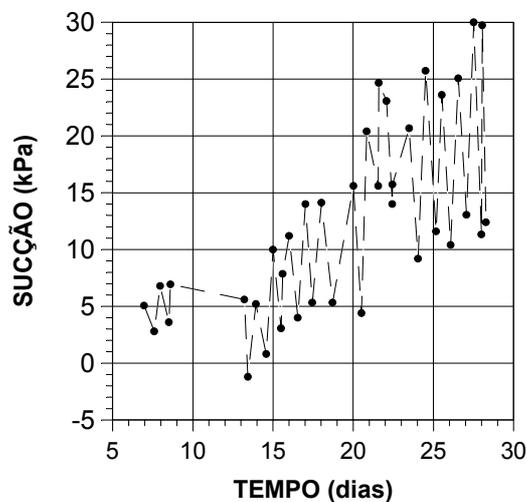


FIGURA 5.30: Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Oscilação Causada Devido Efeito de Temperatura.

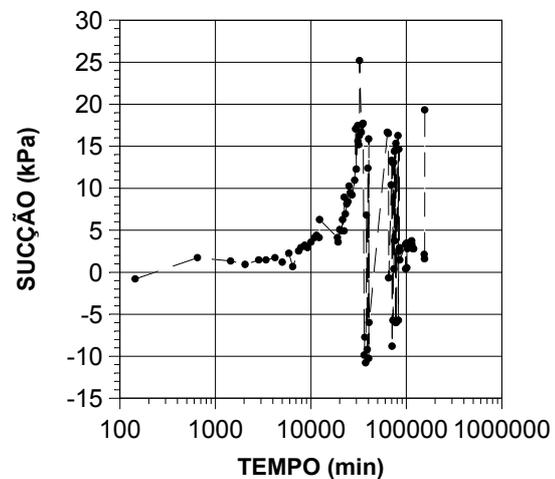


FIGURA 5.31: Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Resultado Típico, Mostrando a Dessaturação ao Final.

Os efeitos de temperatura em leituras de tensiômetros pode ser melhor estudado e compreendido por exemplo em Blutters & Cardon (1998); Warrick et al. (1998); Butcher et al. (1999) e Biesheuvel et al. (1999).

A Figura 5.32 mostra um tensiômetro após um ensaio ser desmontado. Pode ser notado que houve muito boa aderência e contato do resíduo em torno da pedra porosa, o que é uma indicação de adequabilidade da forma de instalação. Em um único caso, porém, um dos tensiômetros teve sua ponta forçada para cima, como pode se visto na Figura 5.33. Porém, o bom contato do resíduo com a pedra porosa foi mantido. 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. Porém, quando isso aconteceu, eles já tinham dessaturado, de modo que não houve prejuízo nas leituras.

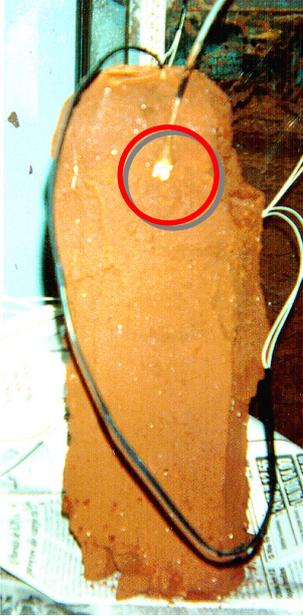


FIGURA 5.32: Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Oscilação Devido Efeito de Temperatura.

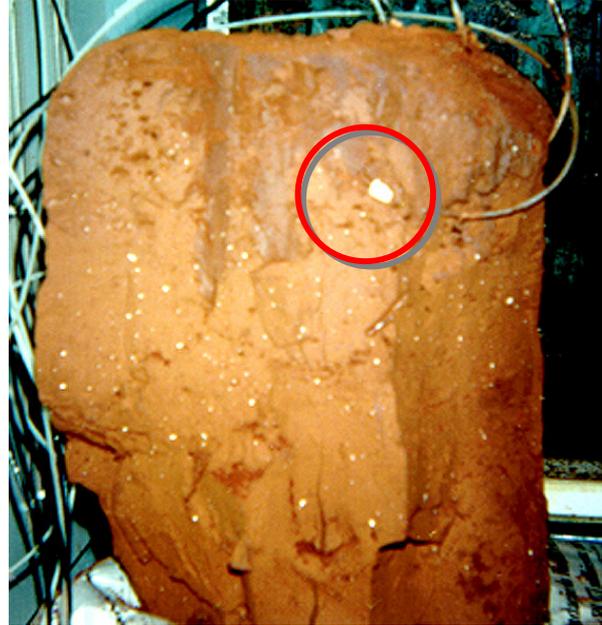


FIGURA 5.33: Exemplo de Leitura do Mini - Tensiômetro: Resultado Típico, Com Dessaturação ao Final.

5.4

Resultados Obtidos: Curvas Características dos Resíduos

Para a montagem das curvas características dos resíduos, todos os resultados obtidos das diversas medições realizadas eram plotados em um mesmo gráfico em relação ao teor de umidade gravimétrico. Juntamente com as curvas de secagem, foi então estabelecida uma curva entre estas grandezas, eliminado-se os pontos que não se encaixavam na tendência geral apresentada pela maioria das medidas. Com essa relação tendo sido estabelecida, ela foi tomada como referência para, novamente em conjunto com as curvas de secagem, chegar à função que associava a sucção e o teor de umidade volumétrico, o grau de saturação e o índice de vazios. Ou seja, os pontos da curva adotada entre sucção e

teor de umidade gravimétrico eram diretamente correlacionados às outras grandezas por intermédio das curvas de secagem previamente determinadas. São estes os resultados que serão apresentados à seguir.

5.4.1

Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada

A Figura 5.34 resume todas as medidas efetuadas através das diversas técnicas citadas anteriormente na lama vermelha OP neutralizada. Nela também está a curva que foi interpretada como sendo a relação entre o teor de umidade gravimétrico e a sucção.

A tendência foi considerar todas as leituras dos tensiômetros em contato com o resíduo durante o ensaio de ressecamento como sendo de sucção total, ao invés de mátrica, como previamente admitido em Villar & de Campos (2001). Como pelas curvas de secagem pode se checar que todas estas medidas foram realizadas no rejeito ainda saturado, foi admitido que o que estava sendo medido 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, uma mistura de soda cáustica com ácido sulfúrico, que apresenta uma elevada concentração iônica.

Uma consideração porém deve ser feita sobre a montagem desta curva da Figura 5.34. Na verdade ela foi feita em diferentes etapas, sendo que nesta faixa de medidas inicial só estão resultados de amostras que foram secas à partir de um baixo teor de sólidos e experimentaram uma grande variação volumétrica durante o ressecamento. As outras medidas efetuadas com os outros instrumentos foram executadas em amostras já à partir deste ensaio de ressecamento desmontado e, em poucos casos, de outras amostras que foram preparadas do mesmo jeito (sedimentadas, adensadas por peso próprio e expostas ao ressecamento), mas inicialmente com um teor de sólidos ligeiramente maior, para depois serem submetidas à um procedimento de moldagem antes dos ensaios. Não se sabe se este processo de moldagem possa ter provocado o amolgamento nas amostras, a

tal ponto que na verdade se teria dois materiais diferentes à partir de um teor de umidade aproximado de 60%.

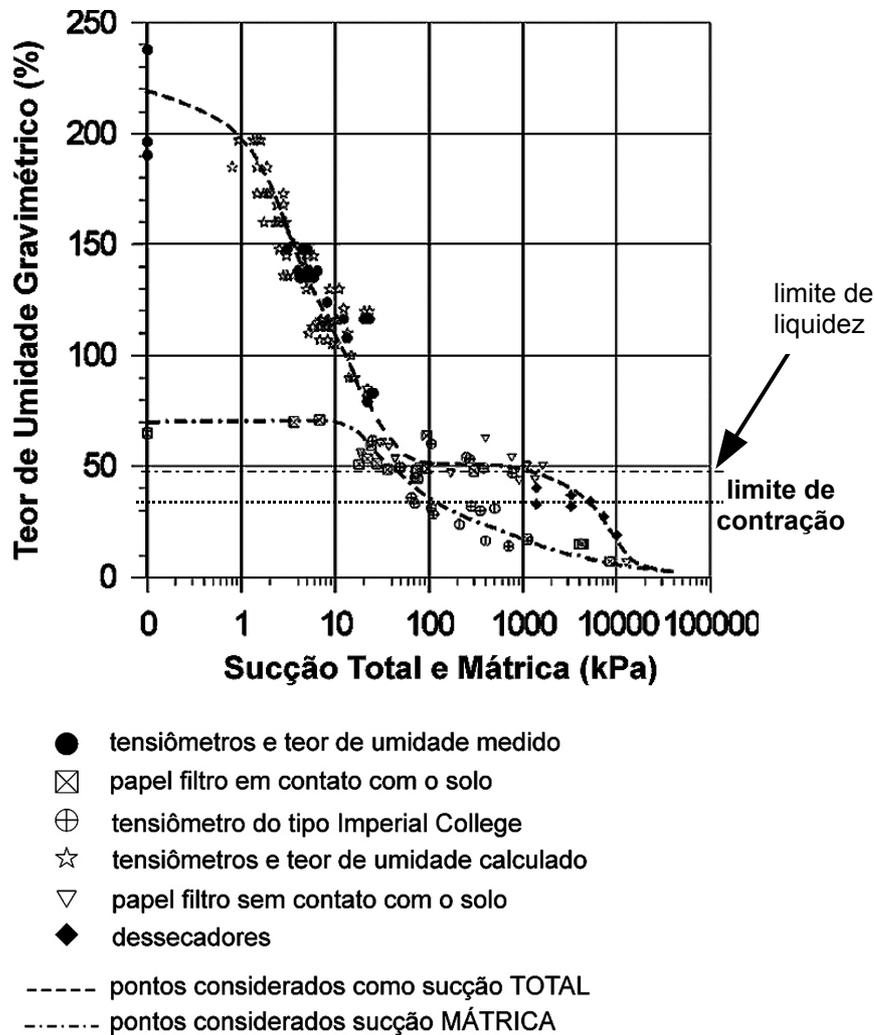


FIGURA 5.34: Resultados Obtidos das Diferentes Técnicas de Medição de Sucção para a Lama Vermelha OP Neutralizada.

Para proporcionar uma comparação direta entre algumas medidas efetuadas pelas diferentes técnicas, elas foram plotadas em separado da curva da Figura 5.34. Assim, na Figura 5.35, estão os dados obtidos pelo dessecador, considerados como de sucção total, os do papel filtro sem contato com o solo, também supostamente resultados de sucção total, e os medidos pelo transdutor do tipo Imperial College. Pode ser verificado que os resultados medidos pela técnica do papel filtro sem contato se ajusta bem aos obtidos com os dessecadores. Os

resultados do tensiômetro com os do papel filtro ficaram diferentes entre si para valores mais baixos de umidade. Na região do ponto de entrada de ar porém, o que se pode perceber é que vários registros do tensiômetro acusam elevados valores de sucção, se confundindo com os valores do papel filtro sem contato. Os valores mais baixos de sucção estarem no mesmo nível entre as diferentes técnicas na região do ponto de entrada de ar é algo compreensível, uma vez que neste teor de umidade, sucção total e matricial se confundem. Não foi encontrada nenhuma explicação para os valores mais altos de sucção registrados pelo tensiômetro.

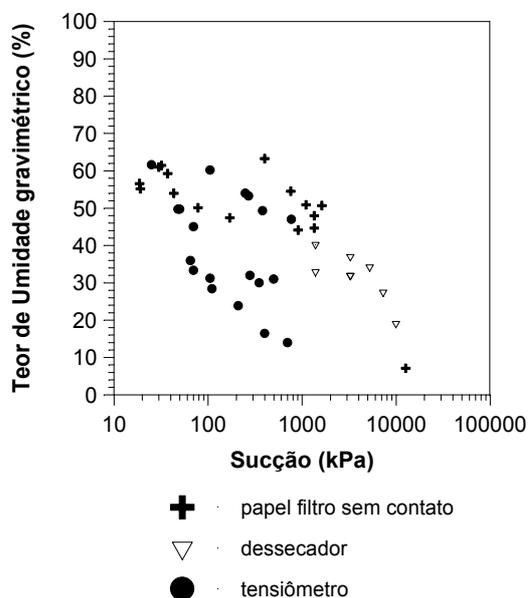


FIGURA 5.35: Comparação entre as Leituras Realizadas Pelo Papel Filtro Sem Contato, o Dessecador e o Tensiômetro.

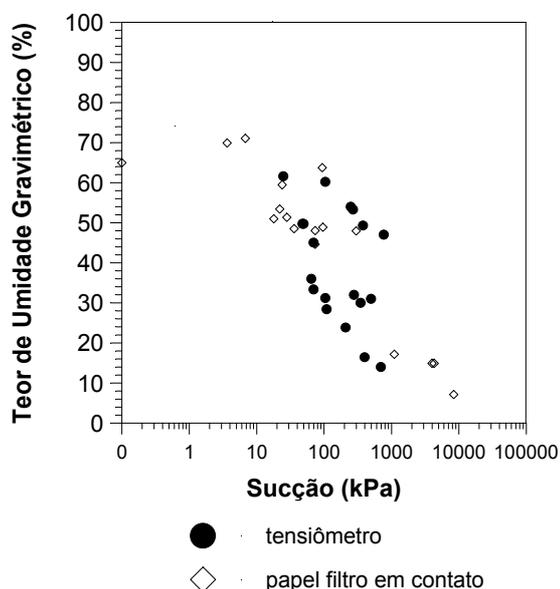


FIGURA 5.36: Comparação entre as Leituras Realizadas pelo Papel Filtro em Contato e o Tensiômetro do Tipo Imperial College.

Na Figura 5.36, estão os registros feitos pelo tensiômetro do tipo Imperial College e aqueles obtidos pela técnica do papel filtro, com o papel em contato com o resíduo. Pode ser verificado que há uma melhor concordância entre os valores fornecidos pelas duas técnicas. Também pode ser observado que o papel filtro em contato com o resíduo igualmente registrou alguns valores de sucção

elevados para teores de umidade em torno de 50%. Com base nestes resultados, pode se chegar a conclusão que os registros efetuados pelo tensiômetro do tipo Imperial College são em sua maioria, de sucção mátrica.

Um aspecto interessante de notar na Figura 5.34 é que a curva característica de sucção total mudaria de inflexão para se igualar à sucção mátrica à partir do teor de umidade equivalente ao limite de plasticidade, que neste caso está muito próximo ao limite de contração. Na figura também ressalta o teor de umidade considerado como limite de liquidez obtido pelo aparelho de Casagrande. Ele é menor que o valor de entrada de ar do resíduo. Como amostras foram moldadas com teor de umidade acima de 60%, fica evidente que o limite de liquidez determinado não está correto. O formato da curva característica de sucção total, com a acentuada descontinuidade na região do ponto de entrada de ar, é provavelmente devido a que grande parte da contração sofrida pelo resíduo durante o processo de secagem ocorreu justamente neste trecho de leituras executadas por meio dos mini tensiômetros, com teor de umidade variando de 220 a 60%. E a pressão causada nestes instrumentos devido à contração é justamente a inversa da provocada pela sucção. Assim, os tensiômetros na verdade devem ter registrado um valor intermediário de pressão entre a contração exercida pela lama ao secar e a sucção.

A Figura 5.37 mostra todas as leituras realizadas em relação ao teor de umidade volumétrico. A Figura 5.38 representa a mesma relação após eliminar os pontos que ficaram ou longe da tendência escolhida para a sucção com o teor de umidade gravimétrico, considerada base nas interpretações, ou quando se verificou as propriedades físicas da amostra usada para a medição da sucção em relação às das curvas de secagem e estas não se ajustaram. Por exemplo, se o teor de umidade volumétrico calculado estivesse muito fora da relação pré estabelecida entre esta grandeza e o teor de umidade gravimétrico de sua curva de secagem estabelecida previamente, essa medida foi ignorada. Esta comparação foi útil especialmente na definição da curva na região do ponto de entrada de ar, onde ocorria uma dispersão muito grande das leituras. Por estas figuras, é medido de acordo com a Figura 5.3, uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 15kPa e um teor de umidade volumétrico residual de 4%. A Figura 5.39 apresenta a relação obtida entre a sucção e grau de saturação após ter sido feita a

interpretação. O grau de saturação residual foi encontrado de ser 7% por esta figura.

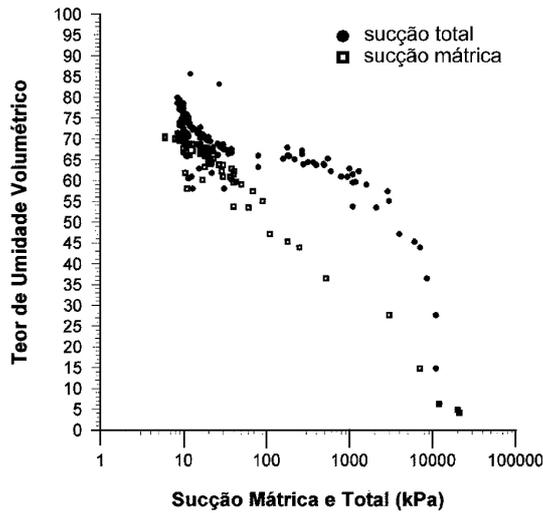


FIGURA 5.37: Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada Antes da Interpretação.

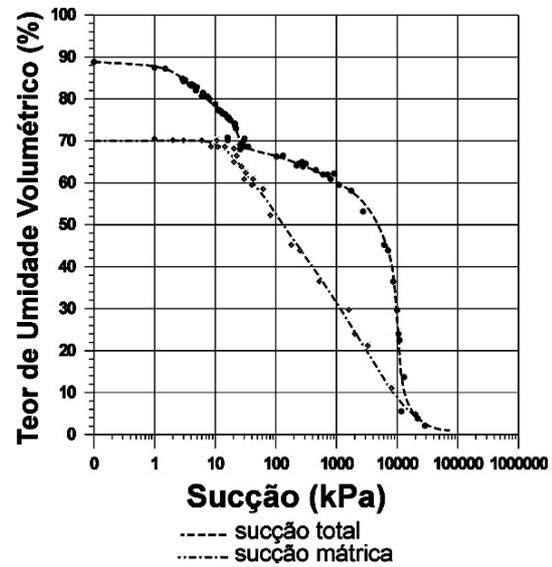


FIGURA 5.38: Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada Depois de Feita a Interpretação.

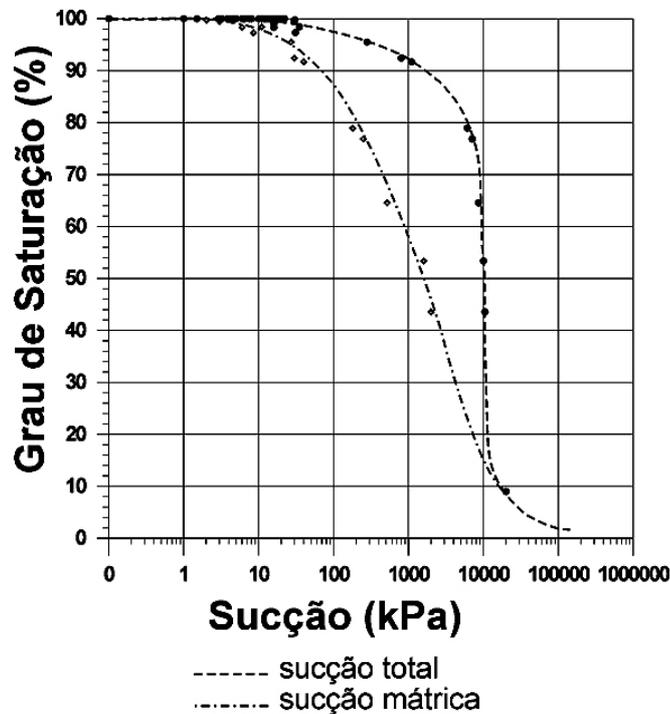


FIGURA 5.39: Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada em Relação ao Grau de Saturação Após a Interpretação.

Devido ao tipo de fluido presente, uma mistura de soda cáustica com ácido sulfúrico, é esperado existir uma elevada sucção osmótica nestes resíduos. O pó branco formado na superfície do material exposto ao ressecamento deve ser uma cristalização deste fluido na superfície. A análise deste pó através de difração por raios X, indicou que ele é de uma mistura de sódio com ácido sulfúrico, e foi classificado como thernardita (Na_2SO_4). O início de sua formação pode ser visto pela Figura 5.40.

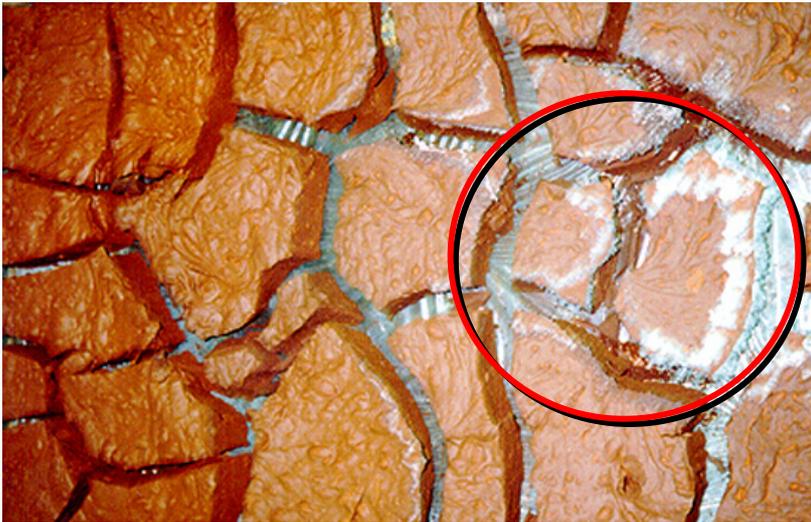


FIGURA 5.40: Formação de Cristais durante Ressecamento da Lama Vermelha OP Neutralizada .

Para se ter uma idéia do nível de sucção osmótica que poderia ser esperado neste material, foi feito um gráfico de onde simplesmente se subtraiu os valores de sucção matricial dos de sucção total apresentados nas Figuras 5.38 e 5.39. O resultado pode ser visto na Figura 5.41. Esta figura não representa os valores reais da sucção osmótica, especialmente para baixos valores de teor de umidade. A tendência é de ocorrer um aumento da sucção osmótica com o avanço do processo de ressecamento, à medida que também vai ocorrendo uma diminuição da capacidade de medição de sucção mátrica, de tal modo que a determinação da primeira via diferença da sucção total pela segunda fica comprometida (*Marinho, 2002*). Para teores de umidade mais elevados, contudo, pode-se ter uma melhor noção de qual seria o nível da sucção osmótica, e pela figura em questão, ele é verificado de estar aproximadamente em torno de

2000kPa quando o solo apresenta um grau de saturação de 90%. A comprovação, porém, só poderia ser feita via medição direta.

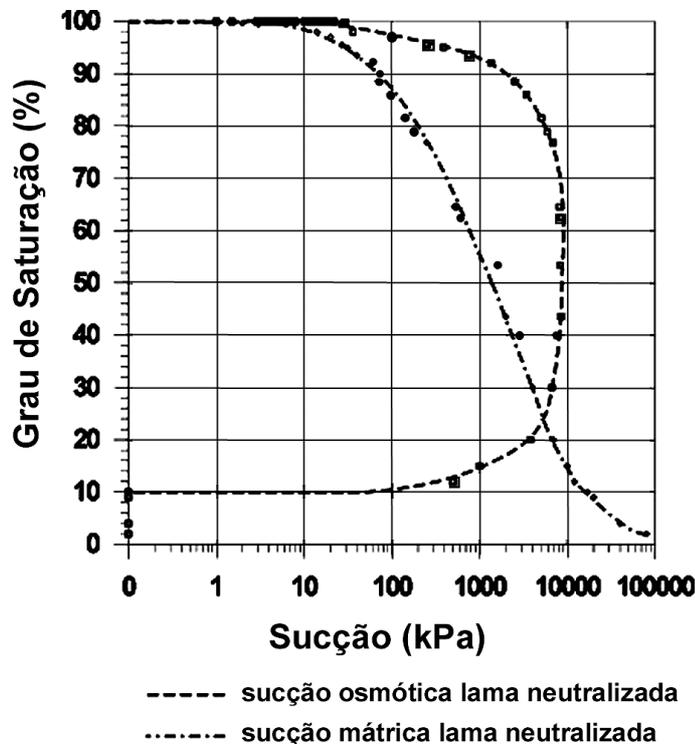
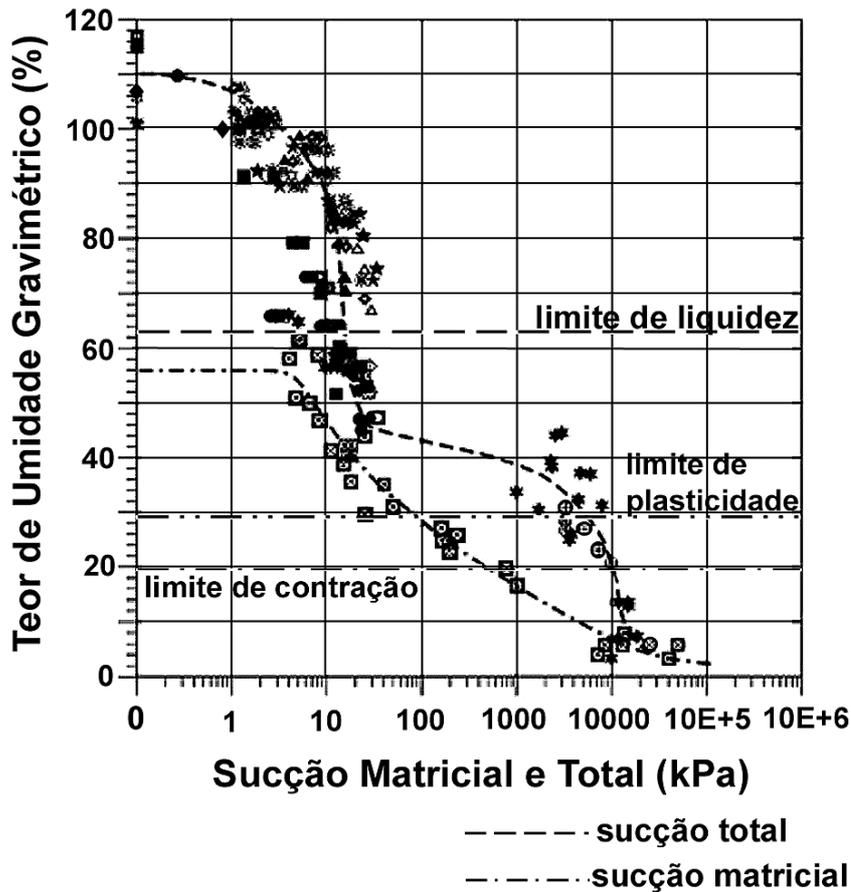


FIGURA 5.41: Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica na Lama Vermelha OP Neutralizada .

5.4.2

Curva Característica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

Com a lama vermelha OP não neutralizada não foram executados ensaios com o tensiômetro do tipo IC. O motivo foi por já se ter uma grande bem razoável de medidas executadas com as outras técnicas. A Figura 5.42 resume todos os valores obtidos, mais a interpretação que foi realizada por estes pontos, definindo a curva característica de sucção matricial e total. As leituras feitas com os mini tensiômetros instalados no resíduo durante a secagem foram considerados como sucção total pelo mesmo motivo explicado para o caso da lama vermelha OP neutralizada. As considerações feitas sobre preparação das amostras também se aplicam para este caso.



- Sucção medida no ponto 01 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◇ Sucção medida no ponto 02 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◆ Sucção medida no ponto 03 – caixa 01 – 5cm de prof.
- Sucção medida no ponto 04 – caixa 01 – 5cm de prof.
- Sucção medida no ponto 05 – caixa 01 – 5cm de prof.
- ◻ Sucção medida no ponto 13 – caixa 02 – 5cm de prof.
- ◊ Sucção medida no ponto 06 – caixa 01 – 10cm prof.
- △ Sucção medida no ponto 07 – caixa 01 – 10cm prof.
- ▲ Sucção medida no ponto 14 – caixa 02 – 10cm prof.
- ☆ Sucção medida no ponto 08 – caixa 01 – 15cm prof.
- ★ Sucção medida no ponto 09 – caixa 01 – 20cm prof.
- ⊕ Sucção medida no ponto 10 – caixa 01 – 20cm prof.
- ⊗ Sucção medida no ponto 15 – caixa 02 – 20cm prof.
- ⊠ Papel filtro em contato
- ★ Papel filtro sem contato
- ⊕ Dessecadores

FIGURA 5.42: Resultados Obtidos das Diferentes Técnicas de Medição de Sucção para a Lama Vermelha OP Não Neutralizada.

Na Figura 5.42 também pode ser notado que a curva característica de sucção total mudaria de inflexão para se igualar à sucção matricial próximo ao

teor de umidade equivalente ao limite de plasticidade, como no caso da lama vermelha OP neutralizada. O formato da curva característica de sucção total, com a acentuada descontinuidade, também é creditada de ser devido a que grande parte da contração sofrida pelo resíduo durante o processo de secagem ocorreu justamente neste trecho de leituras executadas por meio dos mini tensiômetros, com teor de umidade variando de aproximadamente 120 a 50%. E, como assumido anteriormente, os tensiômetros na verdade devem ter registrado um valor intermediário de pressão entre a contração exercida pela lama ao secar e a sucção.

A Figura 5.43 representa a relação entre a sucção e o teor de umidade volumétrica, obtida à partir das curvas de secagem e já após eliminar os pontos no mesmo procedimento já explicado anteriormente. Por esta figura, pode ser verificada uma sucção de entrada de ar de aproximadamente 5kPa, contra 15kPa da lama vermelha OP neutralizada, e um teor de umidade volumétrico residual de 5%, muito próximo do encontrado para a lama vermelha OP neutralizada (4%). Esta diferença no valor 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. A lama vermelha OP neutralizada foi preparada com um teor de sólidos inicial muito mais baixo que a não neutralizada. Isto pode ter levado à formação de estruturas diferentes após a sedimentação e o adensamento. A Figura 5.44 apresenta a relação obtida entre a sucção e grau de saturação, de onde foi verificado que o grau de saturação residual foi encontrado de ser 6%, também muito próximo ao registrado para a lama vermelha OP neutralizada (7%).

E também com o intuito de se ter uma idéia do nível desta sucção osmótica no resíduo, foi feito um gráfico semelhante ao da lama vermelha OP neutralizada, de onde simplesmente se subtraiu os valores de sucção mátrica dos de sucção total apresentados nas Figuras 5.43 e 5.44. O resultado pode ser visto na Figura 5.45, em relação ao teor de umidade volumétrico, e na 5.46, em relação ao grau de saturação. Sabe-se muito bem que este tipo de curva não representa corretamente o valor da sucção osmótica, como já discutido anteriormente, mas o valor registrado nestas figuras para elevados teores de umidade e baixos níveis de sucção matricial medidos devem estar próximos do real. Assim, pode ser verificado pela figura que para um grau de saturação de 90%, há uma sucção

osmótica em torno 1000kPa, menor da que foi registrada para a lama vermelha OP neutralizada, que para o mesmo grau de saturação, já acusava 2000kPa.

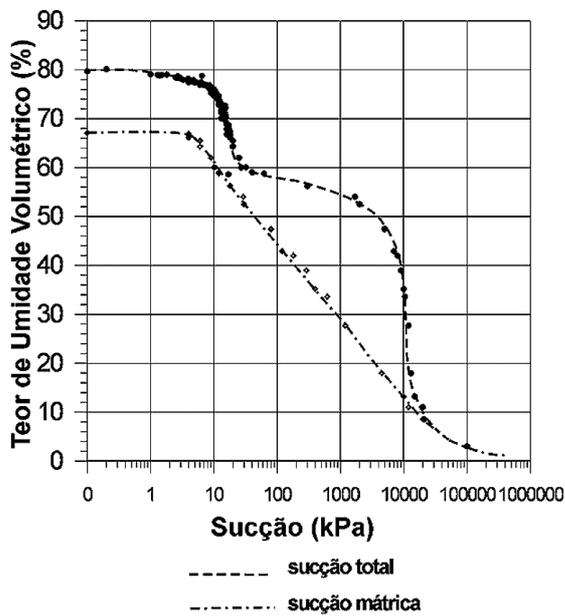


FIGURA 5.43: Curva Característica da Lama Vermelha OP Não Neutralizada em Relação ao Teor de Umidade Volumétrica Após a Interpretação.

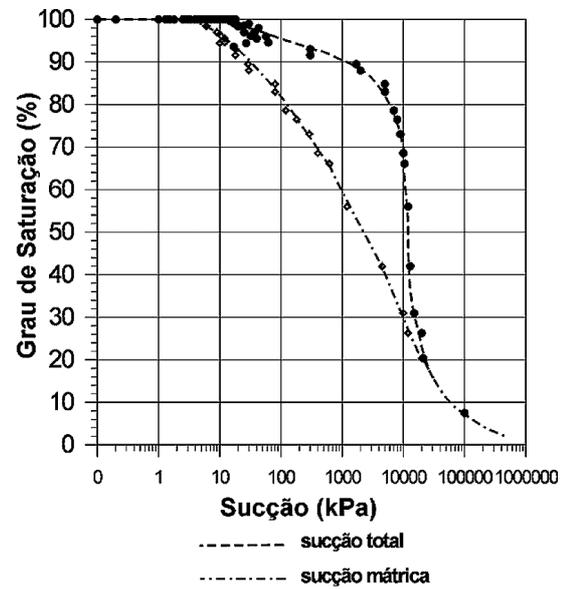


FIGURA 5.44: Curva Característica da Lama Vermelha OP Neutralizada em Relação ao Grau de Saturação Após a Interpretação.

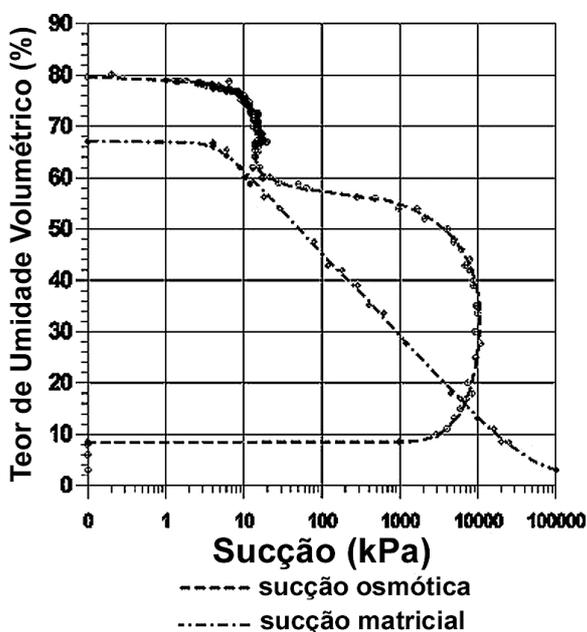


FIGURA 5.45: Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica em Relação ao Teor de Umidade Volumétrica na Lama Vermelha OP Neutralizada.

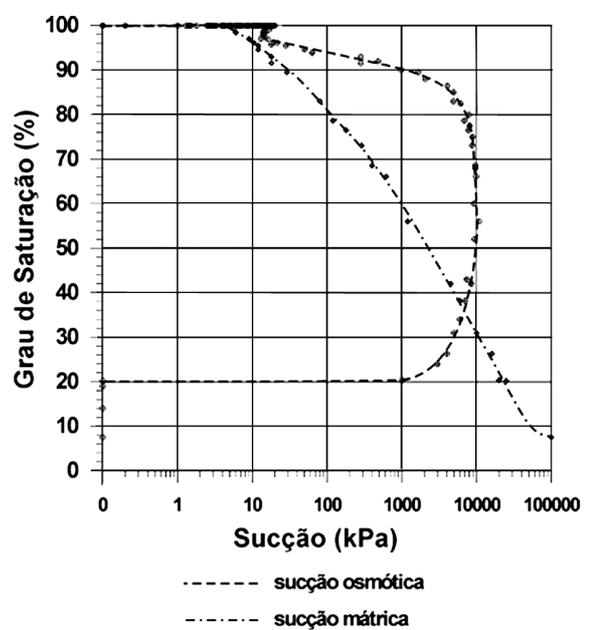


FIGURA 5.46: Estimativa Precária do Nível de Sucção Osmótica em Relação ao Grau de Saturação na Lama Vermelha OP Neutralizada.