

10

Conclusões e Sugestões para Futuros Trabalhos

O trabalho de tese consistiu na investigação mecânica e hidráulica de um perfil de alteração originário de uma rocha granito-gnaiss, de composição quartzo-feldspática. Os ensaios foram conduzidos em materiais com distintos graus de alteração e no estado compactado e indeformado. Um extenso programa de caracterização foi conduzido englobando os ensaios de caracterização geotécnica, química e mineralógica. Os parâmetros de resistência e compressibilidade foram avaliados através de ensaios de compressão diametral, compressão não confinada, cisalhamento direto e adensamento. As propriedades hidráulicas foram estudadas através da permeabilidade saturada, curva característica de retenção e curva característica de resistividade. As propriedades não saturadas foram estudadas para o solo mais intemperizado consistindo de ensaios de adensamento e triaxial com sucção controlada. As principais conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir.

10.1. Conclusões

10.1.1. Caracterização

O perfil de solo estudado encontra-se na borda da Bacia de Curitiba, e os materiais dessa região estiveram sujeitos, com grande intensidade a movimentos tectônicos de formação da calha da Bacia de Curitiba. Isso provocou no embasamento cristalino um intenso fraturamento, fato que influi consideravelmente na intemperização do material e, conseqüentemente nas características dos solos formados. No corte de aproximadamente 20 metros de altura de onde foram coletados os materiais para a presente pesquisa, o grau de intemperismo varia tanto na vertical quanto na horizontal. Pode-se verificar no perfil modificações principalmente em relação à estrutura do solo e à porosidade. A formação de meso poros e macro poros com a atuação do intemperismo pode ser avaliada através do microscópio ótico e a porosimetria de mercúrio. Ao longo do perfil observa-se a ocorrência de poros em dois ou três diâmetros distintos,

característica de solos residuais que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados.

A análise mineralógica da rocha e dos solos revelou que o quartzo é um mineral constante. Ainda se fazem presentes na rocha os minerais: plagioclásio (albita), microclina (feldspato potássico) e biotita. O ensaio de difratometria de raios X mostrou uma variação nítida do grau de intemperismo com a profundidade. Os minerais mais constantes em todo o perfil são a caulinita e a illita. A caulinita é produto da alteração dos feldspatos e a illita provavelmente é produto da alteração da biotita. Nas análises químicas é possível visualizar a intemperização do perfil através dos elementos químicos presentes. Os solos mais profundos apresentam em sua composição uma maior quantidade de cálcio e magnésio, enquanto que nos solos mais superficiais observa-se uma maior quantidade de alumínio e hidrogênio.

A composição granulométrica do perfil estudado é bastante variável. O teor médio de argila e silte no solo mais intemperizado é de 62% e no solo menos intemperizado é de 40%. As maiores mudanças de granulometria ocorrem na fração areia, que representa 58% do solo Branco e 38% do solo Marrom. O limite de liquidez e o limite de plasticidade tendem a aumentar com o decréscimo da profundidade. O limite de liquidez varia de 32 (solo Branco) a 46 (solo Marrom). O valor do limite de plasticidade varia de 27 (solo Branco) a 32 (solo Marrom). Em campo, o teor de umidade das amostras coletadas situava-se abaixo do limite de plasticidade.

O índice de vazios médio do solo Branco é de 0,51 contra 1,28 do solo Vermelho, o mais poroso. O estudo de variação dos índices físicos das amostras de solo sujeitas a processos de secagem e umedecimento mostrou que o índice de vazios desses solos praticamente não se altera com seu grau de saturação. Isto pode ser consequência da cimentação dos solos residuais. Nos solos pouco intemperizados (solos saprolíticos), a agregação ainda é pequena e a estrutura é influenciada pela estrutura da rocha mãe. Nos solos residuais mais intemperizados, a agregação é efeito da cristalização, alteração mineral e precipitação de material cimentante, como óxidos e silicatos.

10.1.2. Propriedades Hidráulicas

As curvas de retenção determinadas através do papel filtro mostram que o solo Marrom apresenta os maiores valores de sucção para um dado grau de saturação, seguido pelo solo Vermelho, Laranja, Amarelo e Branco. Este comportamento é esperado devido ao seu maior grau de intemperismo. O solo Vermelho e o solo Marrom apresentam a curva de retenção em forma de “sela”. Esse formato é peculiar de solos residuais intemperizados que apresentam poros entre partículas e poros entre agregados de partículas, fazendo com que o valor de entrada de ar nestas estruturas seja duplo ou triplo. Quanto mais intemperizado é o solo, maior é a sucção osmótica apresentada. No entanto, mesmo para o solo Branco os valores de sucção encontrados são bastante altos.

A resistividade dos solos diminui com o aumento do grau de saturação do material e aumenta com o aumento do índice de vazios. Ou seja, a presença de água favorece a condutividade elétrica e a presença de vazios prejudica a condutividade elétrica. Materiais estruturados também dificultam a passagem de corrente elétrica, enquanto que o estado desestruturado a favorece. Ou seja, a curva característica de resistividade determinada para amostras indeformadas e amolgadas pode indicar a existência de cimentação na estrutura dos solos.

As propriedades de resistividade elétrica dos solos apresentam boas correlações com outras características dos solos, tais como índice de vazios e estrutura, mineralogia e tamanho de grãos, índice de intemperismo e sucção.

Os valores de resistividade, de amostras deformadas e indeformadas, determinados para o grau de saturação de 85% apresentaram boa concordância com os índices de intemperismo ba e ba_1 , apresentando-se como uma alternativa para a classificação de solos residuais de rochas ácidas. Esses valores de resistividade também apresentaram boa correlação com a quantidade de sílica e de óxido de alumínio, fato que corrobora a influência da intemperização na resistividade elétrica.

Embora tanto as amostras deformadas como as amostras indeformadas tenham apresentado boa correlação com os parâmetros de intemperização, a relação entre elas é inversa. Enquanto para as amostras deformadas a composição dos solos é a influência principal na resistividade (por exemplo, quanto maior o teor de sílica, mais resistivo é o solo, e a sílica é um conhecido material não condutor), nas amostras indeformadas a estrutura exerce um controle considerável na passagem ou não da corrente elétrica. Por exemplo, o

solo Branco, menos intemperizado e com maior teor de sílica, é mais condutor no grau de saturação 85% do que os demais solos. Ou seja, o comportamento do solo estruturado é totalmente diferente do comportamento do solo desestruturado.

Observou-se a mesma tendência geral de comportamento para a variação da sucção normalizada com o índice de resistividade para os cinco grupos de solos estudados. Devido aos altos teores de sucção osmótica presente nos solos, obteve-se uma melhor correlação dos valores de resistividade com os valores de sucção total do que com os valores de sucção matricial dos solos. Para valores altos de IR, o valor da sucção normalizada é praticamente constante. Após esse intervalo de sucção constante, segue um trecho linear com decréscimo de IR e decréscimo de sucção e depois, novamente um segmento de valores pequenos de IR e valor de sucção constante. Os trechos com sucção constante não são observados em todos os solos, provavelmente pela ausência de dados, mas a razão linear com decréscimo de IR e de sucção é sempre observada. A existência de distintos trechos lineares pode estar relacionada à ocorrência de diferentes tamanhos de poros no material.

10.1.3. Compressibilidade

Curvas de compressibilidade dos materiais indeformados e desestruturados foram determinadas através de ensaios edométricos. Os ensaios inundados executados nos solos indeformados foram conduzidos até a pressão de 5120 kPa, mas a reta virgem dos materiais ainda não foi bem definida, principalmente para os solos menos intemperizados. Para os solos mais superficiais, a tensão de cedência encontra-se em torno de 800-900 kPa. O índice de compressão dos solos indeformados varia entre 0,12, para o solo Branco, e 0,73 para o solo Laranja. Os solos mais intemperizados tendem a apresentar um comportamento mais compressivo. A faixa de valores de índice de compressão obtida é mais dilatada que as encontradas na literatura para o mesmo tipo de solo.

Pôde-se observar que o comportamento de compressibilidade dos solos é função da estrutura e do grau de intemperismo dos solos. Observou-se que a estrutura dos solos mais intemperizados é mais influente no comportamento compressivo do que a estrutura dos solos menos intemperizados.

Foram executados ensaios de adensamento com sucção controlada em amostras do solo Marrom. Embora os ensaios com sucção tenham sido

conduzidos a níveis de tensão inferiores aos ensaios inundados, foi observada uma maior rigidez dos solos não saturados em relação ao solo inundado. Esse comportamento foi observado para níveis de tensão inferiores a 2000 kPa. Para tensões acima deste limite o comportamento compressivo do material tende a convergir.

10.1.4. Resistência à Tração

Solos estruturados podem apresentar uma componente de coesão verdadeira e a conseqüente resistência à tração. Ensaio de compressão uniaxial em corpos-de-prova saturados podem ser utilizados para determinar a componente de coesão verdadeira. Ensaio de compressão diametral podem ser utilizados para determinar a resistência à tração.

No presente trabalho, os ensaios realizados mostraram que a resistência à tração máxima dos solos compactados apresenta uma relação linear com o teor de argila. A comparação entre esses parâmetros resulta em um coeficiente de correlação de 0,995. Já para os solos indeformados não existe uma correlação linear. Para teores de argila inferiores a 10%, essa característica do solo é inversamente proporcional à resistência. Apenas para teores de argila superiores é que este passa a comandar a resistência à tração. Devido à estrutura dos solos residuais, nesse estado a resistência à tração é função, dentre outros parâmetros, da porcentagem de macro, meso e micro-poros dos solos e não é função direta da porosidade dos solos.

O valor da resistência à tração para baixos valores de grau de saturação pode ser prevista razoavelmente bem pelo método proposto por Molenkamp e Nazemi (2003) para os solos arenosos. Solos com maior teor de argila, como é o caso do solo Marrom, não tem seu comportamento bem descrito pelos métodos teóricos. Esse resultado era esperado, pois as propostas teóricas determinam a força desenvolvida pela tensão superficial e sucção em partículas esféricas.

10.1.5. Resistência ao Cisalhamento

Nos ensaios de resistência, especialmente nos ensaios de compressão não confinada em diferentes teores de umidade, os resultados apresentaram-se muito dispersos. A variação nos resultados é decorrente da heterogeneidade dos solos, representada pela variação tanto dos índices físicos quanto da existência de estrutura herdada da rocha mãe e cimentação adquirida no processo de intemperismo. A cimentação da estrutura pode ser verificada na ausência de contração dos solos naturais com o processo de secagem (com exceção para o solo Marrom) em contraposição ao comportamento de retração dos solos no estado compactado.

O processo de intemperismo destrói a estrutura da rocha, ao mesmo tempo em que vai formando novos tipos de agregações. Essa ação a princípio diminui a resistência do solo, os grãos grossos vão se transformando em fração fina, e a estrutura rígida e densa dá lugar a uma estrutura mais porosa. O solo perde em atrito e em coesão. Na medida em que o teor de argila torna-se substancial, a resistência cresce novamente, função da coesão. Tanto no ensaio de compressão simples como no ensaio de compressão diametral, o solo mais intemperizado, solo Marrom, apresenta os maiores valores de resistência quando comparado aos outros solos no mesmo estado (indeformado ou compactado).

Nos ensaios de cisalhamento direto, entretanto, o solo Branco apresenta maior resistência, principalmente pelo intercepto coesivo de 37 kPa (o solo Marrom tem coesão de 20,3 kPa). Observa-se uma diminuição do ângulo de atrito com o intemperismo, fato normalmente relatado na literatura (Souza Neto *et al.*, 2001). O ângulo de atrito do solo Branco é de 34,9°, enquanto que o ângulo de atrito do solo Marrom tem o valor de 23,4°. Observou-se a dependência do ângulo de atrito com os teores de óxidos de alumínio e ferro no perfil de intemperismo.

Existe uma correlação muito forte entre a resistência à compressão simples máxima e a quantidade de argila. Em uma relação linear entre esses dois parâmetros o coeficiente de correlação para os solos compactados é de 0,99, sendo que a reta ajustada passa pela origem. Para os solos naturais esse coeficiente de correlação é de 0,94 e, neste caso, a reta ajustada não passa pela origem. Ou seja, mesmo para um teor de argila nulo, os solos apresentariam

uma resistência à compressão. Esse é mais um indício da cimentação existente e da sua relação com a resistência dos solos.

Os solos indeformados apresentam índices de vazios superiores aos dos solos compactados no Proctor Normal. Mas, o solo Branco indeformado apresenta resistência, tanto à compressão como à tração, superior ao do solo compactado. Ao contrário, para o solo Marrom, o estado compactado se traduz em maior resistência quando comparado ao estado indeformado. Ou seja, para os solos pouco intemperizados a resistência é função não apenas da porosidade, mas também, da estrutura herdada da rocha, já para os solos mais intemperizados o acréscimo de finos e a estrutura compactada promovem uma composição mais resistente.

Ainda observa-se grande harmonia entre a variação da resistência à tração máxima e a resistência não-confinada ao longo do perfil, sugerindo que a resistência à tração possa ser determinada a partir de ensaios de compressão simples (ou vice-versa).

O modelo proposto por Vanapalli *et al.* (1996) para a previsão da resistência não saturada não se aplicou bem aos solos residuais indeformados. A resistência à compressão simples desses solos é fortemente influenciada pela sua estrutura e esse modelo não leva em consideração parâmetros que descrevam a cimentação e o tamanho de poros, por exemplo.

A avaliação do comportamento tensão-deformação através das curvas tensão cisalhante *versus* deformação axial e deformação radial *versus* deformação axial obtidas de ensaios triaxiais permitiu a identificação de mudanças de comportamento do corpo-de-prova durante. Dois pontos bem definidos e presentes em todos os ensaios foram identificados: 1º o final do patamar de E constante (na curva tensão x deformação), 2º o início de maior deformação radial (na curva deformação axial x deformação radial). O primeiro ponto pode ser identificado como o final do trecho elástico linear (possivelmente a superfície de plastificação Y_1 proposta por Jardine *et al.*, 1991), e o segundo está associado à ruptura do material.

O módulo de deformação inicial foi determinado para a deformação axial de 0,2% e tem os seguintes valores para o solo saturado: 49 MPa, para a tensão de 400 kPa, 34 MPa para a tensão efetiva de 200 kPa, e 12 MPa para a tensão efetiva de 20 kPa. No estado saturado, a rigidez do corpo-de-prova é diretamente proporcional à tensão efetiva. No estado não saturado, não foi encontrada nenhuma relação entre o módulo de deformação, a sucção no corpo-de-prova e a tensão normal líquida. Os valores de módulo de deformação variam

entre 13 MPa (sucção de 50 kPa e tensão normal líquida de 35 kPa) e 250 MPa (sucção de 150 kPa e tensão normal líquida de 150 kPa).

As curvas tensão-deformação dos solos não-saturados obtidas dos ensaios de tensão controlada e de deformação controlada apresentam um comportamento muito variado. Alguns ensaios apresentam curvas com pico de resistência, outras um comportamento do tipo *strain hardening*. Observou-se que a ruptura do corpo-de-prova está associada a um aumento significativo da deformação radial. A partir desta premissa os valores de tensão cisalhante na ruptura foram determinados.

De modo geral, a resistência dos corpos-de-prova sujeitos à sucção de 150 kPa foi superior à resistência dos corpos-de-prova sujeitos à sucção de 50 kPa, independente se o ensaio foi conduzido com tensão controlada ou deformação controlada. Também para os ensaios executados, há um aumento da resistência com o aumento da tensão normal líquida de 35 kPa para 70 kPa e um decréscimo de resistência para a tensão normal líquida de 150 kPa.

Os parâmetros de resistência de Mohr Coulomb obtidos para o solo saturado, utilizando o critério de ruptura de De Campos e Carrillo (1995), são de 19 kPa para a coesão e $25,2^{\circ}$ para o ângulo de atrito. Para o solo no estado não saturado a envoltória de ruptura é altamente não linear. Para o valor de sucção de 70 kPa o acréscimo de resistência fornecido ao solo em relação ao estado saturado é bastante alto. No entanto, para valores de sucção de 150 kPa a resistência já apresenta uma redução, indicando que esse carregamento isotrópico fornecido ao solo pode ter danificado a estrutura do elemento.

10.2. Sugestões para Futuros Trabalhos

Os resultados obtidos nesta pesquisa despertaram uma série de questões que podem ser objeto de estudos futuros. Entre elas, podem se destacar:

Definir melhor a relação entre a curva característica de resistividade e a curva característica de sucção, realizando as determinações de resistividade e sucção para um mesmo corpo-de-prova.

Definir melhor a relação entre a curva característica de resistividade e a distribuição de poros dos solos, realizando as determinações de resistividade e porosimetria para um mesmo corpo-de-prova.

Executar ensaios CRD e de compressão isotrópica nos solos residuais para melhor avaliar a cedência / quebra estrutural do material indeformado.

Executar ensaios triaxiais saturados e com sucção controlada no material residual desestruturado para definir a linha de estado crítico.

Realizar ensaios de deformação radial nula em amostras indeformadas e desestruturadas para melhor compreensão do comportamento dos solos residuais.

Por fim, sugere-se que seja efetuada a investigação de resistividade para todas os corpos-de-prova utilizados em ensaios de resistência e deformabilidade executados em solos residuais com o objetivo de minimizar a dispersão de resultados.