

4

Curvas de Secagem e Resistência a Tração dos Resíduos

4.1

Introdução

Um dos pontos principais para entendimento do processo de ressecamento dos resíduos é o acompanhamento da variação de suas propriedades à medida que vai perdendo umidade. Uma definição clara de como variam os índices físicos dos resíduos com o teor de umidade ou o grau de saturação permitirá prever todo o processo de ressecamento e, conseqüentemente, entender mais claramente o fenômeno da contração do solo, ainda mais quando tem seus poros preenchidos por um fluido que não a água. Assim, o comportamento de campo de reservatórios expostos ao ressecamento solar poderá ser previsto com uma menor dose de empirismo.

O estudo desta variação de índices físicos com o teor de umidade e grau de saturação feito para os resíduos de mineração e processamento de bauxita é um dos tópicos que será descrito a seguir. Ele foi feito pela retirada contínua de amostras ao longo do ensaio de secagem em lisímetros, ensaios estes que serão descritos em um capítulo mais adiante. Com a medição do volume destas amostras, a medição do teor de umidade e conhecimento de suas densidades total e relativa dos grãos, se conseguia, então a determinação de todos os outros índices físicos, o que eu permitiu, então, a montagem das chamadas “curvas de secagem”. Este será o nome dado às relações entre os índices físicos e o teor de umidade e grau de saturação, bem como as relações entre os mesmos e a resistência à tração, obtidas para os resíduos analisados. São descritos todos os procedimentos de ensaio adotados e métodos de análise empregados. Pretende-se, assim, conseguir

uma descrição do processo de contração a que são submetidos durante o processo de ressecamento.

Uma das conseqüências diretas do processo de secagem é o trincamento do solo, que presumivelmente ocorre quando as forças atrativas entre as partículas que surgem com o aumento da sucção à medida que o solo seca, supera a resistência à tração do solo. Esta, por sua vez, seria uma resultante, entre outras coisas, das ligações físico-químicas agindo entre partículas. Estas ligações provavelmente irão aumentar à medida que o solo seca, até um momento em que toda a estrutura esteja afetada pelo fissuramento e reduz a resistência a tração da massa de solo como um todo (*Favaretti, 1995*). Portanto, para o completo entendimento de todo o processo de secagem, que culmina invariavelmente no trincamento do solo, é necessário o estudo da resistência à tração e de sua relação com os teores de umidade e grau de saturação.

A medição da resistência à tração dos rejeitos foi realizada e é o outro tópico abordado ao longo deste capítulo. Ela foi determinada por meio de ensaios de compressão diametral, ou ensaio brasileiro, conforme técnica proposta por Krishnayya & Eisenstein (1974), Maciel (1991); Das e outros (1995) e Favaretti (1995). Estes ensaios consistem em comprimir transversalmente cilindros de solo, que se romperiam à tração ao longo do diâmetro da seção transversal. Foram realizados uma série destes testes a diferentes teores de umidade e os resultados de resistência à tração puderam ser correlacionados, então, com outras propriedades índices dos resíduos.

4.2

Generalidades Sobre a Contração de Solos

O estudo da contração de solos tem sido realizado já há muito tempo, especialmente sob o ponto de vista da agricultura e pesquisadores da área da física dos solos. Uma revisão deste histórico pode ser obtido em Marinho (1994) e Oliveira Filho (1998). Estes autores citam o trabalho de Tempany (1917) como o

primeiro que teria sugerido a existência de uma fase de contração, onde para amostras totalmente saturadas, a variação de volume seria igual ao volume de água evaporada. Desta maneira, não haveria interferência do atrito interno entre as partículas durante a contração. Igualmente citado por Marinho (1994) e Oliveira Filho (1998) está o trabalho de Haines (1923), que teria apresentado uma interpretação mais completa do fenômeno da contração. Ele verificou que ela ocorria em estágios, e seria relacionada à quantidade e natureza da fração tamanho argila presente no solo. Também observou que a curva de contração, uma relação entre o volume de água e o volume de solo, consistiria de duas linhas retas. A primeira, no início do processo, corresponderia à fase de contração citada anteriormente. A segunda, chamada de contração residual, representaria a fase em que a água perdida por evaporação seria substituída por ar.

Citado em Marinho (1994), Terzaghi (1925) teria concluído que a única diferença entre uma compressão artificial sob imposição de cargas e uma contração natural devido a secagem seria que a compressão poderia ser sustentada indefinidamente, enquanto que a contração devido à evaporação atingiria um ponto além do qual o volume permaneceria constante. Uma outra referência citada em Marinho (1994), é a de Stirk (1954). Este autor teria concluído que há uma correlação entre a proporção de partículas menores que $2\mu\text{m}$ e o valor da sucção no término da contração. Como os materiais que serão analisados aqui foram verificados de possuir uma grande quantidade de partículas muito finas em proporção variada entre si, a diferença de comportamento entre eles, especialmente entre a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada, poderá ser explicado pelo tipo e quantidade desta fração.

Resumindo, de acordo com Marinho (1994) a capacidade do solo contrair dependeria do tipo de solo e a quantidade de contração apresentada, seria função da composição mineralógica, estrutura do solo e teores de umidade final e inicial. A redução em volume seria similar àquela provocada por compressão mecânica, enquanto o solo estivesse saturado ou próximo à saturação. Para Sridharan & Prakash (1998), o limite de contração dos solos seria governado pela sua distribuição granulométrica e, mesmo que a fração tamanho argila tenha uma grande importância no fenômeno, existiria um teor de argila ótimo, no qual o solo

apresentaria a sua contração mínima, não havendo relação entre o limite de contração do solo com suas características de plasticidade.

A variação de volume dos solos devido a contração é representada de uma maneira muito útil através da relação o índice de vazios e o teor de umidade. De acordo com Bronswijk (1988), Tariq & Durnford (1993) e Oliveira Filho (1998), esta seria a “curva característica de contração” do solo. Marinho (1994) também recomenda a representação dentro deste gráfico, de curvas de igual saturação. Esta mesma relação foi usada na determinação do limite de contração no capítulo passado. A Figura 4.1 mostra esta curva, agora destacando as três faixas de modos de contração geralmente apresentados pelos solos (*Oliveira Filho, 1998*). A região de “contração normal” seria aquela linear, que se inicia em elevados teores de umidade e é caracterizada pelo fato do volume de solo contraído ser igual ao do volume de fluido evaporado. A faixa seguinte, chamada de “contração residual”, mostra uma redução na taxa de variação de volume do solo, implicando em um aumento de volume de ar, que iria substituindo o fluido removido. A última região do gráfico, denominada de “contração zero”, é aquela em que o solo não mais varia de volume, tendo atingido sua densidade máxima para esta situação, mesmo havendo continuidade da perda de fluido para a atmosfera. De acordo com Bromswijk (1988), estas características idealizadas pela Figura 4.1 podem se diferenciar muito quando comparadas com situações de campo, dependendo dos valores de entrada de ar que os solos apresentarem.

Segundo Olsen & Haugen (1998), haveria um quarto estágio na curva característica de contração, associada a solos estruturados, na qual ele ainda muito úmido tem seus macroporos drenados sem que haja qualquer redução de volume. Este estágio seria chamado de “contração estrutural”. Estes mesmos autores, citando o trabalho de Bronswijk & Evers-Vermeer (1990), afirmam que solos remoldados não apresentariam tal estágio.

Na Figura 4.2 estão, no item (a), a curva de contração juntamente com as curvas de iso-saturação e, no (b) os três tipos de comportamento que uma amostra inicialmente saturada poderia exibir durante o processo de secagem, o que ocorreria em função da distribuição granulométrica e da história de tensões. A Figura 4.3 ressalta as relações físicas na curva de contração, sendo o item (a) para

uma amostra inicialmente saturada e o (b), para uma não saturada no começo do processo. Nesta curva do item (b), poderia se ter uma fase representada pelo segmento AB, durante o qual a saturação permaneceria constante ou outro, no qual ele variaria (segmento AC) (Marinho, 1994). Durante o processo de secagem e conseqüente contração, o solo deixaria de ser plástico, podendo trincar à partir de um determinado teor de umidade. Uma explicação do processo de contração sob o ponto de vista termodinâmico pode ser encontrada em Sposito (1973).

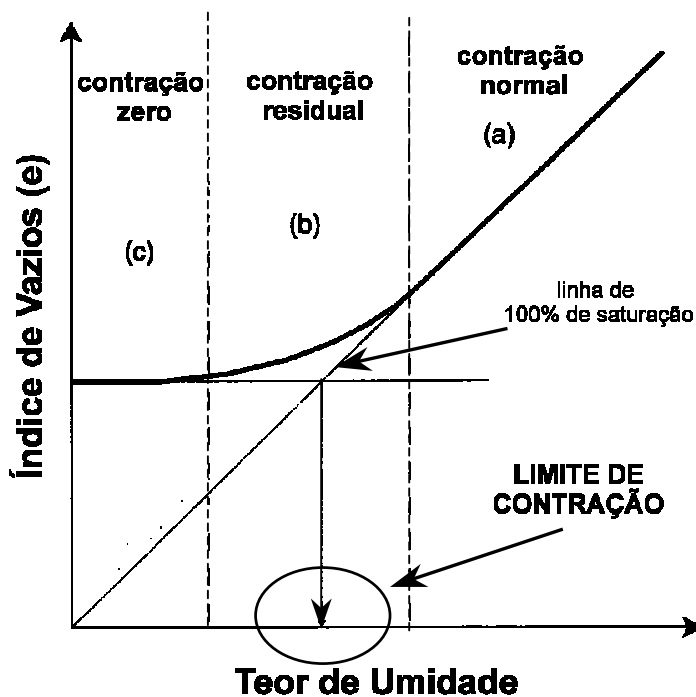


FIGURA 4.1: Forma Geral da Curva de Contração e suas Distintas Fases (*adaptado de Oliveira Filho, 1998*)

Algumas relações empíricas também tem sido apresentadas para descrever o processo (por exemplo, McGarry & Malafant, 1987). Através da curva característica de contração, Olsen & Haugen (1998) também propõe um modelo para cálculo da área potencial de trincamento devido ao ressecamento. Fredlund et al. (2002) apresentaram uma equação matemática que descrevem curvas de contração, bem como um método teórico para a sua estimativa, baseando-se no formato hiperbólico que elas apresentam, independente do tipo e estado inicial do solo. Groenevelt & Grant (2002) apresentam uma proposta para interpretação da

curva característica de contração, que permitiria, segundo eles, uma determinação mais acurada dos limites de consistência do solo à partir dela.

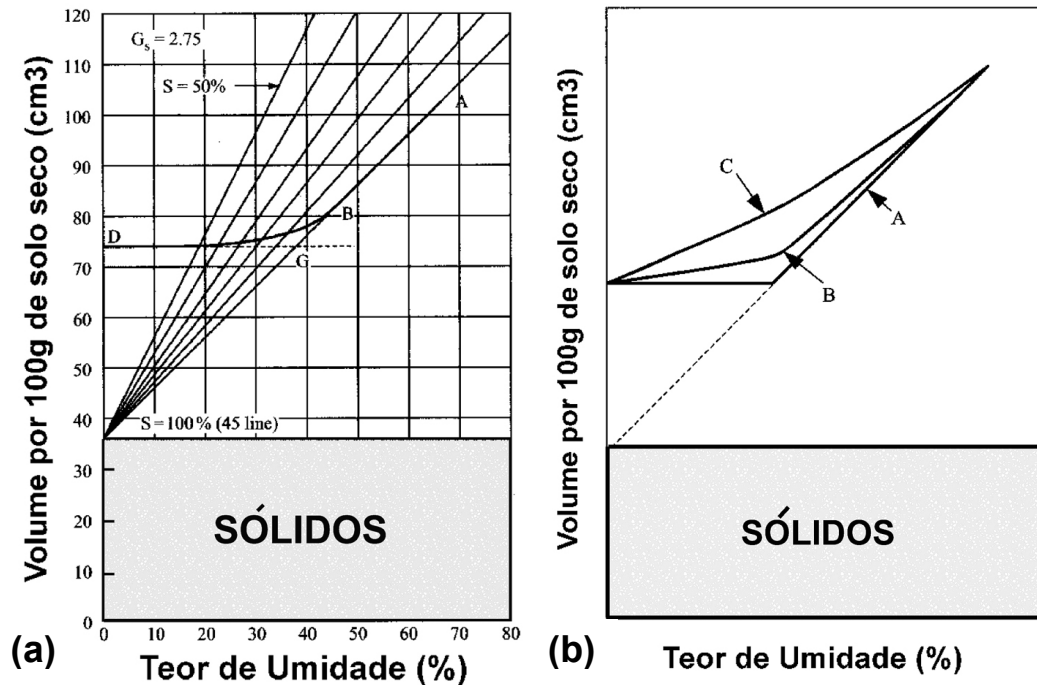


FIGURA 4.2: Fenômeno de Secagem: (a) Linhas Teóricas para Grau de Saturação Constante e (b) Tipos de Curvas de Contração (adaptado de Marinho, 1994)

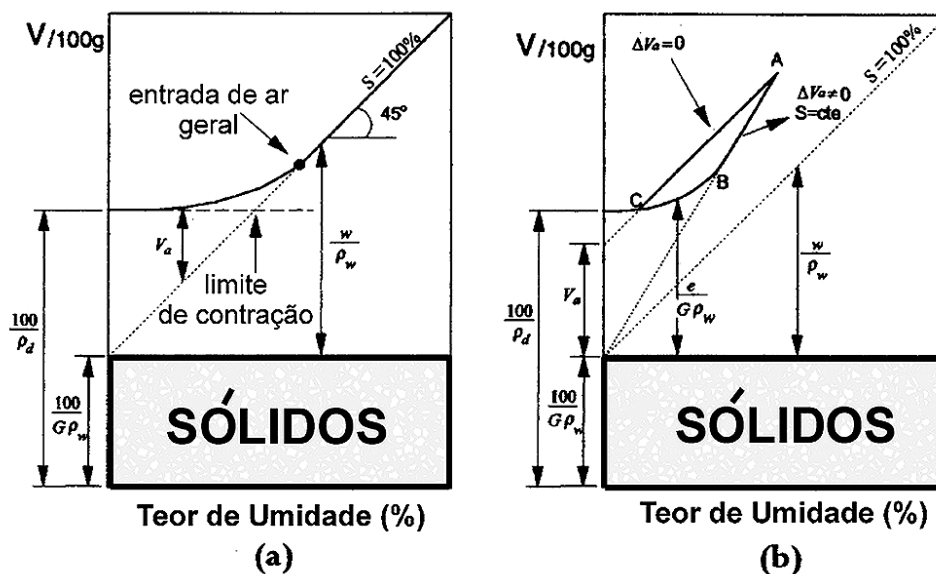


FIGURA 4.3: Relações Físicas na Curva de Secagem (a) Amostra Saturada e (b) Amostra Não Saturada (adaptado de Marinho, 1994)

4.3

Metodologia de Execução e Interpretação Ensaio

A obtenção das curvas de secagem foram feitas pela medição sistemática do volume e do teor de umidade de amostras coletadas durante o ensaio de secagem realizado nos lisímetros. Estes ensaios serão apresentados em um capítulo mais adiante, mas em resumo, são caixas onde uma grande quantidade de resíduos foi lançada, homogeneizada, deixada adensar por peso próprio por um período de, em geral, uma semana. Depois, estas caixas foram expostas a uma simulação de ressecamento solar. Estes recipientes eram apoiados sobre balanças, de modo que toda a quantidade de umidade evaporada era registrada. Um amostrador do tipo pistão estacionário de diâmetro bem fino era usado semanalmente para a coleta das amostras. Essas, a medida que iam sendo expulsas do pistão, tinham suas dimensões medidas e era, então, pesadas e conduzidas para estufa por 24 horas. Dados obtidos de amostras preparadas para uso em outros ensaios, tais como resistência a tração, técnica do papel filtro e tensiômetro também foram anexados a estes. Em todos os casos, a preparação seguiu o mesmo método, ou seja, o resíduo era misturado ao seu soro característico (neutralizado ou cáustico), deixado sedimentar e adensar por peso próprio, e então exposto a secagem. A parte final das curvas de secagem foi obtida quase que de uma maneira geral, à partir de amostras secas em estufa.

Uma vez todos os índices físicos calculados, as relações entre eles eram plotadas. Todos os gráficos eram comparados e aqueles pontos que não estavam se ajustando em alguma curva, eram eliminados. Um exemplo deste procedimento está representado na Figura 4.4. O item (a) desta figura mostra a relação inicial obtida para a lama vermelha OP neutralizada entre o teor de umidade gravimétrico e o volumétrico antes da eliminação dos pontos. Pode ser visto que algumas medições estão nitidamente fora da tendência mostrada pela maioria. Elas foram, portanto, eliminadas, bem como outras que, mesmo estando inicialmente dentro da curva de tendência para esta relação, não estavam para outras, como por exemplo, entre o teor de umidade gravimétrico e índice de vazios. O resultado final após a eliminação de uma série de medidas é o mostrado pela item (b) da mesma figura.

Este cruzamento entre todas as relações entre os índices físicos foi especialmente útil na definição das curvas com o grau de saturação. Estas foram as que apresentaram a maior sensibilidade aos erros de medição da geometria da amostra, sendo que uma diferença de 1 a 2mm na altura da mesma implicava em um erro de aproximadamente 10% no cálculo do grau de saturação. O refinamento conseguido na relação entre o teor de umidade gravimétrico e o grau de saturação da lama vermelha OP neutralizada pode ser visto na Figura 4.5. No item (a), está a curva com todos os pontos medidos, havendo uma grande dispersão principalmente próximo à região de dessaturação. No item (b), está a mesma relação após a eliminação de diversos pontos que também não se ajustaram bem às outras relações entre outros índices físicos. O teor de umidade de dessaturação ficou, agora, bem evidente.

4.4

Curvas de Secagem da Lama Vermelha OP Neutralizada

Será apresentado à seguir, as relações que foram consideradas mais relevantes obtidas entre os índices físicos durante a secagem da lama vermelha OP neutralizada. Na Figura 4.6 está novamente a relação entre o índice de vazios e o teor de umidade gravimétrico, a curva de contração característica, agora relacionada à curva de 100% de saturação, calculada para um valor de densidade relativa dos grãos de 3,4. Fica claro que o início do processo de secagem se dá com todas as amostras saturadas. Também está ressaltado na figura, o ponto de entrada de ar na amostra, ou seja, o seu momento de dessaturação. 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%.

Na Figura 4.7 está a mesma curva de contração, agora em relação ao teor de umidade volumétrico. A relação entre o teor de umidade gravimétrico e o volumétrico está Figura 4.8, e pode ser notado que a mudança de inclinação desta

curva se dá nas proximidades do ponto de entrada de ar geral, ou seja, para um teor de umidade gravimétrico de 68%.

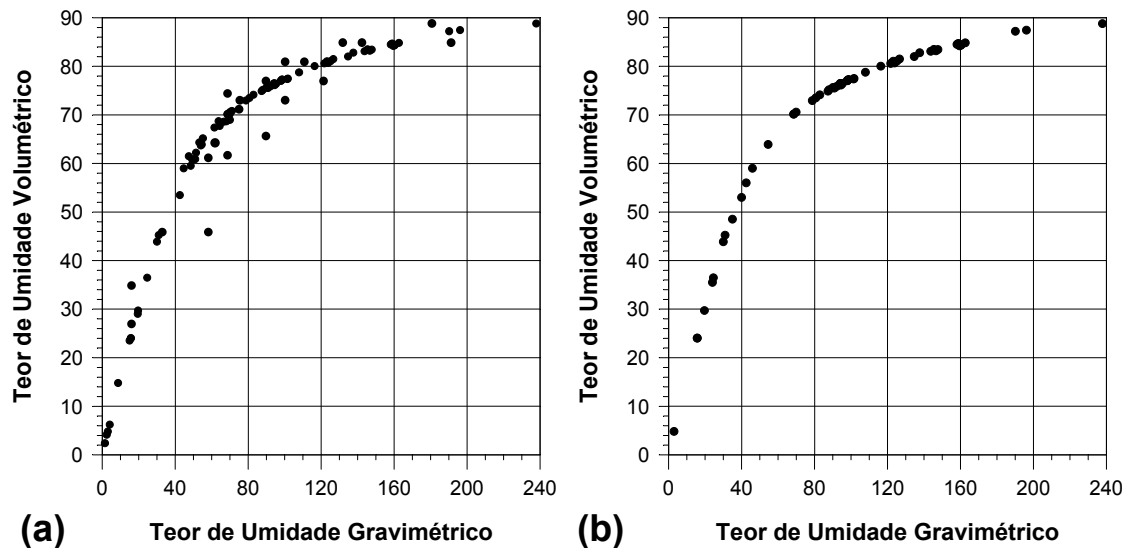


FIGURA 4.4: Exemplo de Interpretação Feito nas Curvas de Secagem: (a) Gráfico com todos os pontos medidos e (b) Relação final após cruzamento de todas as relações entre os índices físicos.

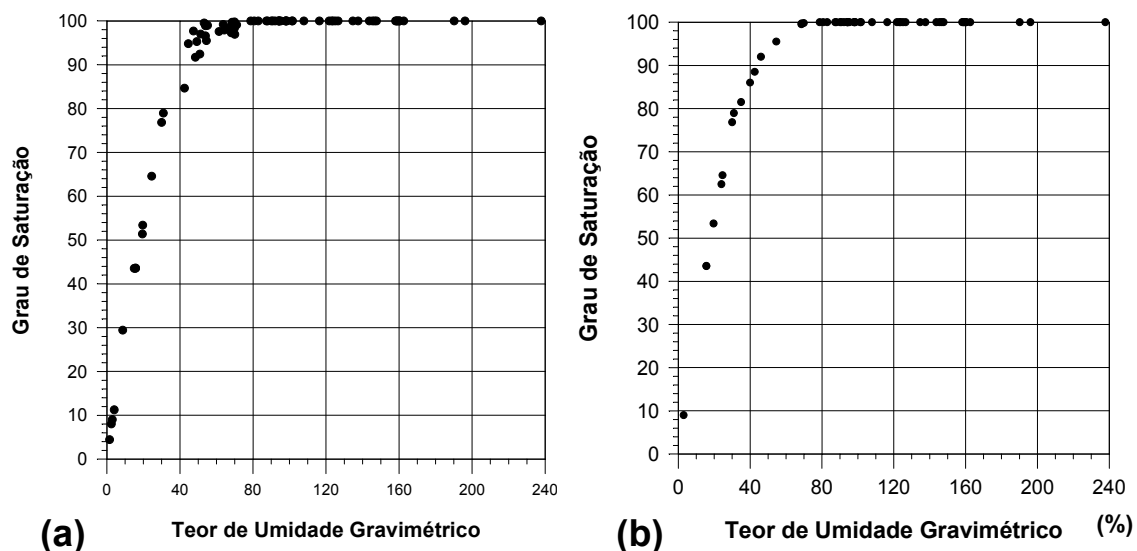


FIGURA 4.5: Exemplo de Interpretação Feito nas Curvas de Secagem: (a) Gráfico com todos os pontos medidos e (b) Relação final após cruzamento de todas as relações entre os índices físicos.

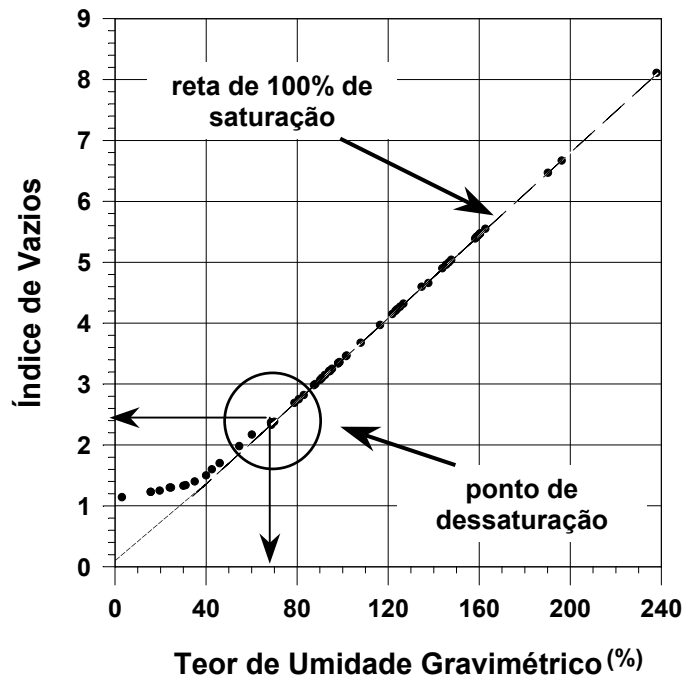


FIGURA 4.6: Curva Característica de Contração da Lama Vermelha OP Neutralizada.

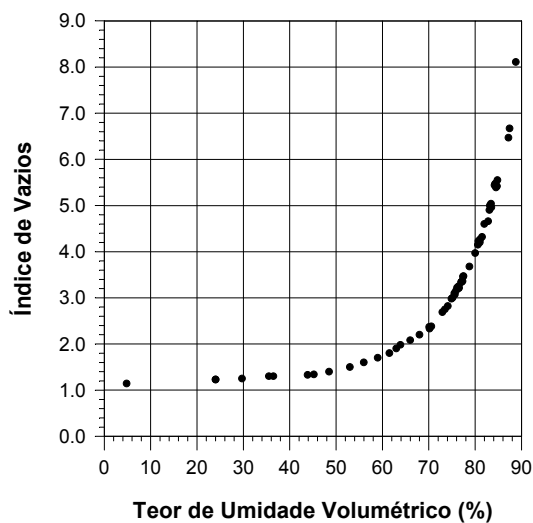


FIGURA 4.7: Curva de Secagem da lama vermelha OP neutralizada: índice de vazios contra teor de umidade volumétrica.

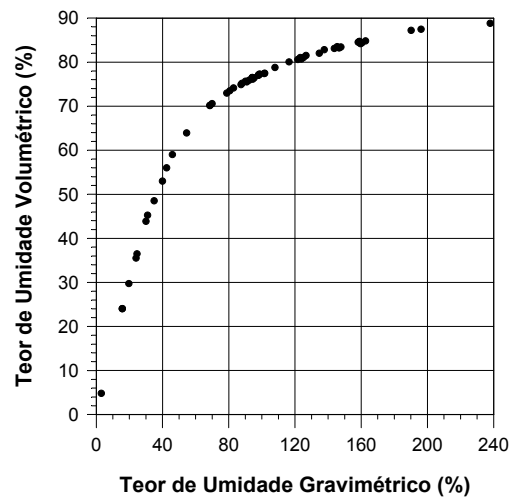


FIGURA 4.8: Curva de Secagem da lama vermelha OP neutralizada: teor de umidade volumétrica contra o gravimétrico.

A Figura 4.9, itens (a) a (d), mostra as relações obtidas associadas ao grau de saturação, respectivamente com o teor de umidade gravimétrica, o volumétrico, o índice de vazios e a porosidade. Em todas elas, o ponto de entrada de ar geral está bem definido. A Figura 4.10 apresenta a relação entre o teor de

umidade volumétrica e a porosidade, mostrando que onde esta relação deixa de ser linear e com uma inclinação igual a 45° , está o ponto de dessaturação do solo, como era de se esperar. A segunda mudança de inclinação, próximo à porosidade de 0,57, corresponde aproximadamente à região onde está o limite de contração. Em todos os casos, a densidade relativa dos grãos (G) foi adotada ser 3,4.

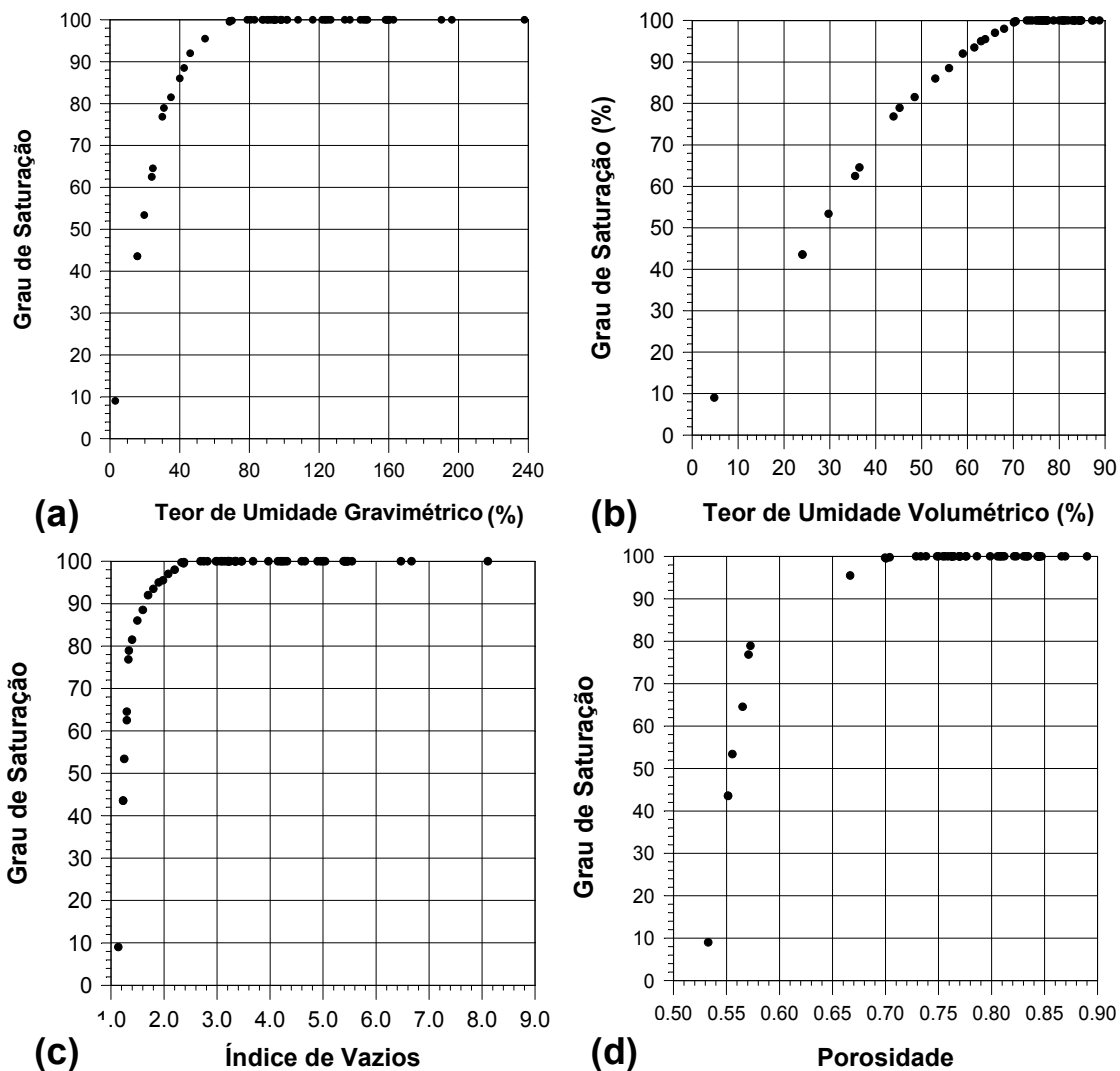


FIGURA 4.9: Curvas de secagem da lama vermelha OP neutralizada em relação ao grau de saturação e: (a) o teor de umidade gravimétrica; (b) o teor de umidade volumétrica; (c) o índice de vazios e (d) a porosidade.

A Figura 4.11 mostra as relações entre a densidade total dos resíduos e o teor de umidade gravimétrica e o índice de vazios, sempre adotando um G constante de 3,4. Percebe-se que a densidade total máxima, $1,95\text{kg/m}^3$, ocorre

justamente para o teor de umidade correspondente ao limite de contração (32%). Na região do ponto de dessaturação, pode ser percebida uma ligeira dispersão dos pontos, com uma pequena mudança de inclinação na relação entre os dois índices físicos.

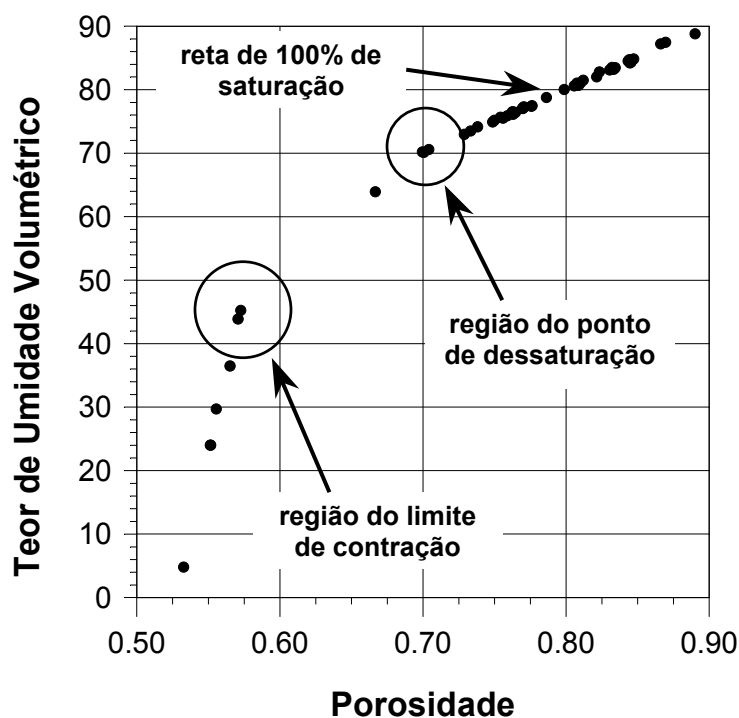


FIGURA 4.10: Curva de Secagem da Lama Vermelha OP Neutralizada: relação entre o teor de umidade volumétrico e a porosidade.

Na Figura 4.12 estão as mesmas relações, agora para a densidade seca. O valor máximo encontrado foi de $1,73\text{kg/m}^3$. Na mesma figura estão representadas as funções que melhor se ajustaram a estas relações. No caso do gráfico densidade seca contra o teor de umidade gravimétrico, esta função foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,98. Para o gráfico densidade seca contra índice de vazios, a melhor função de ajuste já foi do tipo potencial, com um coeficiente de determinação de 0,99. Com estas relações, fica muito simples a partir de uma medida de teor de umidade gravimétrico e conhecido o G , determinar qual o índice de vazios da amostra e, conseqüentemente, qualquer outro índice físico que se queira.

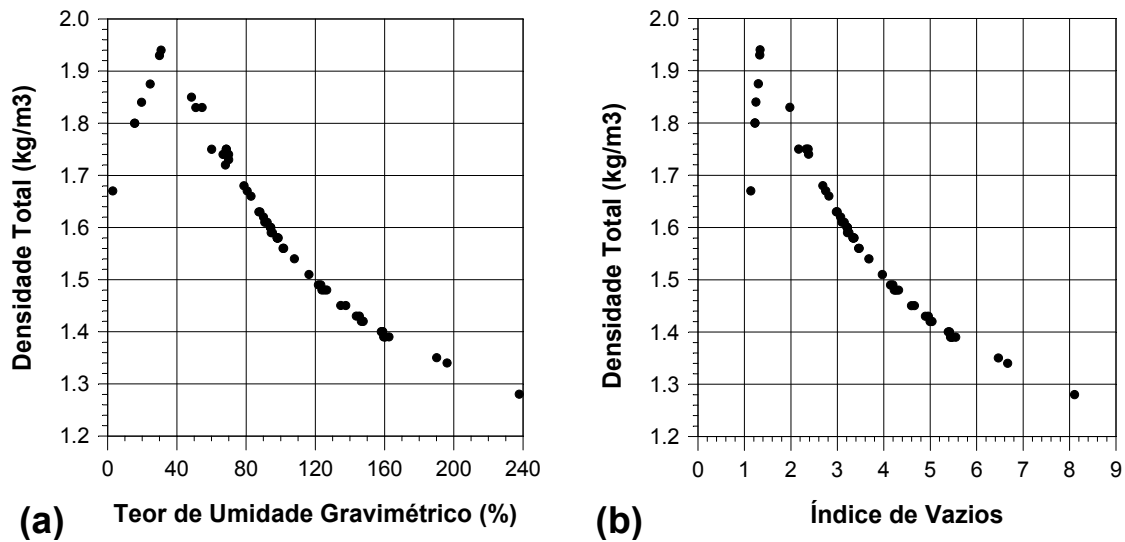


FIGURA 4.11: Curvas de secagem da lama vermelha OP neutralizada em relação à densidade total e: (a) teor de umidade gravimétrico e (b) índice de vazios.

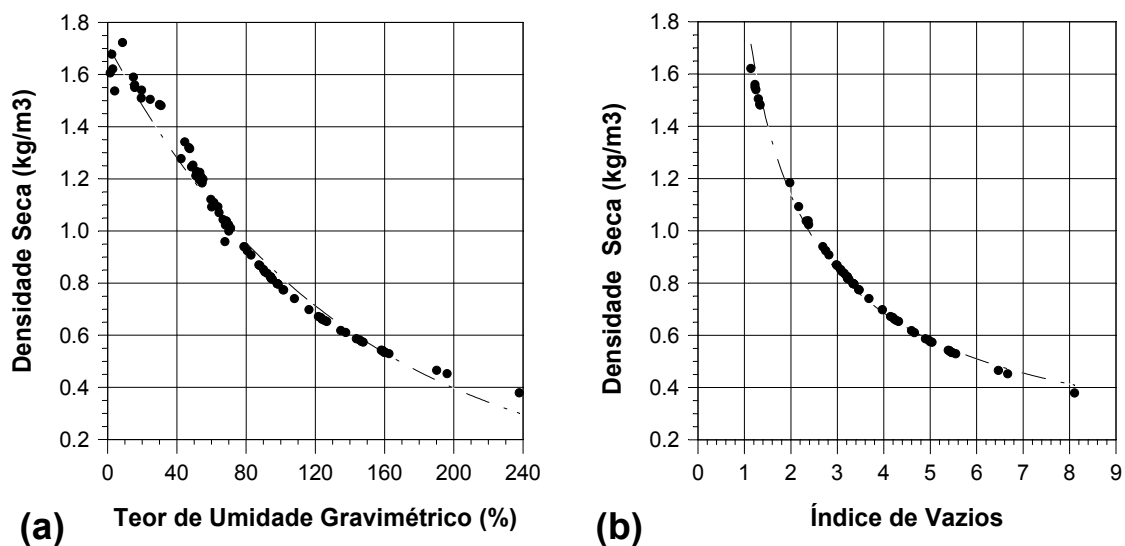


FIGURA 4.12: Curvas de secagem da lama vermelha OP neutralizada em relação à densidade seca e: (a) teor de umidade gravimétrico e (b) índice de vazios.

As equações referentes às funções mostradas na Figura 4.11 são:

$$\rho_{seco} (kg / m^3) = 1,716 \cdot e^{(-7,32 \times 10^{-3} \cdot \text{teor de umidade em } \%)} \quad (4.1)$$

$$\rho_{seco} (kg / m^3) = 1,872 \cdot (\text{índice de vazios})^{-0,721} \quad (4.2)$$

Na equação (4.1), o “e” corresponde a base do logaritmo neperiano.

4.5

Curvas de Secagem da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

Será apresentado à seguir, as relações obtidas entre os índices físicos durante a secagem da lama vermelha OP não neutralizada, da mesma maneira que a seção anterior. Na Figura 4.13 está a relação entre o índice de vazios e o teor de umidade gravimétrico, a curva de contração característica, relacionada à curva de 100% de saturação, calculada para um valor de densidade relativa dos grãos de 3,55. Também nestes ensaios, o início do processo de secagem se dá com todas as amostras estando saturadas. Também está ressaltado na figura, o ponto de entrada de ar na amostra, ou seja, o seu momento de dessaturação. Para este caso, ele 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.

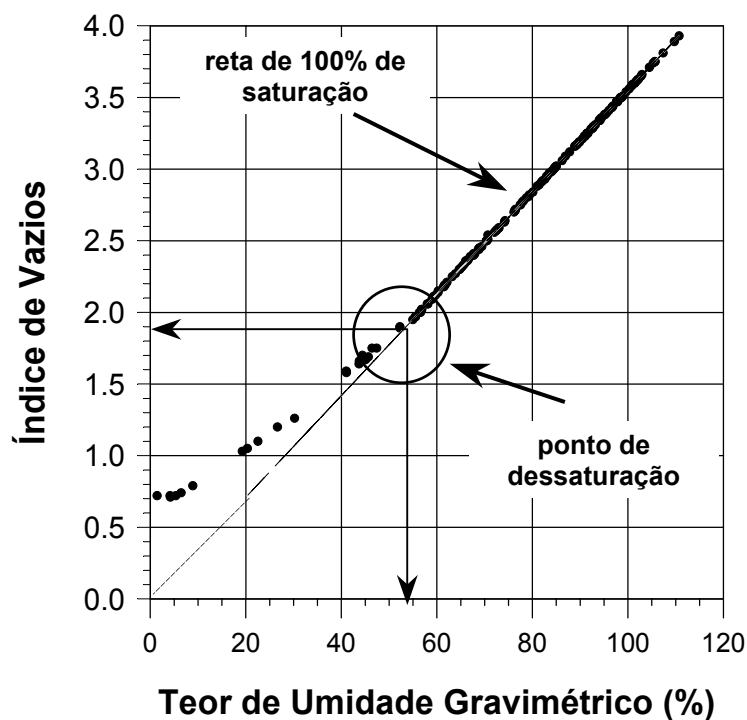


FIGURA 4.13: Curva Característica de Contração da L. Vermelha OP Não Neutralizada.

Se comparada a taxa de variação de índice de vazios no trecho de contração normal, poderá ser verificado que ela foi praticamente a mesma para as duas lamas, 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. Porém, no caso da lama vermelha OP não neutralizada, o ponto de entrada de ar foi abaixo do valor do limite de liquidez adotado (63%), enquanto que para a lama vermelha OP neutralizada, não.

Na Figura 4.14 está a mesma curva de contração, agora em relação ao teor de umidade volumétrico. A relação entre o teor de umidade gravimétrico e o volumétrico está Figura 4.15, e, como no caso da lama vermelha OP neutralizada, pode ser notado que a mudança de inclinação desta curva se dá nas proximidades do ponto do entrada de ar geral, ou seja, para um teor de umidade gravimétrico de 54%.

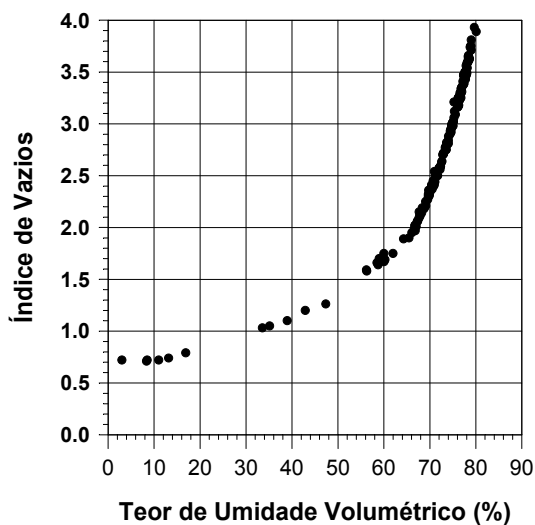


FIGURA 4.14: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: índice de vazios contra teor de umidade volumétrico.

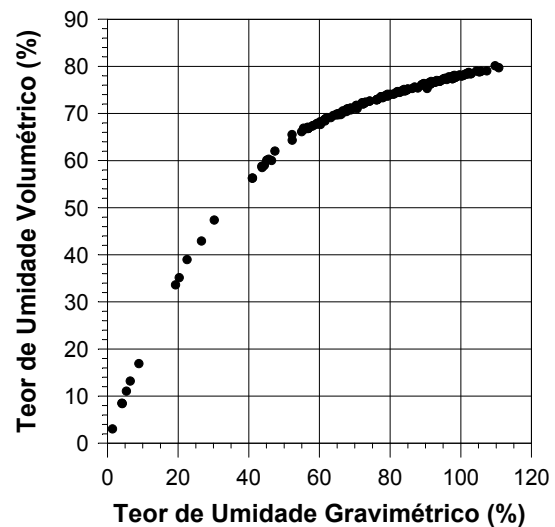


FIGURA 4.15: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: teor de umidade volumétrico contra o teor de umidade gravimétrico.

Como no caso da lama vermelha OP neutralizada, também são mostradas na Figura 4.16, itens (a) a (d), as relações obtidas associadas ao grau de saturação, respectivamente com o teor de umidade gravimétrico, o volumétrico, o índice de

vazios e a porosidade. Em todas elas, o ponto de entrada de ar geral também está bem definido.

A Figura 4.17 apresenta a relação entre o teor de umidade volumétrico e a porosidade, mostrando igualmente ao caso anterior da lama vermelha OP neutralizada, que onde esta relação deixa de ser linear e com uma inclinação igual a 45° , está o ponto de dessaturação do solo (próximo ao valor de porosidade de 0,66). A segunda mudança de inclinação, próximo à porosidade de 0,43, corresponde aproximadamente à região onde está o limite de contração. Em todos os casos, a densidade relativa dos grãos (G) foi adotada ser 3,55.

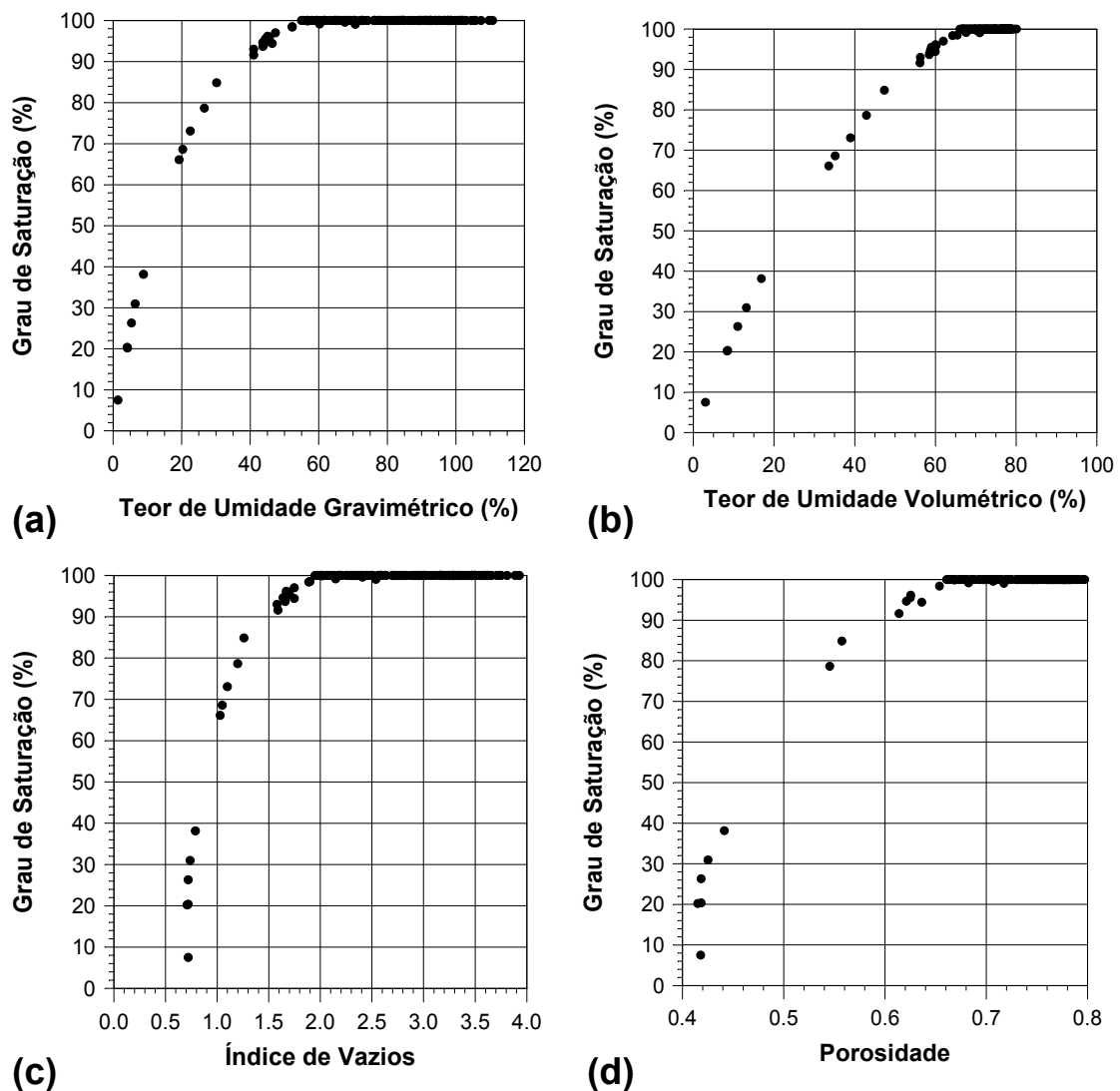


FIGURA 4.16: Curvas de secagem da lama vermelha OP não neutralizada em relação ao grau de saturação e: (a) o teor de umidade gravimétrica; (b) o teor de umidade volumétrico; (c) o índice de vazios e (d) a porosidade.

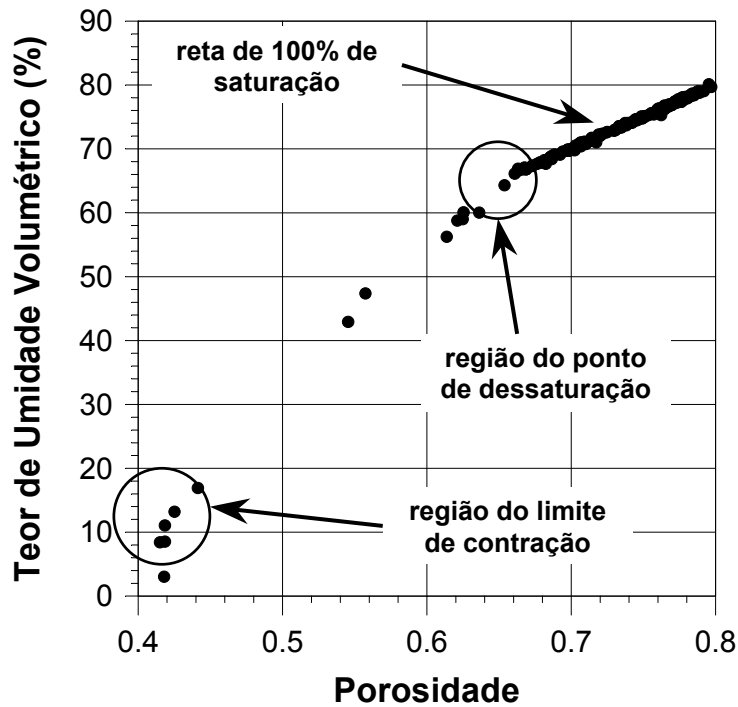


FIGURA 4.17: Curva de Secagem da Lama Vermelha OP Não Neutralizada: relação entre o teor de umidade volumétrica e a porosidade.

A Figura 4.18 mostra as relações entre a densidade total dos resíduos e o teor de umidade gravimétrica e o índice de vazios, para um G constante de 3,55. Neste caso, percebe-se que a densidade total máxima, $2,19\text{kg/m}^3$, não ocorre para o teor de umidade correspondente ao limite de contração (19,5%), e sim para um valor menor, próximo ao do teor de umidade residual. Uma explicação possível pode estar ligada ao tipo de trincamento e fissuramento apresentado por este tipo de resíduo, que pode ter sido menor que os da amostra com soro neutralizado. Outra explicação pode ser a qualidade das amostras para as quais se obteve estes valores de maiores densidades, podendo ter havido alguma mudança em sua preparação em relação às demais que não foi percebida. Inclusive, ocorre um trecho sem registros entre estes pontos e o restante da curva, o que colabora para a suspeita. Porém, eles foram mantidos porque aparentemente estes dados foram coletados de maneira correta. Para o teor de umidade correspondente ao limite de contração, a curva indica uma tendência ter atingido um máximo em torno de $2,1\text{kg/m}^3$.

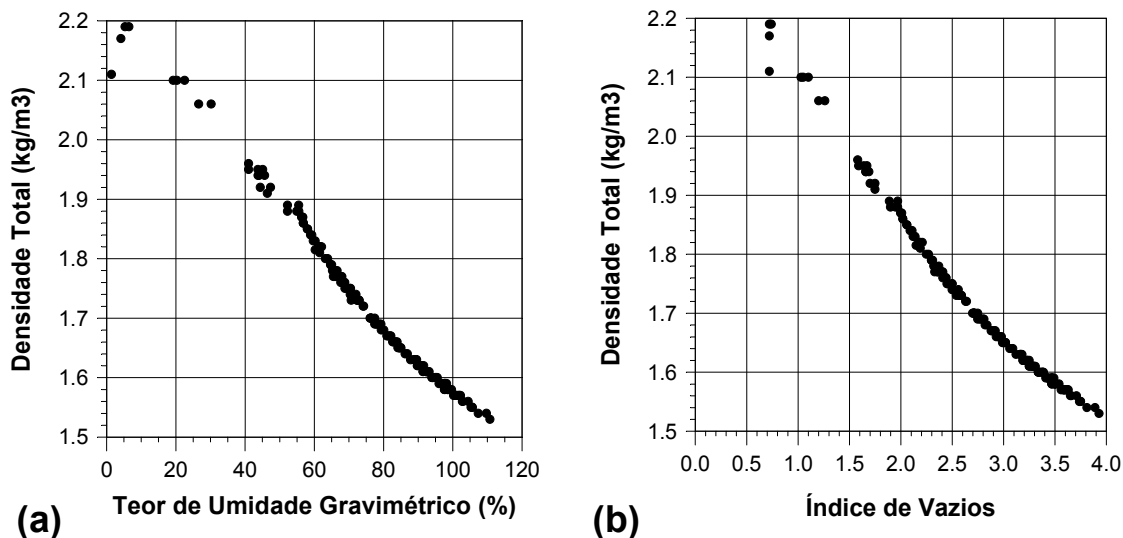


FIGURA 4.18: Curvas de secagem da lama vermelha OP não neutralizada em relação à densidade total e: (a) teor de umidade gravimétrico e (b) índice de vazios.

No item (b) da Figura 4.18 pode ser percebido que a densidade total máxima ocorre para o valor mínimo de índice de vazios que havia sido registrado na curva característica de contração (0,7). Nas proximidades do ponto de entrada de ar geral, também ocorreu uma ligeira dispersão dos dados, com pequena mudança de inclinação na relação entre os dois índices físicos, mesmo aspecto apresentado pela curva da lama vermelha OP neutralizada.

Na Figura 4.19 estão as relações entre a densidade seca e o teor de umidade gravimétrico e o índice de vazios. O valor máximo encontrado foi de $2,1\text{kg/m}^3$, bem superior ao caso da lama vermelha OP neutralizada, muito provavelmente em função dos ensaios desta última terem sido iniciados com um menor teor de sólidos.

Ainda analisando a mesma Figura 4.19, estão aí representadas as funções que melhor se ajustaram a estas relações entre índices físicos. No caso do gráfico densidade seca contra o teor de umidade gravimétrico, esta função também foi do tipo exponencial, com um coeficiente de determinação de 0,99. Para o gráfico densidade seca contra índice de vazios, a melhor função de ajuste já foi do tipo potencial, com um coeficiente de determinação de 0,99, todas calculadas à partir de um G constante de 3,55. As equações referentes às funções mostradas na Figura 4.19 são:

$$\rho_{\text{seco}} (\text{kg} / \text{m}^3) = 2,077. e^{(-9,8 \times 10^{-3} \cdot \text{teor de umidade em \%})} \quad (4.3)$$

$$\rho_{\text{seco}} (\text{kg} / \text{m}^3) = 1,837. (\text{índice de vazios})^{-0,654} \quad (4.4)$$

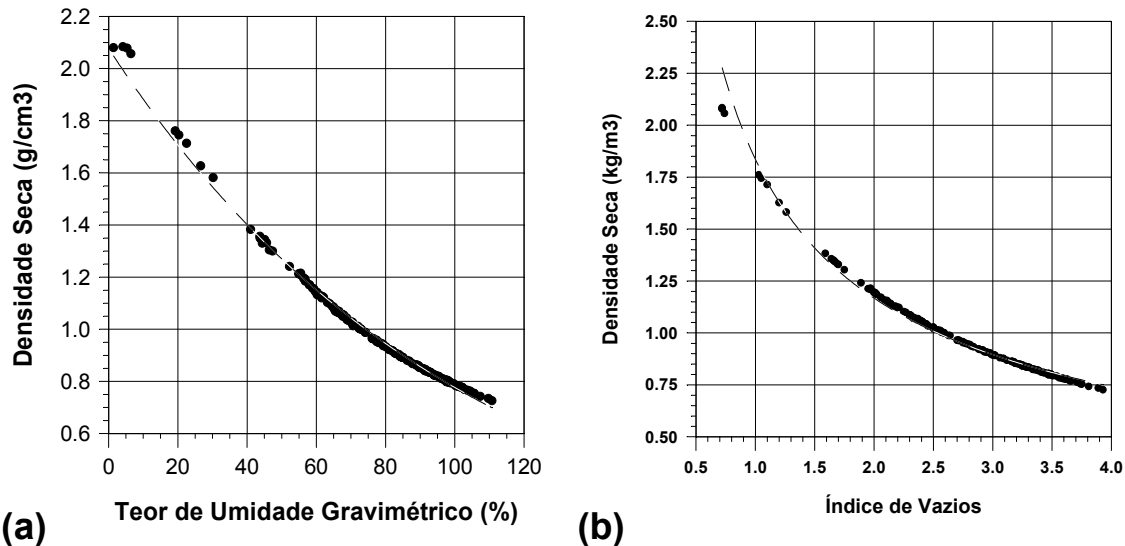


FIGURA 4.18: Curvas de secagem da lama vermelha OP não neutralizada em relação à densidade seca e: (a) teor de umidade gravimétrico e (b) índice de vazios.

Na equação (4.3), o “e” corresponde a base do logaritmo neperiano. Se comparada com as equações obtidas para a lama vermelha OP neutralizada (4.1 e 4.2), será verificado que não houve uma diferença muito grande entre os coeficientes das equações, especialmente naquela que relaciona densidade seca com o índice de vazios.

Para este material, também foram obtidas curvas de secagem para amostras que foram previamente pré-adensadas a 300e 700kPa antes do processo de secagem. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.20 a 4.30, onde as três situações são comparadas, ou seja, amostras sem pré-adensamento antes de secar, pré-adensadas a 300kPa e a 700kPa. É visto por estas figuras 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.

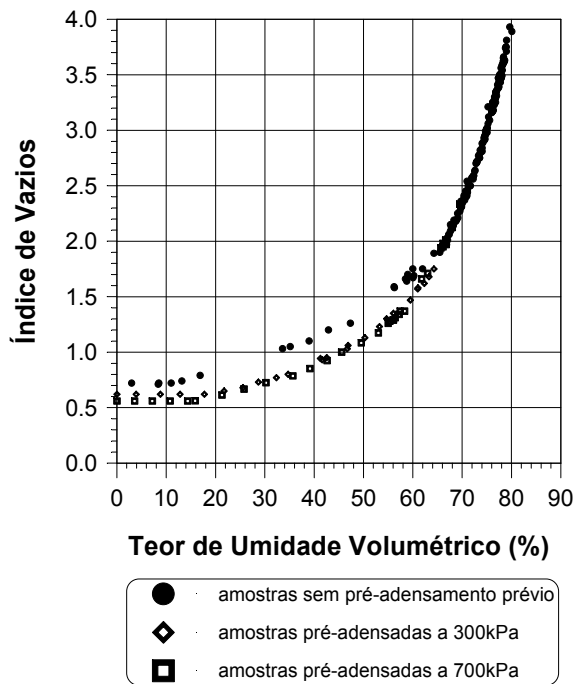


FIGURA 4.20: Curvas características de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

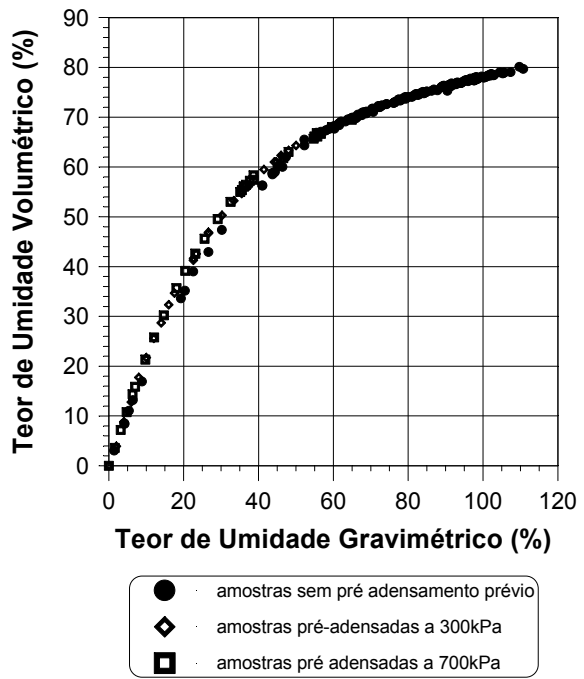


FIGURA 4.21: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

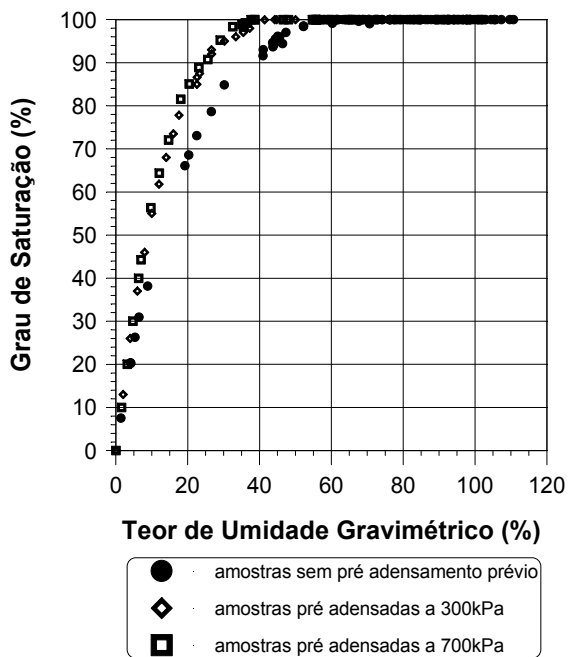


FIGURA 4.22: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

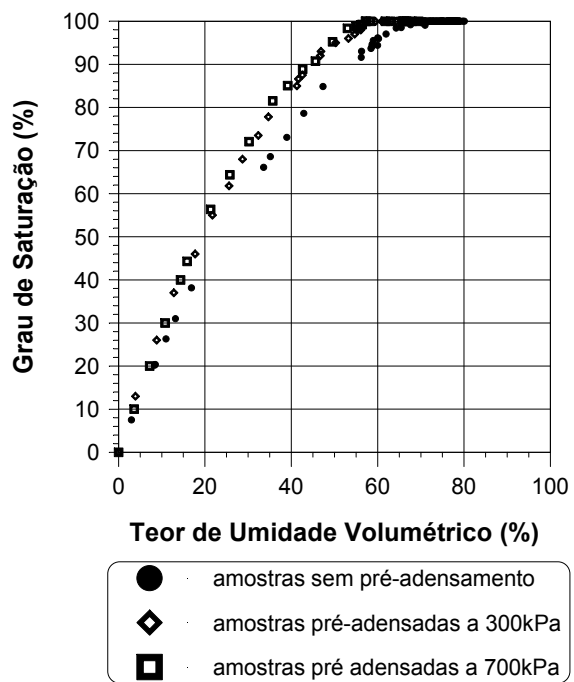


FIGURA 4.23: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

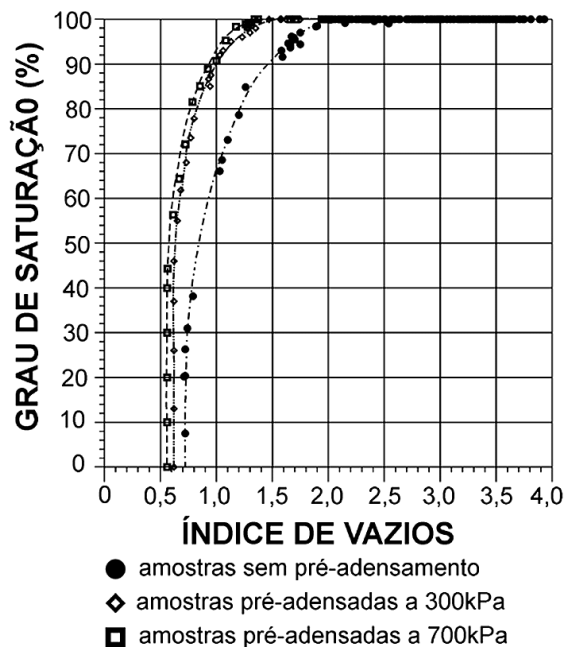


FIGURA 4.24: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adsensamento.

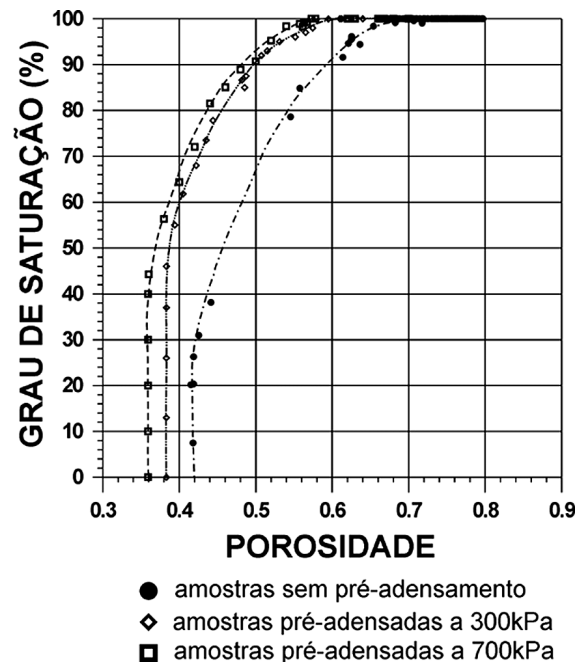


FIGURA 4.25: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adsensamento.

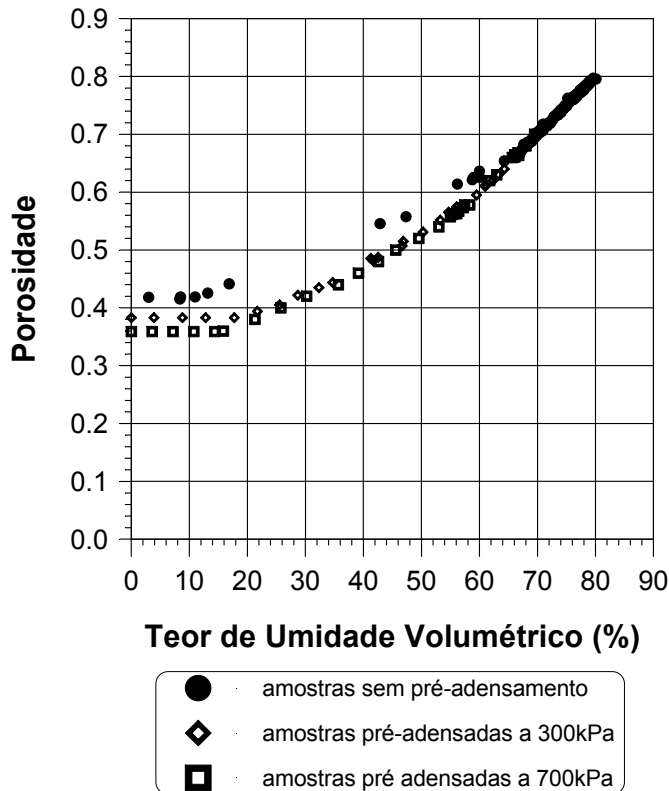


FIGURA 4.26: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adsensamento.

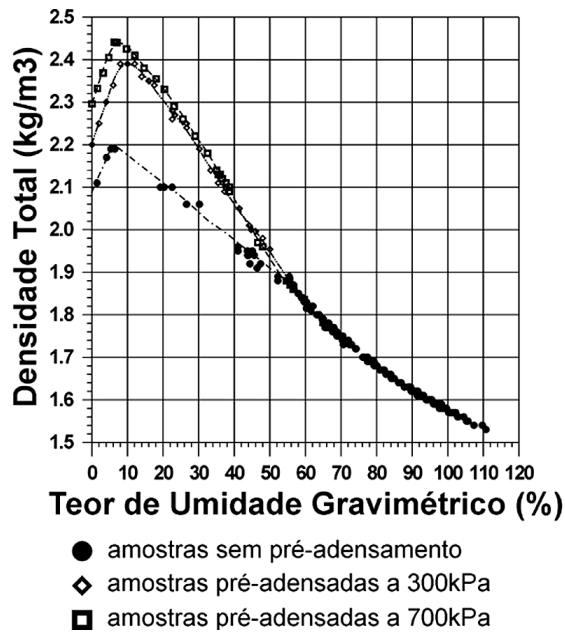


FIGURA 4.27: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

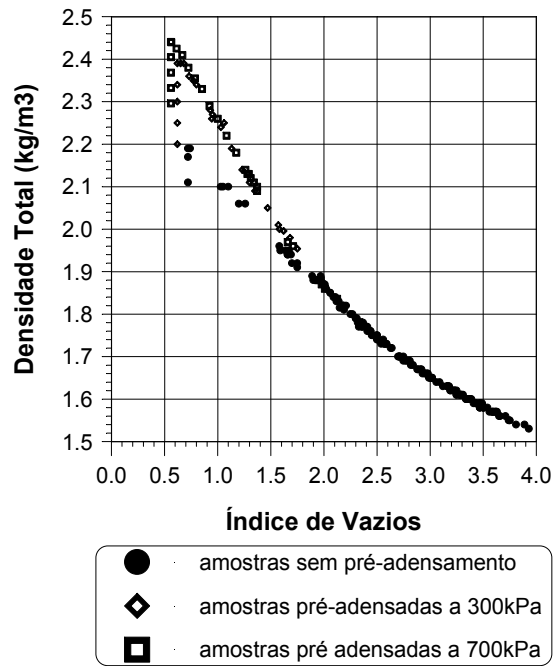


FIGURA 4.28: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

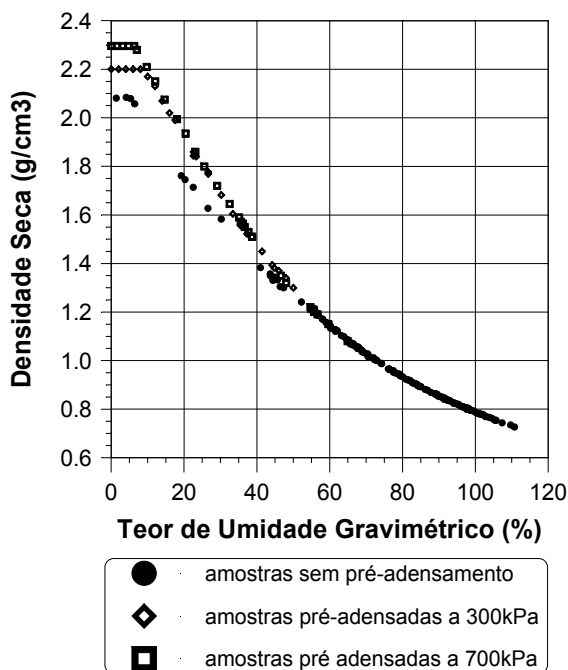


FIGURA 4.29: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

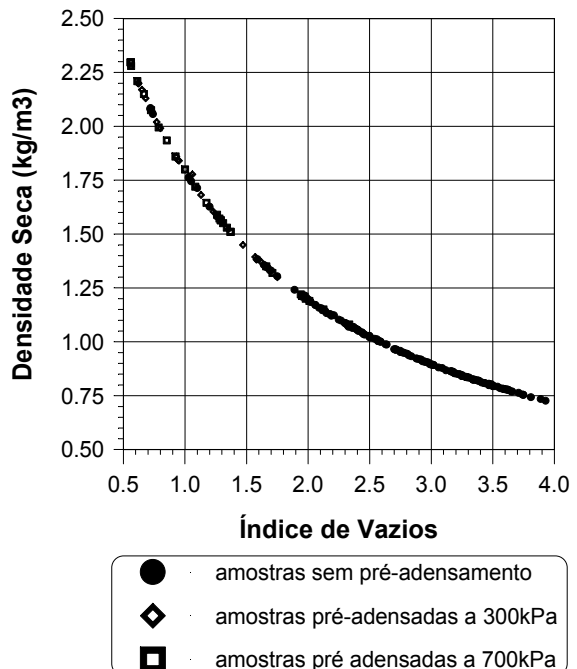


FIGURA 4.30: Curva de secagem da lama vermelha OP não neutralizada: material sem e com pré-adensamento.

Todos os ensaios foram iniciados de amostras saturadas, como pode ser constatado pelos resultados, e o pré-adensamento faz com o ponto de entrada de ar geral se desloque, diminuindo o teor de umidade onde ele ocorre à medida que aumenta. O limite de contração também diminui com o pré-adensamento, como foi visto no capítulo anterior, na Figura 3.72, que apresenta as curvas características de secagem dos três materiais, enquanto a densidade total e seca máxima aumentam. 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. Através da seqüência de figuras mostradas, para este G de 3,55, uma vez conhecido um índice físico, qualquer outro poderá ser calculado. A densidade seca final não dependeu da tensão de pré-adensamento ao longo do processo de secagem.

Tomando como referência os valores de teor de umidade gravimétrico no ponto de entrada de ar geral e os valores do limite de contração para cada tensão de pré-adensamento, poderá ser definido um intervalo no qual o resíduo estaria não saturado e ainda sujeito a variações de volume devido ao processo de secagem. Esta faixa é mostrada na Figura 4.31. A Figura 4.32 apresenta a faixa possível de índices de vazios variando com a tensão de pré-adensamento, na qual a lama vermelha OP não neutralizada estaria não saturada. Já as Figuras 4.33 e 4.34 mostram as regiões possíveis de se encontrar valores de densidades totais e secas para o resíduo não saturado, também em função da tensão de pré-adensamento.

Foi feita uma tentativa de verificação do efeito ressecamento 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 entrada de ar geral, foram moldadas amostras usando o anel moldador 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 aqui de “transversais”, já que sua moldagem foi feita transversalmente ao sentido de deposição e adensamento, diferenciando-as obtidas à partir do anel moldador apoiado no mesmo sentido da sedimentação, chamadas de “normais”. Foram confeccionadas algumas amostras transversais, em diferentes teores de umidade, e a variação observada de seus índices físicos

com a variação do teor de umidade devido ao ressecamento foi plotada nas curvas de secagem das amostras normais. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 4.35 a 4.38.

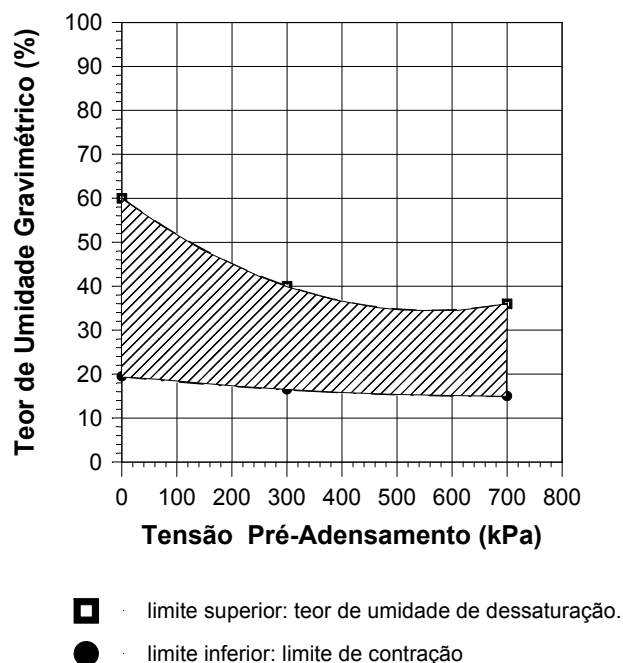
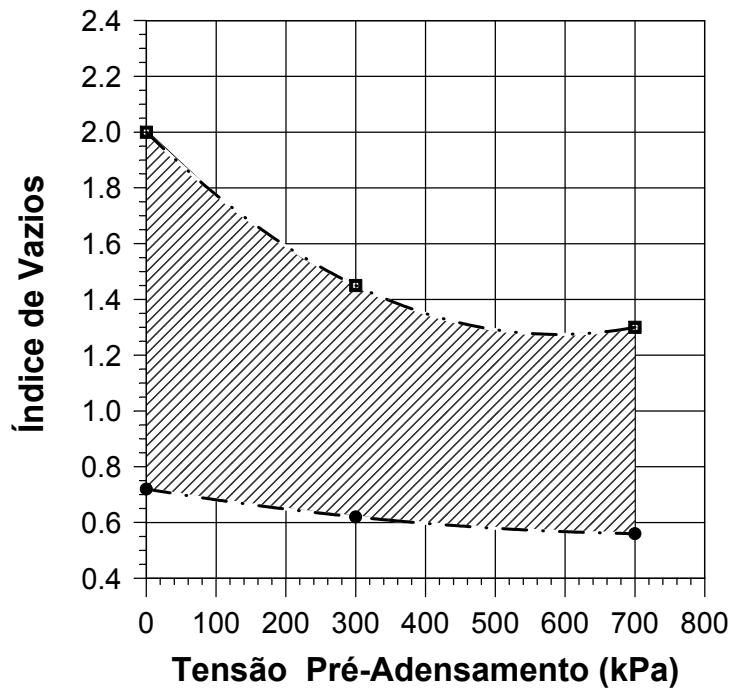


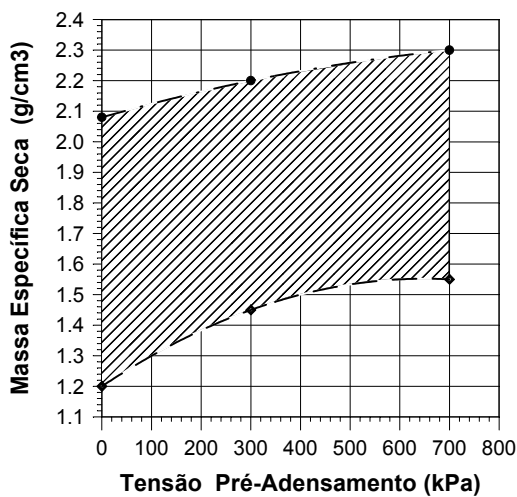
FIGURA 4.31: Faixa De Variação Do Teor De Umidade Gravimétrico Lama Vermelha OP Não Neutralizada Com A Tensão De Pré-Adensamento: Condição Não Saturada.

O que pode ser observado é que as amostras transversais têm um comportamento muito semelhante às amostras pré-adensadas em relação à variação de volume, quando ainda não estão muito secas, ou seja, para níveis não muito elevados de sucção. A dessaturação ocorre aproximadamente para teores de umidade semelhantes aos das amostras pré-adensadas a 300kPa. Porém, à medida que a secagem avança e com o conseqüente aumento da sucção, o comportamento das amostras transversais vai 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 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.



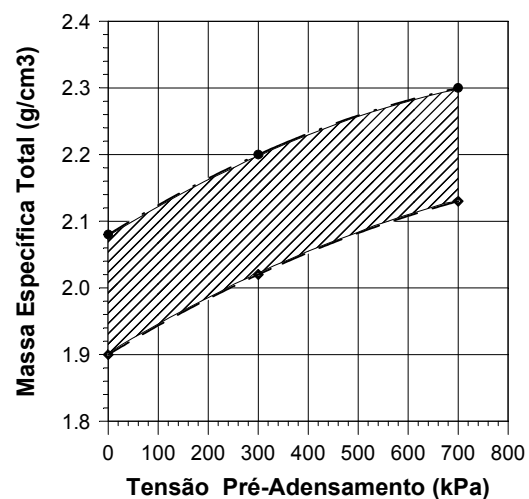
- limite superior: índice de vazios de dessaturação.
- limite inferior: índice de vazios mínimo após secagem

FIGURA 4.32: Faixa De Variação Do Índice de Vazios Da Lama Vermelha OP Não Neutralizada Com Tensão De Pré-Adensamento Para A Condição Não Saturada.



- limite superior: massa específica seca máxima
- ◇ limite inferior: massa específica seca na dessaturação.

FIGURA 4.33: Faixa de Variação das Densidades Totais Não Saturadas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada



- limite superior: massa específica seca máxima
- ◇ limite inferior: massa específica seca na dessaturação.

FIGURA 4.34: Faixa de Variação das Densidades Secas Não Saturadas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

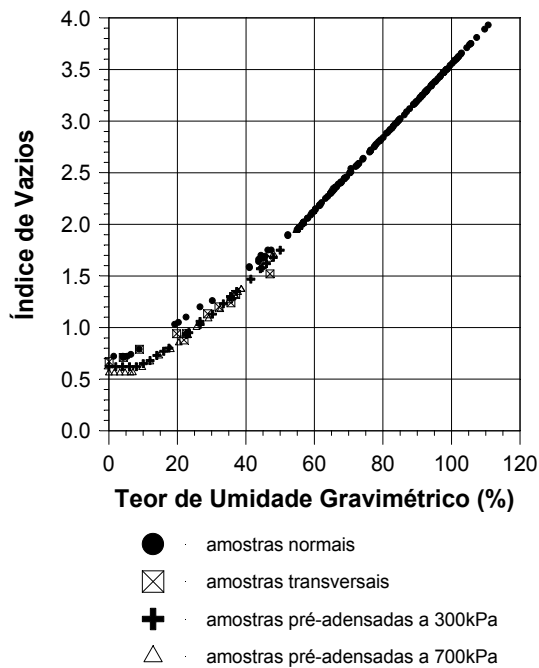


FIGURA 4.35: Comparação entre amostras “normais” e “transversais” da lama vermelha OP não neutralizada: curva característica de contração.

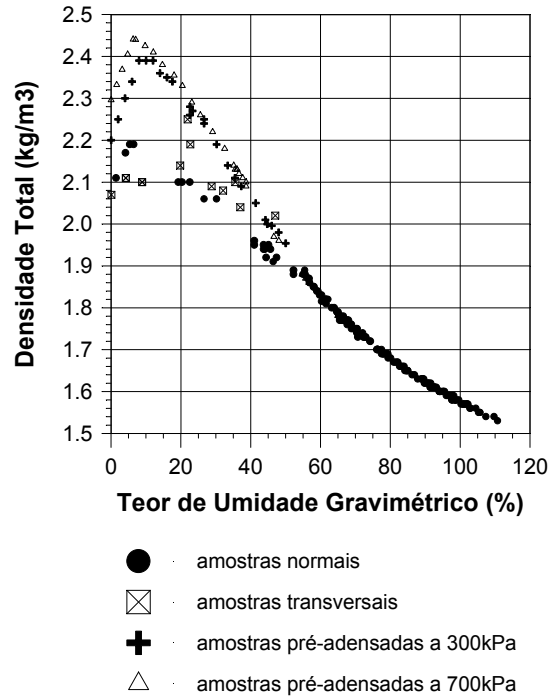


FIGURA 4.36: Comparação entre curvas de secagem de amostras “normais” e “transversais” da lama vermelha OP não neutralizada: densidade total.

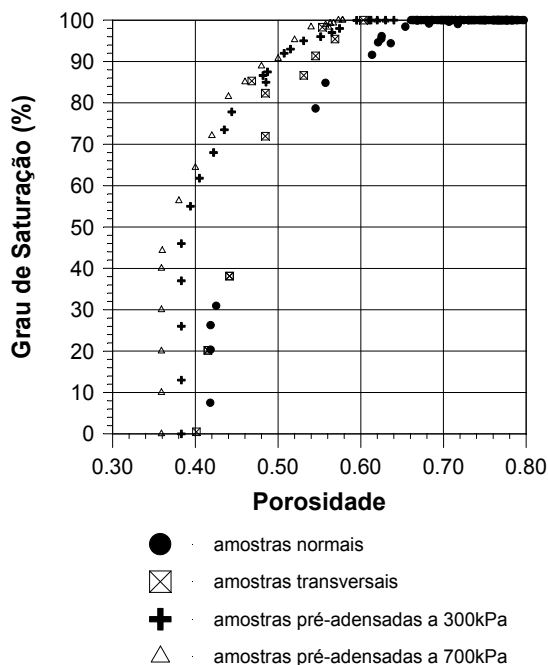


FIGURA 4.37: Faixa de Variação das Densidades Totais Não Saturadas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

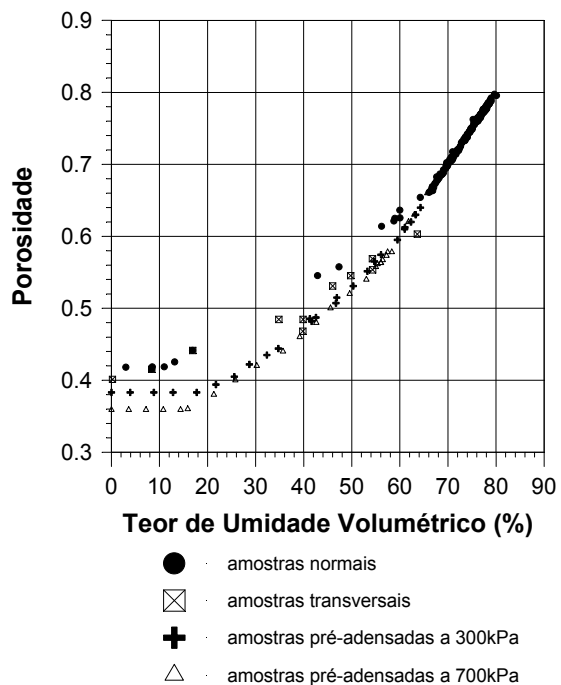


FIGURA 4.38: Faixa de Variação das Densidades Secas Não Saturadas da Lama Vermelha OP Não Neutralizada

4.6

Resistência à Tração dos Resíduos

Em uma investigação sobre o mecanismo de fissuramento de barras de argilas remoldadas, Towner (1987) afirmou que a resistência à tração de um solo é uma propriedade do material que depende, em geral, da sucção presente em sua estrutura. Para Aluko & Koolen (2000), a resistência dos solos seria derivada de duas fontes: as ligações entre os agregados presentes e aquelas internas à estes agregados. Ou seja, as ligações que mantêm partículas muito finas floculadas e aquelas que ligam os flocos entre si, sendo a resistência um reflexo da força necessária para quebrar estas ligações. Estes autores, citando o trabalho de Koolen (1987), afirmam que a medida que o solo vai secando, a capilaridade no interior dos flocos se diferenciaria daquela entre os flocos, de modo que na verdade, haveriam dois valores de sucção a se analisar. Considerando esta hipótese, Snyder & Miller (1985) sugerem que, para um melhor cálculo da resistência à tração, deve ser considerado um “grau de saturação efetivo”, ou seja, aquele que realmente haveria no interior dos flocos.

Barzegar et al. (1995) afirmam que a resistência a tração dos solos por eles estudado, foi influenciada pelo tipo e quantidade de mineral argila presente, o tamanho da fração argila e a quantidade de argila em estado disperso. A resistência aumentou com o teor de argila presente, especialmente além de 20%, o que segundo eles seria uma indicação de influência direta no arranjo entre partículas. Rahimi et al. (2000) também apresentam um estudo de alguns fatores que influenciariam na resistência a tração de solos, entre eles a condutividade elétrica e a quantidade de matéria orgânica.

Em geral, independente dos mecanismos internos que a desenvolvem, a resistência à tração de solos e rochas tem sido determinada pelo ensaio de compressão diametral, ou *ensaio brasileiro*. Ele na verdade foi desenvolvido na década de 1950 para avaliar a resistência à tração de concreto. Mais tarde, o mesmo aparato foi usado em rochas e solos cimentados ou compactos (Krishhnayya & Eisenstein, 1974; Clough et al., 1981; Queiroz, 1991; Das et al., 1994; Favaretti, 1995). Ele consiste no carregamento de amostras cilíndricas

(altura h e diâmetro d), carregado ao longo de duas placas rígidas paralelas, uma oposta à outra, no sentido do seu diâmetro. A ruptura é atingida ao longo do plano vertical diametral, conectando os dois lados carregados.

Segundo Krishhnayya & Eisenstein (1974), o ensaio apresenta diversas vantagens, tais como a facilidade na preparação das amostras, equipamento necessário similar ao de compressão simples, ruptura relativamente insensível às condições da superfície de contato da amostra, com um campo mais ou menos uniforme de tensões de tração perpendicular e ao longo do plano diametral contendo a carga normal aplicada provocando a ruptura. Guinea et al. (2000) recomendam o ensaio brasileiro para medição de resistência à tração por ter sido ele, em comparação com outros ensaios, o que apresentou os menores efeitos de escala nos estudos que realizaram.

A avaliação da resistência à tração pode ser feita de uma maneira simples, pela fórmula (Das et al., 1994; Krishhnayya & Eisenstein, 1974):

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dh} \quad (4.5)$$

onde : P = carga máxima do ensaio de compressão diametral; d é o diâmetro da amostra e h , a sua espessura ou altura.

Krishhnayya & Eisenstein (1974) alertam que esta não é uma relação rigorosamente adequada para materiais que tenham grande diferença entre os módulos de elasticidade na compressão e na tração, como os solos. Também afirmam que tem sido observado que condições favoráveis para a aceitabilidade do ensaio tem sido geralmente obtida pela distribuição da carga aplicada sobre uma pequena área de contato. A Figura 4.39 mostra a solução teórica para tensões ao longo do diâmetro vertical da amostra submetida ao ensaio de compressão diametral, válida somente quando o solo ensaiado tiver as mesmas propriedades elásticas para a compressão e a tração. Nesta figura, “ a ” é a largura da faixa carregada.

Um maior detalhamento teórico do ensaio brasileiro pode ser encontrado em Lavrov & Vervoot (2002), onde os autores mostram que as condições de contorno e a espessura do disco da amostra podem impor uma influência significativa na

distribuição das tensões e conseqüentemente, na interpretação dos resultados. Também Chen et al. (1998) apresentam uma análise teórica do ensaio. Um método para determinação da resistência à tração dinâmica de materiais quebradiços, visando aplicação na indústria cerâmica, foi proposto por Diaz-Rúbio e outros (2002), baseado na propagação e reflexão de ondas elásticas em barras, com a ruptura ocorrendo quando as ondas compressivas se refletiriam em ondas de tração quando atingissem uma extremidade livre. Os autores também apresentam uma simulação numérica da técnica. Munkholm et al. (2002) também apresentam uma nova técnica de medição direta da resistência à tração, visando especialmente o uso de amostras em maiores teores de umidade, sujeitos à deformações plásticas.

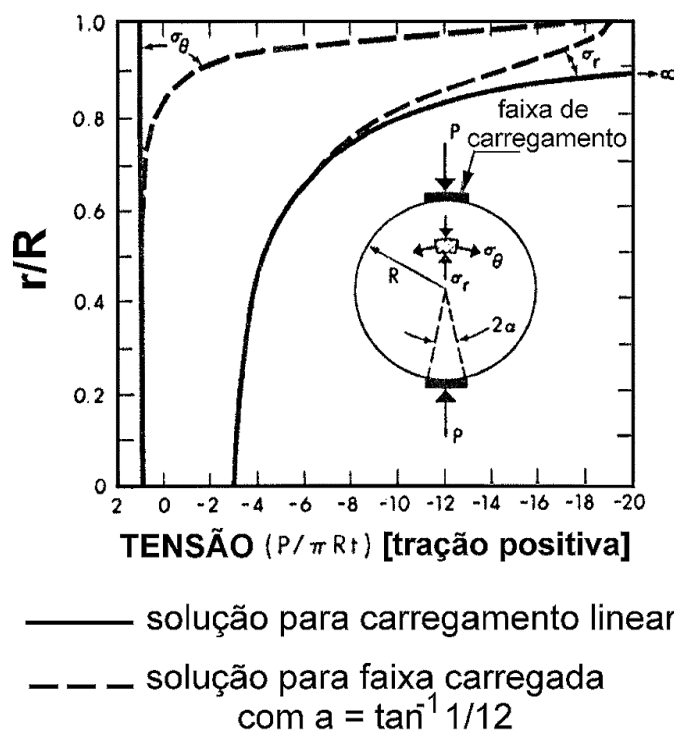


FIGURA 4.39: Soluções Teóricas Para Tensões ao Longo do Diâmetro Vertical de uma Amostra No Ensaio de Compressão Diametral (*apud de Krishnayya & Eisenstein, 1974*)

Das et al. (1994) fizeram o uso direto da relação apresentada pela fórmula (4.5) nos seus cálculos. Favaretti (1995) também aplica a expressão, com uma correção para casos de solos com elevada resistência à compressão. Ele comparou os resultados fornecidos por este ensaio com outro, chamado DPT ou punção

dupla, que também é realizado em amostras cilíndricas, mas axialmente. Dois puncionadores posicionados no topo e na base penetram no solo até que a ruptura por tração é atingida ao longo do plano vertical. O cálculo do ensaio DPT é função de uma constante empírica próxima da unidade, e nos ensaios feitos por Favaretti (1995), quando ela era assumida de ser igual a 0.9, os valores obtidos eram bem similares aos do ensaio brasileiro.

4.6.1

Ensaio realizados

Neste trabalho, foi adotado o mesmo procedimento e metodologia de ensaio do descrito em Queiroz (1991). 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 a mesma usada em Queiroz (1991), de 2mm/min. Favaretti (1995) utilizou 0.5 mm/min. As amostras eram montadas em uma prensa com velocidade controlada, sendo feita a leitura da carga por uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição de dados. Em alguns casos, para efeito de investigar o grau de anisotropia do resíduo, moldou-se amostras perpendiculares ao sentido de deposição e adensamento por peso próprio, chamadas de amostras transversais, já citadas anteriormente.

As Figuras 4.40 a 4.43 mostram uma seqüência típica de ensaio. Na extremidade da célula de carga foi adaptada uma placa de acrílico, promovendo a distribuição da carga no solo como uma estreita faixa. Na Figura 4.41 já se nota a trinca formada ao longo do diâmetro vertical, que vai se abrindo (Figura 4.42) até a ruptura total (Figura 4.43) exatamente ao longo do plano diametral vertical.

A curva típica de resposta obtida está representada na Figura 4.44. Solos ensaiados em um menor teor de umidade apresentaram picos mais acentuados na curva força contra o deslocamento, o que seria de se esperar. Aqueles ensaiados em maiores umidades, apresentavam deformações grandes, mudando muito a área de contato entre a placa de acrílico e amostra. Devido a esta deformação, a trinca de tração se formava um pouco inclinada, ao invés de na vertical e a curva de resposta força contra o deslocamento não apresentava um pico tão acentuado,

típico de materiais que não são quebradiços. A Figura 4.45 mostra este pico pouco acentuado e nas Figuras 4.46 e 4.47, é possível ver a trinca inclinada e se ter uma idéia do quanto a amostra já havia deformado. O aumento acentuado da área de contato solo/placa de acrílico também pode ser percebido. Certamente estas elevadas deformações fazem com que a distribuição de tensão ao longo da amostra não mais seja como o previsto na teoria.

Uma vez que a trinca de tração pelo eixo vertical já esteja formada, se o ensaio prosseguir, novas trincas iam se abrindo em locais mais ou menos constantes, independente do teor de umidade da amostra, desde que não muito elevado. Um exemplo pode ser tomado pela Figura 4.48, onde duas novas trincas verticais estão se formando diametralmente opostas ou ainda, o caso da Figura 4.49, com a formação das trincas na horizontal, ou em ambos os lugares simultaneamente. O surgimento destas novas trincas também era detectado pela curva força contra o deslocamento, com o surgimento de novos picos, como pode ser visto pela Figura 4.50, às vezes até acusando forças maiores que as necessária para a abertura da primeira trinca. Para efeito de interpretação, a carga máxima era tomada sempre como a do primeiro pico formado, que seria a indicação do trincamento da amostra em algum lugar naquele momento.

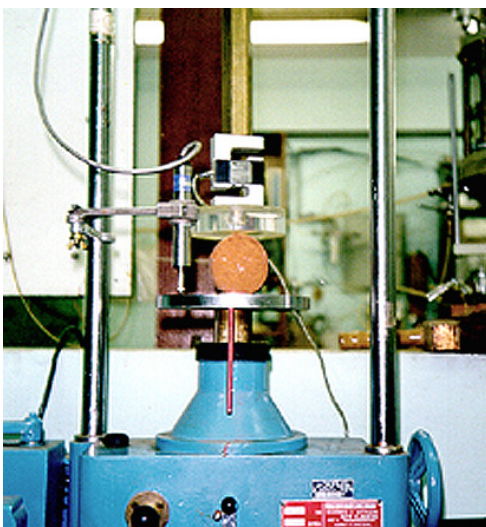


FIGURA 4.40: Registro do Ensaio de Compressão Diametral – Início.

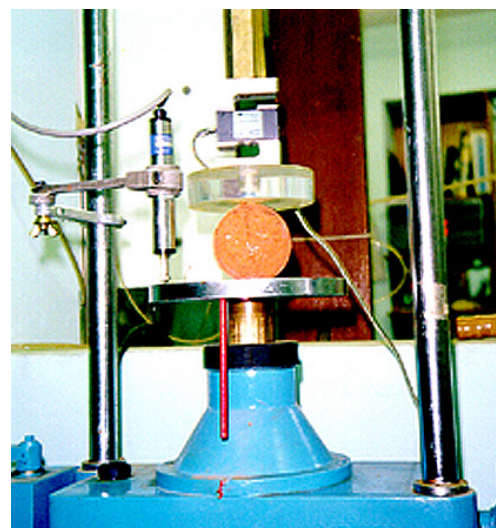


FIGURA 4.41: Ensaio de Compressão Diametral - Início da Formação da Trinca.

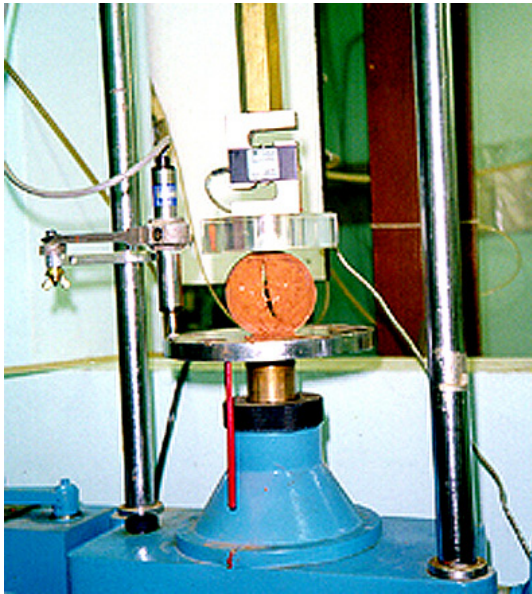


FIGURA 4.42: Registro do Ensaio de Compressão Diametral – Trinca Abrindo com o Avanço das Deformações.

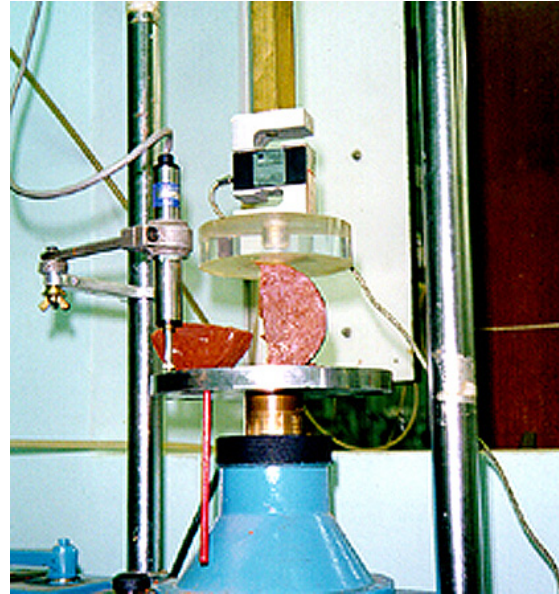


FIGURA 4.43: Registro do Ensaio de Compressão Diametral – Ruptura Total da Amostra ao Longo do Diâmetro.

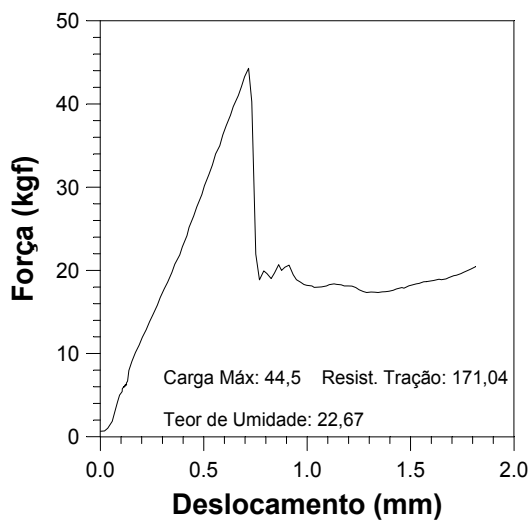


FIGURA 4.44: Ensaio de Compressão Diametral – Resultado Típico.

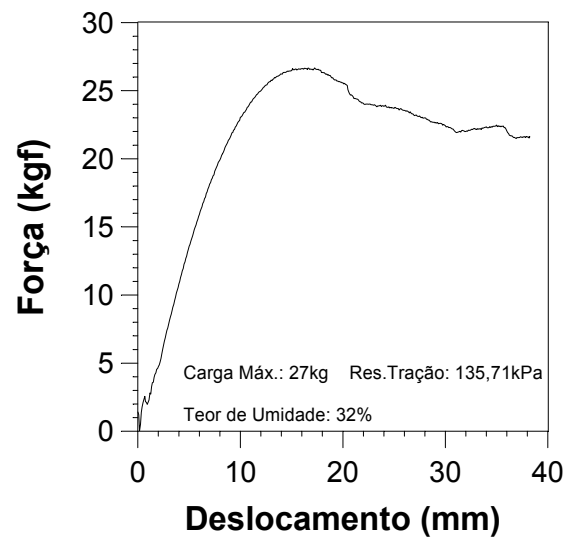


FIGURA 4.45: Ensaio de Compressão Diametral – Resultado Típico de Solos Mais Moles.

Foi notado que vazios ou trincas já existentes devido à secagem condicionaram a ruptura do material. Isto pode ser visto na Figura 4.51, com o surgimento primeiro da trinca inclinada, mais aberta, e depois sim, a central, local onde teoricamente o solo romperia por efeito de tração se estivesse intacto. Na

Figura 4.52, a fissura vertical mais próxima à extremidade do disco de rejeito também foi devido a vazios deixados pela secagem. As curvas “força contra deslocamento” para estes casos também apresentaram vários picos, próximos uns dos outros.

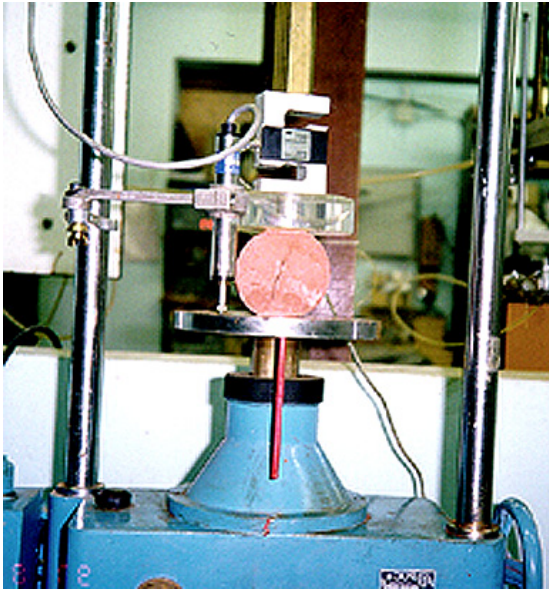


FIGURA 4.46: Ensaio de Compressão Diametral – Formação de Trinca Inclinada em Solos mais Moles.

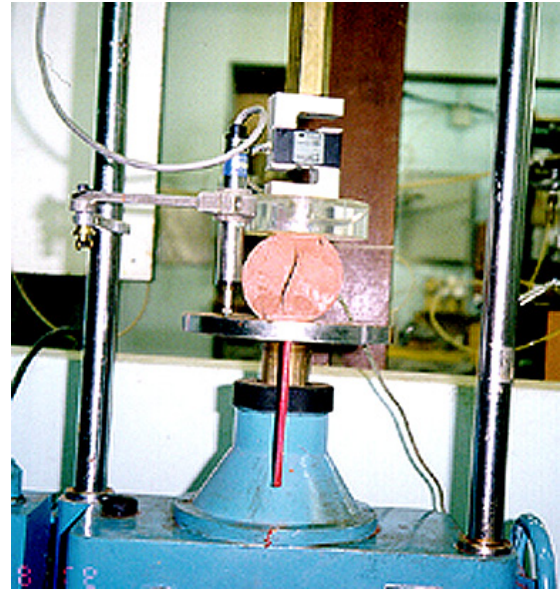


FIGURA 4.47: Ensaio de Compressão Diametral – Trinca Inclinada em Solos mais Moles e Deformação Acentuada.

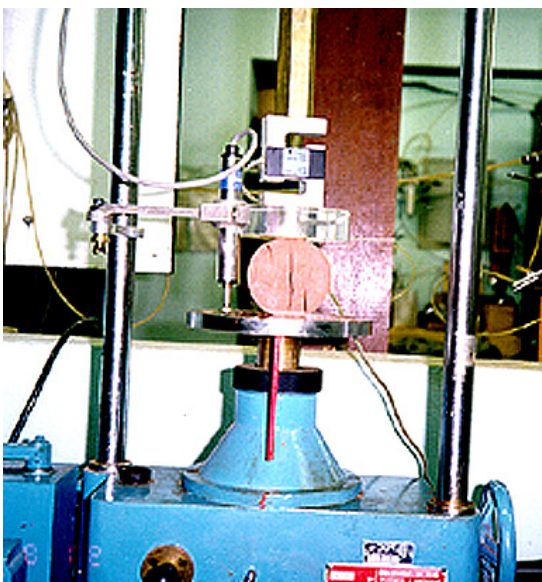


FIGURA 4.48: Ensaio de Compressão Diametral – Formação de Novas Trincas Verticais a Maiores Deformações

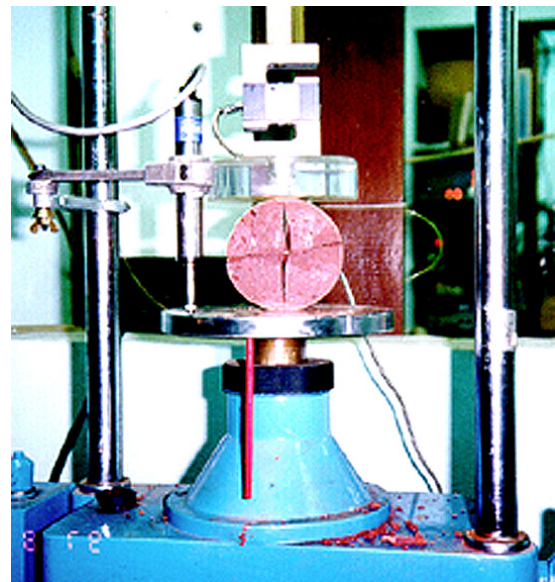


FIGURA 4.49: Ensaio de Compressão Diametral – Formação de Novas Trincas Horizontais a Maiores Deformações.

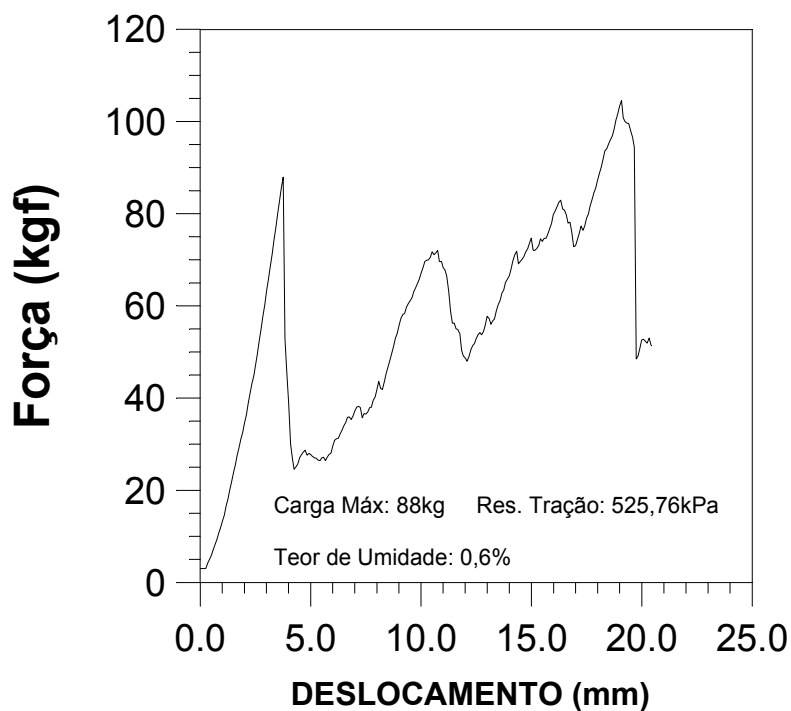


FIGURA 4.50: Ensaio de Compressão Diametral – Resultado Mostrando Novos Picos Devido Abertura de Novas Trincas.

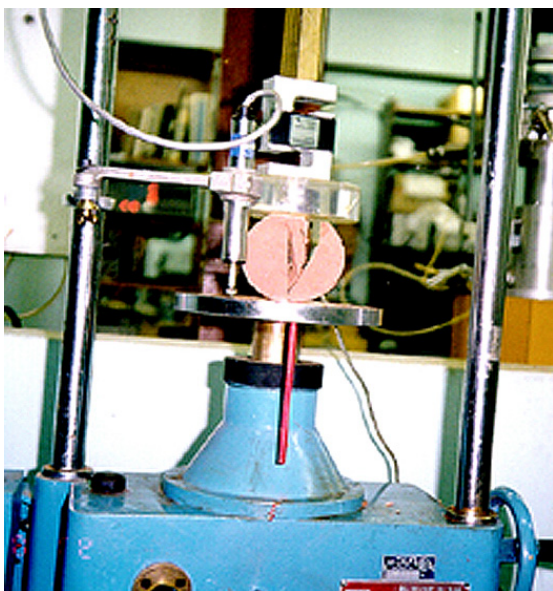


FIGURA 4.51: Registro do Ensaio de Compressão Diametral – Formação de Trincas Fora do Centro da Amostra Devido a Fissuras Pré Existentes



FIGURA 4.52: Registro do Ensaio de Compressão Diametral – Formação de Novas Trincas Devido a Fissuras Pré Existentes.

4.6.2

Resultados Obtidos

As amostras ensaiadas da lama vermelha OP neutralizada variaram de teor de umidade entre 54% e 0,5 %. Para a lama vermelha OP não neutralizada, a faixa de variação foi de 45% a 0,6%, enquanto para a lama vermelha SL, de 34 a 1% e para a lama de lavagem de bauxita, 30 a 0,1%. Estes valores de umidade foram atingidos tanto por secagem ao ar como por uso de estufa, onde a amostra era deixada para acelerar o processo de perda de umidade, mas esfriando antes de serem ensaiadas.

Os resultados obtidos para a lama vermelha OP neutralizada estão mostrados na Figura 4.53. Nota-se a 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 teores de umidade abaixo do qual o índice de vazios não mais variou. 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. Pelas curvas de secagem, todas as amostras usadas nos ensaios de tração já estavam dessaturadas e pode ser percebido que várias delas foram moldadas em um teor de umidade acima do que foi considerado o limite de liquidez, como já havia sido mencionado do capítulo anterior, levantando a suspeita sobre o ensaio padrão ser adequado para a determinação deste limite de consistência.

A curva em linha cheia na Figura 4.53 é a relação encontrada entre a resistência à tração e o teor de umidade gravimétrico, para valores inferiores ao limite de plasticidade, uma função do tipo exponencial. Para este resíduo, o limite de plasticidade e o de contração quase que se confundem, de modo que não é possível definir qual dos dois seria este limite. Para valores mais baixos de teores de umidade que o limite de plasticidade ou de contração, a amostra iniciaria o processo de trincamento, de tal modo que não mais se teria uma relação muito previsível entre as duas grandezas. Para valores de teores de umidade inferiores ao limite de plasticidade, o tamanho da amostra pode influenciar no ensaio de mais

significativamente, já que terá uma relação direta com a densidade de trincas presentes, o que deve ser melhor pesquisado. Para este caso, a relação encontrada teve coeficiente de determinação em torno de 0,94, e sua expressão matemática é mostrada pela Fórmula (4.6).

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 5743 \cdot e^{(-0,096) \cdot \text{teor de umidade gravimétrico (\%)}} \quad (4.6)$$

OBS: teor de umidade gravimétrico maior que o limite de plasticidade.

e = base do logaritmo natural.

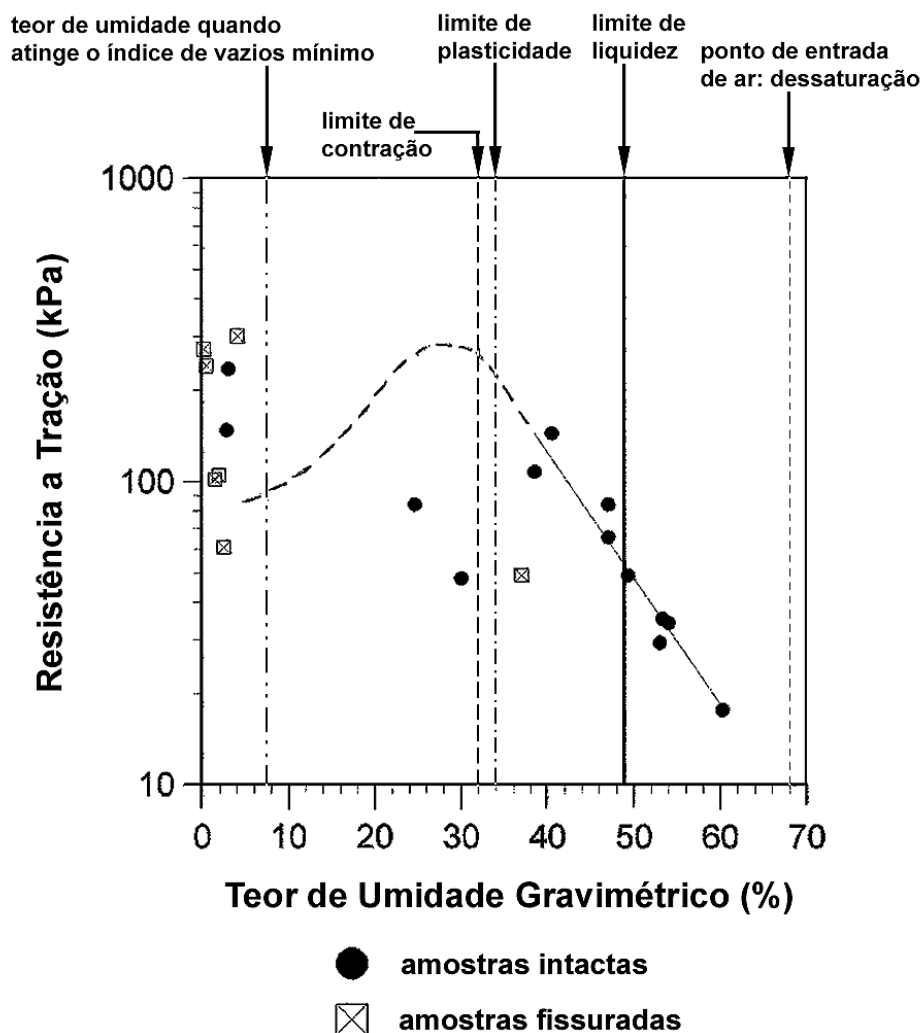


FIGURA 4.53: Relação Resistência à Tração com o Teor de Umidade Gravimétrica da LAMA VERMELHA OP NEUTRALIZADA.

Do gráfico da Figura 4.53, pode se supor que para valores de resistência a tração maiores que 250kPa aproximadamente, o trincamento deve se intensificar. Outros pesquisadores ensaiando diferentes materiais encontraram relações semelhantes entre a resistência à tração e o teor de umidade, como Queiroz (1991) e Favaretti (1995). Ambos porém consideraram que, em determinados casos, para valores mais baixos de umidade, a resistência à tração diminuiria. Um exemplo desta interpretação pode ser visto na Figura 4.54, onde estão representados os valores medidos por Queiroz (1991) para solos residuais. Pode ser percebida a grande dispersão dos dados obtidos para o solo residual maduro, e que se deve ao fato de todas as amostras ensaiadas estarem em teores de umidade inferiores ao seu limite de plasticidade, o que pode ter causado o surgimento de trincas em boa parte delas. Se os valores registrados para as amostras que estavam em um teor de umidade inferior àquele à partir do qual o índice de vazios não mais varia fossem desconsiderados, também esta seria a tendência encontrada para a lama vermelha OP neutralizada. Notar que na Figura 4.54, os dados da resistência à tração estão em escala natural, enquanto no que no gráfico da Figura 4.53, em escala logarítmica.

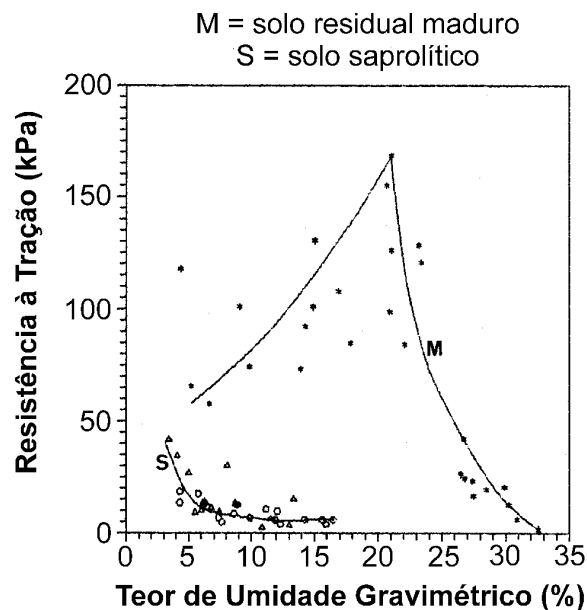


FIGURA 4.54: Relação Resistência à Tração com o Teor de Umidade Gravimétrico de Solos Residuais (*adaptado de Queiroz, 1991*).

Para entender melhor o comportamento do solo em relação à variação da resistência à tração à medida que o solo seca, foram plotadas as variações entre esta grandeza e outros índices físicos, como o peso específico total e seco, o índice de vazios e o grau de saturação. Os resultados são mostrados pela Figura 4.55. As densidades totais das amostras foram medidas após a moldagem, e tiveram seus valores comparados com a curva de secagem do resíduo, se ajustando muito bem a ela. Porém, pelos resultados do item (a) da Figura 4.55, fica bem ressaltada aquela amostra que já apresentava fissuras ou vazios no seu interior. Nestas se incluem duas, para as quais não se tinha detectado nenhuma presença de fissuramento aparente. Pelo item (b) da Figura 4.55, que apresenta a relação entre a resistência a tração e o peso específico seco, fica claro a tendência de aumento da resistência até um certo limite, caindo à partir daí. 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 da lama vermelha OP neutralizada (32%).

Em relação ao índice de vazios, é interessante notar que a medida que o solo vai contraindo e os grãos se aproximando, a resistência vai subindo seguindo uma função bem definida. Quando o trincamento devido ao ressecamento se intensifica, essa função não mais existe, ocorrendo uma grande dispersão dos resultados. O cálculo do índice de vazios pelas fórmulas de correlação fica bastante sensível aos valores do grau de saturação quando se tem baixos valores de teor de umidade, o que auxilia na dispersão dos resultados no item (c) da Figura 4.55. O índice de vazios apontado como o do limite de plasticidade também é o valor bem próximo do calculado usando o teor de umidade do limite de contração. Na curva de secagem, o índice de vazios associado ao limite de contração foi 1,2, devido à técnica de interpretação.

No item (d) da Figura 4.55 está a curva que associa os valores de resistência à tração da lama vermelha OP neutralizada com o grau de saturação. De novo fica evidente 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 do resíduo. Esta relação linear foi calculada com um coeficiente de determinação de 0,84, e está representada pela fórmula (4.7).

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = -8,73(\text{grau de saturação} - \%) + 867,6 \quad (4.7)$$

OBS: para grau de saturação > que o do limite de contração

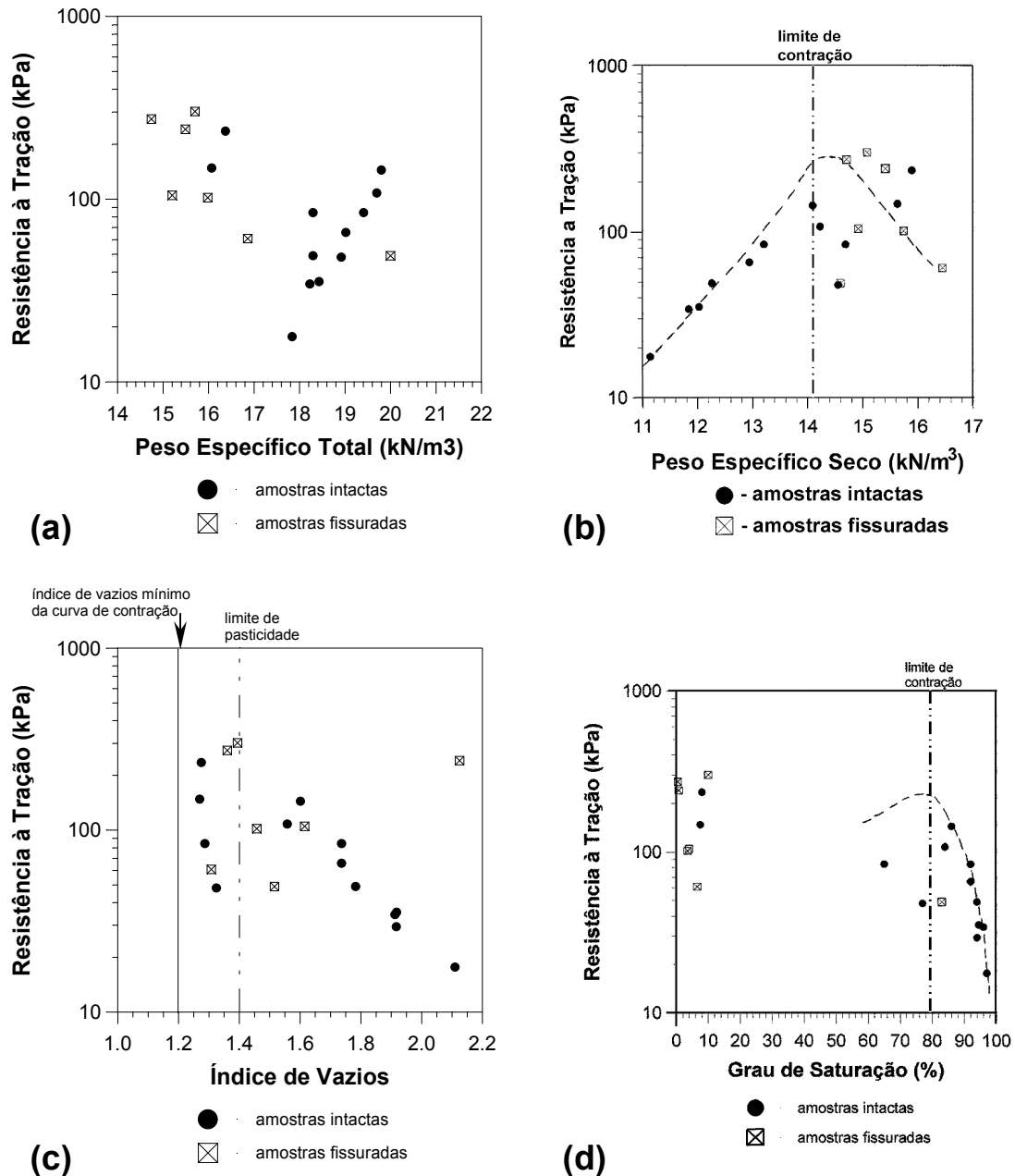


FIGURA 4.55: Resistência à Tração da Lama Vermelha OP Neutralizada em relação a: (a) peso específico total; (b) peso específico seco; (c) o índice de vazios e (d) o grau de saturação.

Com base nestas considerações, a resistência à tração dos resíduos pode ser considerado de ter um comportamento durante o processo de secagem semelhante ao do solo residual maduro ensaiado por Queiroz (1991), tendendo a aumentar

com a diminuição do teor de umidade até o limite de contração do solo. À partir deste valor, a resistência cairia em função do trincamento do solo. De acordo com Queiroz (1991), 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. Essa tendência de diminuição da resistência à tração com a diminuição do teor de umidade para valores inferiores ao teor de umidade correspondente ao limite de contração é representada pelas linhas tracejadas nas Figuras 4.54 e 4.55. Por esta interpretação, foi considerado que a resistência à tração cresceria até o limite de contração, diminuindo à partir com a diminuição do teor de umidade até um valor residual qualquer.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, foram ensaiadas amostras secas ao ar, amostras pré-adensadas a 300kPa e as chamadas “amostras transversais”, ou seja, aquelas que foram moldadas no sentido transversal ao de deposição, com o intuito de verificar efeito do ressecamento na estrutura do resíduo. Os resultados estão na Figura 4.56 e pode ser notado que são semelhantes àqueles apresentados pela lama vermelha OP neutralizada. Observa-se a tendência ao crescimento da resistência à tração com a diminuição do teor de umidade de maneira bem contínua, até o limite de contração. À partir daí, à medida que o teor de umidade diminui ainda mais, a resistência à tração não apresenta mais uma tendência muito clara de comportamento, mas está sendo admitido que para baixos valores de teores de umidade, a resistência tende a cair até um valor residual qualquer, devido ao trincamento e surgimento de vazios nas amostras. Ainda assim, foram medidos valores de resistência elevados para baixos teores de umidade, o que também ocorreu nos ensaios da lama vermelha OP neutralizada, o que é creditado a se ter conseguido amostras secas com uma densidade de fissuras muito baixa, o que não foi usual.

Se comparado os resultados da lama vermelha OP não neutralizada e lama vermelha OP neutralizada (Figura 4.53), ambas secas ao ar, verifica-se que o nível de resistência à tração atingido foi basicamente o mesmo, o que indica que não há influência do tipo de fluido no comportamento. A curva estimada da lama

vermelha OP neutralizada, porém, teve uma queda mais acentuada do que a lama vermelha OP não neutralizada, o que corresponde à diferença entre a plasticidade de ambas.

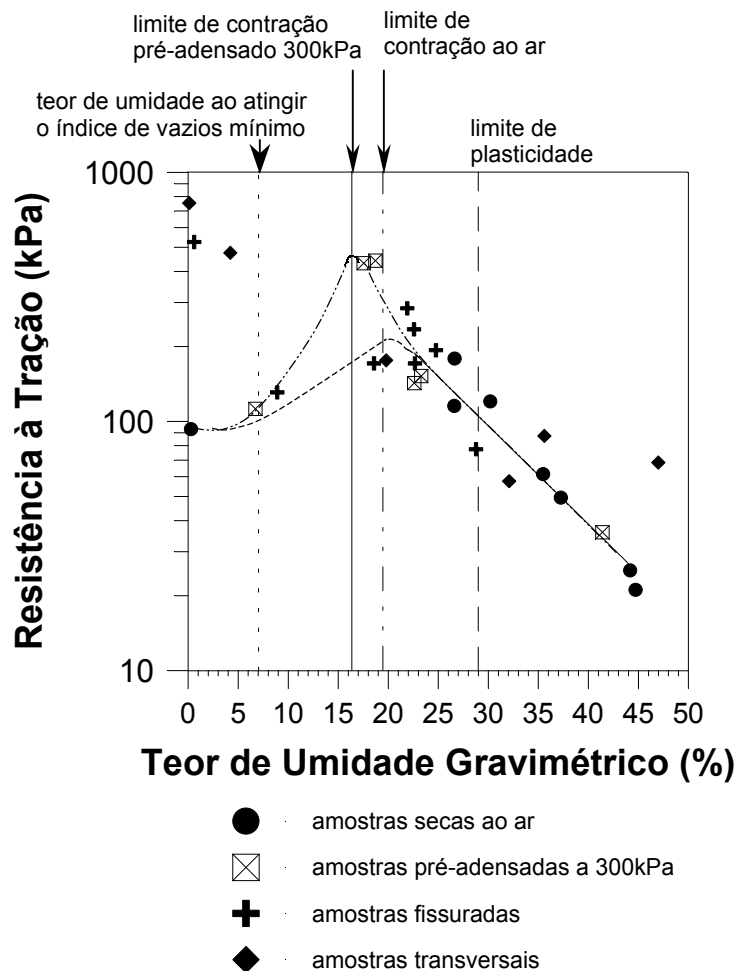


FIGURA 4.56: Relação Resistência à Tração com o Teor de Umidade Gravimétrica da LAMA VERMELHA OP NÃO NEUTRALIZADA.

A função que melhor se ajustou aos resultados para valores de teores de umidade acima do limite de contração para a lama vermelha OP não neutralizada também foi do tipo exponencial e bastante semelhante à da lama vermelha OP neutralizada, como pode ser visto pela comparação entre as fórmulas (4.8), abaixo, e a (4.6):

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = 1471 \cdot e^{(-0,091) \cdot \text{teor de umidade gravimétrico (\%)}} \quad (4.8)$$

OBS.: teor de umidade gravimétrico maior que o limite de plasticidade.

e = base do logaritmo natural.

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 também a apresentar uma aparência típica de material mais rígido, configurado pelo pico mais acentuado.

O estudo da variação da resistência à tração deste resíduo com outros índices físicos também foi feita e pode ser vista na Figura 4.57, itens (a) a (d). Em todas as relações estudadas, fica claro que há uma relação bem estabelecida entre eles até se atingir o limite de contração. Depois, devido à intensificação do processo de trincamento, esta relação não fica mais bem estabelecida. No item (d) da Figura 4.57 está a curva que associa os valores de resistência à tração da lama vermelha OP não neutralizada com o grau de saturação. Foi também obtida uma relação quase que linear entre a diminuição do grau de saturação com o aumento da resistência à tração até o limite de contração do resíduo para as amostras secas ao ar, como já havia acontecido para a lama vermelha OP neutralizada. Esta relação linear foi calculada com um coeficiente de determinação de 0,88, e está representada pela Fórmula (4.9), muito semelhante à (4.7).

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = - 8,07 (\text{grau de saturação} - \%) + 775,24 \quad (4.9)$$

OBS.: para grau de saturação maior que o do limite de contração

A taxa de ganho de resistência com a diminuição do grau de saturação para amostras secas ao ar das lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada foram, portanto, muito semelhantes. Também está na figura a relação obtida para as amostras pré adensadas a 300kPa, representada pela fórmula (4.10), com o coeficiente de determinação de 0,81, para grau de saturação acima do limite de contração:

$$\text{Resistência à tração (kPa)} = - 17,81 (\text{grau de saturação} - \%) + 1751,91 \quad (4.10)$$

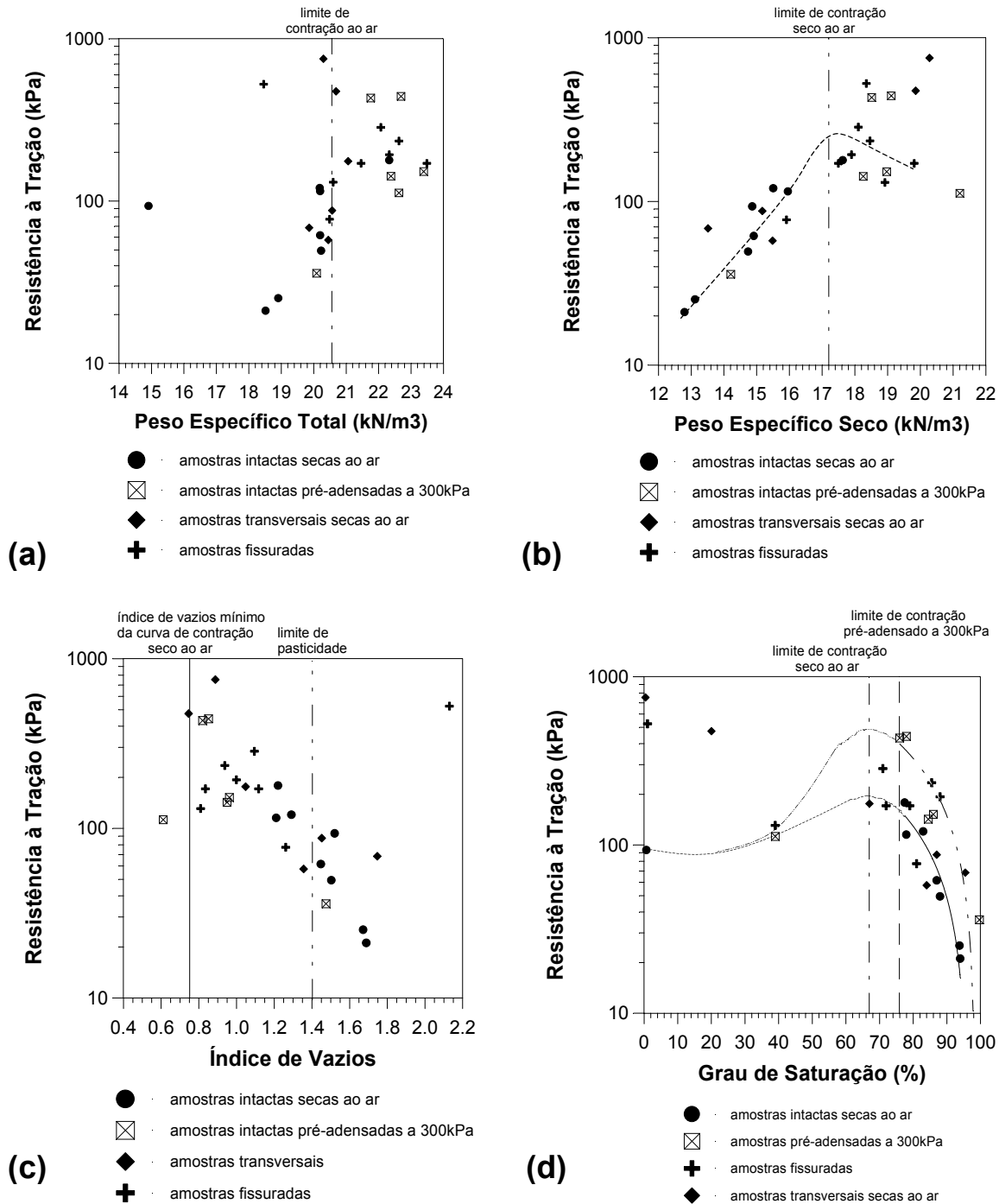


FIGURA 4.57: Resistência à Tração da Lama Vermelha OP Não Neutralizada e: pesos específicos (a) total e (b) seco; (c) índice de vazios e (d) grau de saturação.

Alguns ensaios para a lama vermelha SL pré adensada a 300kPa foram executados e os estão na Figura 4.58. Foram poucos os dados obtidos para se chegar a alguma conclusão, mas parece 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, que igualmente possui licor cáustico como fluido de preenchimento dos poros. Alguns dados ainda mais escassos da lama de lavagem de bauxita, igualmente pré adensada a 300kPa, também estão plotados nesta figura. Ela é originária da mesma bauxita que resulta a lama de lavagem de bauxita, e aparentemente apresentam comportamento similar com relação à resistência à tração. A ordem de grandeza da resistência também está de acordo com a apresentada pela lama vermelha OP não neutralizada. A curva apresentando pouco caimento pós-pico estaria de acordo com a plasticidade desta lama, que é intermediária entre a lama vermelha OP neutralizada e a lama vermelha OP não neutralizada.

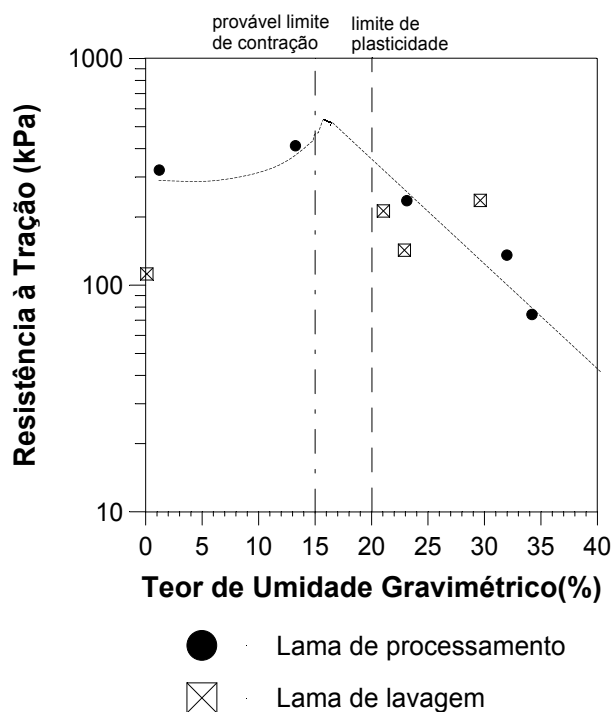


FIGURA 4.57: Relação Resistência à Tração com o Teor de Umidade Gravimétrica das Lama Vermelha SL e Lama de Lavagem de Bauxita.

4.7

Conclusões

Este capítulo apresentou uma estudo de como variam os índices físicos dos resíduos com o teor de umidade ou o grau de saturação. O objetivo final foi o de, a partir de um melhor entendimento do fenômeno da contração, facilitar a

previsão de todo o processo de ressecamento e, conseqüentemente, do comportamento e vida útil dos reservatórios dispostos pela técnica de “dry-stacking”.

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. Para o caso da lama vermelha OP não neutralizada, ele 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. Porém, no caso da lama vermelha OP não neutralizada, o ponto de dessaturação foi abaixo do valor do limite de liquidez adotado (63%).

Á partir das curvas de secagem foram estabelecidas algumas relações pelas quais fica muito simples à partir de uma medida de teor de umidade gravimétrico e conhecida 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.

Para a lama vermelha OP não neutralizada, também foram obtidas curvas de secagem para amostras que foram previamente pré-adensadas a 300 e 700 kPa antes do processo de secagem. 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 (300 kPa), mas pouco alterando quando se varia de 300 para 700 kPa.

Foi feita uma tentativa de verificação do efeito ressecamento na estrutura da lama vermelha OP não neutralizada. Para isso, após um tempo de exposição à secagem, foram moldadas amostras colocando o molde apoiado no sentido vertical, na lateral do bloco, e não na superfície horizontal exposta ao ar, como usual, e que foram batizadas de “amostras transversais”. O que pôde ser observado é que estas amostras 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. A dessaturação ocorreu aproximadamente para teores de umidade semelhantes aos das amostras pré-adensadas a 300 kPa. 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. Em alguns casos, para efeito de investigar o grau de anisotropia do resíduo, também foram ensaiadas as 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. Esta dispersão foi mais acentuada ainda para teores de umidade 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 (para valores de teores de umidade acima do limite de plasticidade ou o de contração). 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, a partir daí, reduziria em função do trincamento do solo. Este comportamento, porém, precisa também ser melhor investigado.

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 no comportamento em relação à resistência à tração com relação à sua magnitude. Também pode mostrar que o tipo de estrutura final decorrente do processo de deposição não influenciará este tipo de resistência, já que as amostras da lama neutralizada foram formadas à partir da sedimentação de um meio com menor teor de sólidos inicial que a neutralizada. Porém, é reconhecido que um número maior de ensaios tem que ser executado para se chegar a uma resposta mais conclusiva.

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 pôde ser sentido no aumento da resistência, passando a curva também a apresentar uma 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.

Com relação às variações entre a resistência à tração e outros índices físicos, como o peso específico total e seco, o índice de vazios e o grau de saturação, os gráficos de variação da densidade facilitaram a identificação das

amostras que continham fissuras. 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. A taxa de ganho de resistência com a diminuição do grau de saturação para amostras secas ao ar das lama vermelha OP neutralizada e lama vermelha OP não neutralizada foram, muito semelhantes. A relação também foi obtida para as amostras pré adensadas a 300kPa. Foi percebido que o pré-adensamento aumentou a taxa de mobilização da resistência à tração com a diminuição da saturação, deixando o resíduo mais rígido, porém a curva também apresentou grande dispersão para valores abaixo do limite de contração.

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 de contração para a lama de lavagem de bauxita.