

CONCLUSÕES

O extenso trabalho experimental realizado ao longo desta pesquisa permite que algumas conclusões sejam delineadas, como consequência direta dos ensaios e análises conduzidas no Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR. Em conjunto com o estudo das informações disponíveis na literatura, considerações sobre o comportamento dos solos da Formação Guabirotuba podem ser efetuadas, com o objetivo de fornecer subsídios à prática geotécnica e à continuidade das pesquisas.

7.1 Evolução Geológica

A Bacia Sedimentar de Curitiba pertence ao *Rift Continental do Sudeste do Brasil* – *RCSB* (Riccomini, 1989). O *RCSB* se caracteriza pela presença de uma série de depósitos sedimentares (e.g. São Paulo, Taubaté, Resende, Volta Redonda), que se formaram a partir do Terciário em depressões alongadas e relativamente estreitas, de origem tectônica – os *rifts*. As unidades terciárias do *RCSB* possuem várias feições comuns, destacando-se a litologia das áreas fonte dos sedimentos, o ambiente e mecanismos de deposição, a granulometria e a composição dos solos. Fraturamentos de origem tectônica aparecem com frequência, tanto no embasamento como nos

sedimentos. O entendimento de que existe uma gênese comum a solos da Bacia Sedimentar de Curitiba e de outros depósitos do sudeste brasileiro pode ser útil para identificar semelhanças entre suas propriedades geotécnicas. Por exemplo, ao longo deste trabalho comparações preliminares foram efetuadas entre as argilas da Formação Guabirota e as argilas cinza-esverdeadas de São Paulo.

A gênese dos solos da Formação Guabirota envolveu a formação de um pacote sedimentar, depositado entre o Oligoceno-Mioceno e o Pleistoceno (Salamuni, 1998). O material das áreas fonte, que possuía material argiloso em abundância, foi transportado sob a forma de leques aluvionais. A natureza intermitente das torrentes de lama teria dado origem a depósitos esparsos de material arenoso. Ocorrências de conglomerados e caliches também compõem a Formação Guabirota.

A calha da Bacia de Curitiba pode ter sido preenchida até um nível que teria se situado em torno de 960 m de altitude. Após a deposição, o solo sofreu a ação de intemperismo químico. A massa sedimentar argilosa menos alterada, de coloração acinzentada, ficou caracterizada pela presença de um argilo-mineral expansivo – a esmectita. Nas camadas mais intemperizadas, em que aparecem também tons vermelhos, amarelos ou marrons, a esmectita cedeu, em maior ou menor grau, espaço a argilo-minerais estáveis, dentre os quais a caulinita é um exemplo.

Os sedimentos da Formação Guabirota tipicamente exibem uma pressão de pré-adensamento. A compreensão das causas de seu sobre-adensamento ainda é um desafio. No momento – com base em indícios geológicos, dados de ensaios de adensamento provenientes de diferentes pontos da Bacia de Curitiba e estudos do Sítio Experimental –, o autor entende que merece ser investigado um possível mecanismo inicial de sobre-adensamento por processos erosivos. Algumas propriedades dos solos da Formação Guabirota parecem estar relacionadas com a cota da superfície do terreno, o que seria um indicativo de que a bacia sedimentar possuía um nível de preenchimento pretérito. Entretanto, um simples sobre-adensamento por remoção de camadas não seria suficiente para esclarecer valores muito altos que a pressão de pré-adensamento apresenta em determinados pontos da Formação Guabirota. Ocorrências de cimentação poderiam aumentar a tensão de cedência. A ação de ressecamento se sobreporia com facilidade aos efeitos do sobre-adensamento por erosão. O comportamento do solo da Área 1 do Sítio Experimental

constitui-se em um bom exemplo dessa variabilidade, aonde tensões de cedência de até 2900 kPa foram encontradas. A continuidade das pesquisas, estudando-se em particular terrenos da Formação Guabirotuba situados acima da cota 930 m e abaixo da cota 900 m, seria particularmente útil para ampliar a compreensão dos mecanismos associados à origem do sobre-adensamento do solo.

A evolução complexa do material teria levado à formação de ligações diagenéticas entre as partículas do solo, que em alguns pontos da bacia se traduziriam sob a forma de uma intensa cimentação. Essas ligações entre partículas contribuiriam para atenuar o comportamento expansivo da esmectita.

A consistência do solo menos intemperizado quimicamente pode se mostrar elevada, particularmente quando a tensão de cedência for alta. Camadas muito alteradas possuem uma maior proporção de vazios e uma menor consistência. A ação do intemperismo químico tende a tornar variáveis, ao longo da profundidade, a plasticidade e índices físicos.

Os processos tectônicos que atuaram no *Rift* Continental do Sudeste do Brasil deixaram seu registro na Bacia de Curitiba, sob a forma de fraturamentos diversos (Salamuni, 1998). Esforços tectônicos ainda podem estar comprimindo os sedimentos remanescentes e induzindo anisotropia nas tensões horizontais. Outros mecanismos também concorreram para produzir descontinuidades nos terrenos. Um eventual alívio de pressões efetivas, devido à remoção de camadas de solo, poderia levar as regiões mais erodidas da bacia a um estado de ruptura passiva, gerando fraturas e, adicionalmente, pressões horizontais elevadas. Mudanças climáticas e variações sazonais do teor de umidade também podem ter contribuído para fraturar o solo. O acúmulo de eventos de deformação ao longo das descontinuidades deixou estrias, visíveis ou não a olho nu, e conferiu uma orientação às partículas. Macroscopicamente, esse processo se traduz no aspecto liso e brilhante das superfícies polidas e fraturamentos tectônicos.

Enquanto que o sobre-adensamento e ligações diagenéticas elevaram a consistência da matriz argilosa, as descontinuidades reduziram a resistência dos maciços como um todo.

7.2 O Sítio Experimental de Geotecnia da UFPR - Caracterização dos Perfis

No Sítio Experimental, as pesquisas contemplaram dois perfis situados no Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba. Na Área 1 do Sítio Experimental, o terreno predominantemente argiloso exibe uma consistência elevada. Embora o solo apresente alguns sinais de intemperismo químico, predomina uma coloração cinza. Ocorrências de material endurecido por carbonatos foram encontradas a cerca de 8,0 m de profundidade, as quais podem aparecer ocasionalmente em outros pontos. O perfil da Área 2 – situado a cerca de 350 m da Área 1 –, exibe intensos sinais de alteração. Na Área 2, o solo encontra-se fortemente intemperizado até profundidades que variam entre 4 e 7 m, com a presença de tonalidades vermelhas e amarelas. Mais abaixo, a argila passa a exibir as cores marrom e cinza, típicas do *sabão de caboclo*. A disponibilidade dos dois locais constituiu-se em uma boa oportunidade para estudar os efeitos do intemperismo. As investigações de campo contemplaram ambas as áreas. O estudo de efeitos de escala em estacas concentrou-se no solo pouco alterado da Área 1, bem como os ensaios de laboratório. As inspeções em poços e as amostras indeformadas revelaram que o terreno é intensamente fraturado. Superfícies polidas e outras discontinuidades, comuns nas argilas da Formação Guabirotuba, possuem uma presença marcante no Sítio Experimental.

O desenvolvimento de um processo de plintificação ou laterização tende a reduzir a consistência do material. Na Área 2, esse fato ficou evidenciado com um menor número de golpes do *SPT* e com a resistência do cone mais baixa nos primeiros metros de profundidade. A resistência do cone q_c na Área 1 rapidamente alcança 6 MPa; os sedimentos alterados da Área 2 exibem valores de q_c na faixa de 1 a 4 MPa.

Na Área 1 do Sítio Experimental, o perfil pôde ser analisado diretamente até a profundidade de 4,5 m, extensão ao longo da qual a abertura de poços permitiu que amostras fossem coletadas. O terreno apresenta menos vazios e uma plasticidade inferior à de boa parte dos sedimentos encontrados na Formação Guabirotuba. Os ensaios de laboratório mostraram que algumas propriedades do solo da Área 1 variam com a profundidade. O peso específico natural γ , que mais superficialmente se situa

em torno de 19 kN/m^3 , excedeu 20 kN/m^3 a 4,5 m de profundidade. O índice de vazios se reduz de 0,79 para 0,61 ao longo do trecho estudado. O grau de saturação é elevado, com uma média de 95 %. O limite de liquidez *LL* exhibe valores mais altos próximo à superfície ($LL > 80 \%$), decrescendo para 55-60 % ao longo do perfil. O limite de plasticidade *LP* resultou, em média, 33 %. A fração argila, que a 1,5 m de profundidade é superior a 70 %, pode chegar a 50 % em torno de 4,0 m. A variação da plasticidade no perfil está associada à distribuição do teor de argila.

O solo mais alterado quimicamente da Área 2 possui plasticidade e atividade inferiores às observadas na Área 1. Nos ensaios de caracterização, a principal diferença entre os materiais provenientes das duas áreas residiu no limite de contração *LC*. O valor típico do *LC* na Área 1, em torno de 12 %, mostra-se compatível com a presença de esmectita, a qual foi identificada com análises de difratometria de raios-X. Os valores do limite de contração das amostras da Área 2 (22-27 %), sugerem uma composição associada a argilo-minerais estáveis.

Embora argilas siltosas representem quase que a totalidade dos perfis do Sítio Experimental, estratos arenosos foram encontrados nas duas áreas investigadas, ilustrando uma importante feição dos solos da Formação Guabirotuba.

Os dados dos piezômetros instalados na Área 1 do Sítio Experimental sugerem que, mais superficialmente, a poro-pressão estaria sendo controlada por condições hidrogeológicas distintas das que ocorrem em maiores profundidades. A reduzida permeabilidade da matriz argilosa pode favorecer a formação de lençóis suspensos. Dentre outros fatores, a presença de sucções matriciais e as inúmeras fraturas existentes no terreno – algumas das quais se constituem em caminhos preferenciais para a água – podem interferir nas poro-pressões de campo. Na Área 2, um regime hidrogeológico mais bem definido, aparentemente hidrostático, foi encontrado até a profundidade de 8,9 m, ao longo da qual há dados disponíveis.

7.3 Investigações Geotécnicas de Campo

As diferentes técnicas de investigação do terreno utilizadas nas duas áreas do Sítio Experimental permitiram estudar as vantagens e dificuldades associadas a cada ferramenta, tendo-se delineado algumas tendências.

A interpretação dos ensaios de cone com base na proposta de Robertson et al. (1986), usando-se q_c e FR , mostrou resultados interessantes, com classificações do tipo de comportamento do solo sendo compatíveis com as informações de laboratório e observações de campo. As análises sugerem que o diagrama de classificação possui potencial para auxiliar na identificação das diferentes condições presentes nos perfis, inclusive com respeito ao intemperismo químico. O acúmulo de experiências poderá vir a permitir que os procedimentos de classificação sejam adaptados às particularidades dos solos da Formação Guabirotuba.

No Sítio Experimental (Áreas 1 e 2), as comparações das resistências de ponta do cone q_c com o número de golpes do SPT ($q_c = K N_{SPT}$) indicaram um fator K igual a 0,23 MPa. Entretanto, os dados apresentaram uma dispersão intensa, tornando claro que o uso de um fator empírico não substitui as medidas diretas obtidas com as sondagens.

Os ensaios com o Dilatômetro de Marchetti (DMT), realizados na Área 1, mostraram bons resultados na classificação do tipo de comportamento do solo. Entretanto, um maior número de dados ainda se faz necessário para estabelecer correlações com propriedades tais como o coeficiente de empuxo no repouso, razão de cedência e resistência não-drenada.

A resistência não-drenada (S_u) e o módulo cisalhante G dos perfis do Sítio Experimental foram avaliados com o pressiômetro autoperfurante (Sampaio Jr, 2002). Na Área 1, a resistência não-drenada de pico obtida com o método de Gibson e Anderson (1961) alcançou 300 kPa. O solo intemperizado da Área 2 (ensaios a 2,0 e 3,5 m de profundidade) mostrou resistências sensivelmente menores, na faixa de 40 a 128 kPa. A resistência não-drenada apresentou um crescimento gradual com a profundidade, particularmente na Área 2 do Sítio Experimental. Módulos de elasticidade não-drenados (E_U) foram calculados a partir dos módulos cisalhantes

associados a 0,1 % de deformação de cavidade. Os valores de E_U da Área 1 situaram-se na faixa de 300 a 615 MPa. Na Área 2, os módulos de elasticidade não-drenados variaram entre 87 MPa (2,0 m de profundidade) e cerca de 400 MPa (9,5 m de profundidade).

Os ensaios com o pressômetro autoperfurante acrescentaram informações valiosas quanto ao coeficiente de empuxo no repouso K_0 da Formação Guabirotuba. As análises indicaram valores de K_0 superiores a 3,0. As altas pressões horizontais encontradas no Sítio Experimental podem ter induzido um estado de ruptura passiva no terreno. O coeficiente de empuxo no repouso elevado poderia estar associado, dentre outras hipóteses, a um sobre-adensamento por erosão. Uma possível ação de esforços tectônicos (Salamuni, 1998) também deve ser considerada.

7.4 Fatores Intervenientes na Compressibilidade e Sucção Matricial

As análises do solo da Área 1 do Sítio Experimental sugeriram a existência de ligações diagenéticas entre partículas, conforme já havia sido postulado por outros autores para solos da Formação Guabirotuba (Duarte, 1986; Boszczowski, 2001).

Um dos indícios de cimentação encontrados no presente estudo refere-se à influência da secagem nos limites de consistência. Com o preparo pelo processo usual, que envolve secagem prévia ao ar, os valores de LL das amostras 4.0040.00, 4.0047.00 e 4.0050.00 da Área 1 mostraram-se iguais a 75, 63 e 55 % respectivamente. Em um procedimento alternativo, com solo remoldado em via úmida a partir da umidade natural (sem secagem prévia), os limites de liquidez das mesmas amostras se reduziram para 48, 47 e 45 % respectivamente. Esse fenômeno estaria associado à quebra das ligações entre partículas, que seria promovida pela secagem da amostra ao ar e seu posterior reumedecimento. No preparo por via úmida, a preservação de ligações naturais conduziria a um LL mais baixo. Outro indicativo de uma possível cimentação foi encontrado em análises granulométricas. No preparo rotineiro com secagem ao ar, as amostras 4.0040.00 e 4.0047.00 mostraram teores de argila de 70 % e 53 % respectivamente. No ensaio por via úmida, os mesmos solos passaram a

exibir, respectivamente, 51 e 23 % de material argiloso. A redução da porcentagem de argila e acréscimo da fração silte sugere que, no ensaio por via úmida, haveria uma maior parcela de ligações naturais remanescentes entre as partículas argilosas.

Indícios de uma possível cimentação também foram observados em ensaios de adensamento. A inundação de corpos de prova indeformados produziu expansões inferiores a 3 %. Em alguns casos, o aumento de volume foi nulo. Esse comportamento ocorreu mesmo com a possível presença de altas sucções matriciais (por exemplo, da ordem de 1 MPa) nos blocos indeformados. Durante a compressão edométrica, ciclos de descarregamento-recarregamento conduzidos entre 320 e 80 kPa mostraram índices de expansão C_s da ordem de 0,0033-0,0050. No descarregamento final, após uma tensão efetiva de 9060 kPa ter sido aplicada, os valores de C_s excederam 0,06. Para tensões menores, o índice de expansão seria baixo, devido à preservação das ligações naturais entre partículas. À medida que as tensões efetivas crescem, o amolgamento progressivo da estrutura aumentaria o valor de C_s . Um fenômeno semelhante ocorreria em um processo de ressecamento, em que o desenvolvimento de sucção matricial leva ao acréscimo das tensões efetivas.

A elevada rigidez do solo da Área 1, decorrente do sobre-adensamento e das possíveis ligações diagenéticas, se refletiu nas curvas características obtidas com o método do papel filtro. Para teores de umidade w situados entre a condição natural e a inundação, a tendência geral das curvas indica que pequenas variações de w podem gerar alterações significativas na magnitude da sucção matricial. Uma redução de 1 ou 2 % no teor de umidade estaria associada a um aumento na sucção da ordem de, por exemplo, 1000 kPa. Ou seja, a capacidade de sucção – definida como o gradiente da curva característica em um diagrama $w \times \log$ sucção – é baixa. No campo, as tensões efetivas podem sofrer mudanças sazonais consideráveis, em função da disponibilidade de água. As relações entre o grau de saturação e a umidade obtidas nas determinações de sucção indicam que tal fenômeno se processa mesmo com o solo estando próximo à saturação.

A baixa capacidade de sucção pode ter conseqüências na amostragem. Uma redução da umidade natural causada pelas operações de extração do bloco indeformado ou, no laboratório, durante o período de armazenamento e talhagem de corpos de prova, contribuiria para reduzir as poro-pressões e aumentar as tensões efetivas.

Uma curva característica do solo no estado indeformado mostrou uma histerese pequena, para um ciclo de secagem-umedecimento entre a condição de inundação e a umidade natural. Apesar da presença de esmectita, a inundação do solo a partir da umidade natural produziu expansões mínimas, da mesma forma como se observou nos ensaios de adensamento. A variação de volume mostrou-se significativa apenas à medida que os corpos de prova foram submetidos a trajetórias de secagem, as quais envolveram níveis de sucção matricial que excederam 10 ou 20 MPa.

O clima úmido atual concorre para manter os solos da Bacia de Curitiba com um grau de saturação relativamente elevado. Entretanto, o equilíbrio natural pode ser modificado, por exemplo, quando o solo superficial é removido em serviços de terraplenagem, áreas de empréstimo, escavações ou cavas de fundações. Devido à presença de esmectita, elevadas sucções se desenvolvem no solo ressecado. O aumento das tensões efetivas provoca uma contração volumétrica intensa, vencendo a rigidez que eventuais ligações entre partículas conferem ao material em seu estado natural. O comportamento estável que o solo possui para pequenas oscilações em torno da umidade natural não se preserva em um processo de ressecamento. O material assume um aspecto “empastilhado” ao ser exposto ao ar. Uma vez ressecado, se a água entra em contato com o terreno este se desagrega, iniciando-se um processo erosivo. Eventuais ligações remanescentes entre partículas são destruídas. Se variações sazonais de umidade reduzirem o grau de saturação, a infiltração de água nas fraturas poderia causar um “amolecimento” gradual do terreno.

7.5 Efeitos de Escala no Campo e em Laboratório – Influências das Fraturas

As diferentes fraturas presentes no terreno da Área 1 exerceram uma importante influência nos ensaios de resistência conduzidos na pesquisa. No campo, os estudos de efeitos de escala envolveram estacas escavadas com trado mecânico, sem revestimento ou lama bentonítica, solução usual de fundação na região de Curitiba. Três diâmetros nominais foram utilizados: 25, 40 e 60 cm. O comprimento adotado

para os elementos situou-se entre 11,0 e 11,5 m. Um total de doze estacas foi executado e submetido a provas de carga dinâmicas. Para se obter subsídios adicionais na interpretação das parcelas de resistência do atrito lateral e da ponta, seis estacas tiveram um disco de isopor posicionado sob a ponta. A rigidez do isopor e também dos elementos amortecedores de madeira foi avaliada previamente em laboratório. O peso específico do concreto das estacas resultou em média 21,6 kN/m³.

Os ensaios dinâmicos utilizaram um martelo de queda-livre com 49 kN (5 tf) de peso do pilão. A instrumentação, composta por acelerômetros e transdutores de deformação, foi monitorada com um analisador de cravação de estacas (*PDA*). Os resultados das análises indicaram que, no carregamento dinâmico, a presença de isopor acentuou discretamente as reflexões de tração na ponta das estacas, mas uma parcela significativa de resistência foi mobilizada. Nas estacas convencionais (sem isopor) também ocorreram mobilizações significativas da resistência de ponta. Esses fatos podem estar associados ao carregamento transiente do material sob a ponta (isopor ou solo) em condições não-drenadas, o qual tenderia a responder com uma rigidez mais alta. A reduzida compressibilidade do solo intacto não exigiria grandes deslocamentos para a ativação plena das resistências. No caso do atrito lateral, pequenos deslocamentos permanentes (negas) – da ordem de 1,5 mm por golpe – foram suficientes para mobilizar integralmente as resistências na interface solo-estaca.

Os resultados de análises *CAPWAP* mostraram uma redução do atrito lateral unitário com o aumento do diâmetro das estacas, o que caracteriza um efeito de escala. As estacas de 25 e 40 cm de diâmetro nominal apresentaram atritos laterais unitários, respectivamente, 50 e 40 % superiores aos das estacas com 60 cm. Embora possa haver um efeito de escala também na resistência de ponta, os dados obtidos não foram suficientes para precisar claramente tal fenômeno. De um modo geral, as capacidades de suporte mobilizadas nos ensaios dinâmicos resultaram elevadas. Nas estacas convencionais (sem isopor) de 25 cm de diâmetro nominal, as resistências totais situaram-se entre 1487 e 1607 kN. Nos elementos de 40 cm de diâmetro, foram mobilizadas capacidades de 2813 a 3288 kN; em uma estaca de 60 cm de diâmetro obteve-se 3782 kN. Esses resultados são compatíveis com estimativas efetuadas a

partir das resistências não-drenadas do pressiômetro autoperfurante, mas superiores às avaliações com procedimentos semi-empíricos baseados no *SPT* e *CPT*. É importante uma confirmação futura dos resultados das análises *CAPWAP* com provas de carga estáticas, bem como a investigação dos efeitos de escala em outros perfis de argila fraturada.

No laboratório, o estudo de efeitos de escala do solo da Área 1 envolveu ensaios de cisalhamento direto drenados (corpos de prova de 50×50 mm e 100×100 mm) e triaxiais do tipo *CIU* (corpos de prova de 38, 50 e 70 mm de diâmetro). Os ensaios de cisalhamento direto contemplaram duas amostras indeformadas. Nos corpos de prova com 50 mm de lado, a coesão efetiva c' e o ângulo de atrito efetivo ϕ' médios resultaram, respectivamente, 40 kPa e 31° . Quando corpos de prova de 100 mm foram ensaiados, os mesmos parâmetros se reduziram para 29 kPa e 23° , evidenciando um nítido efeito de escala. Pôde-se observar ainda a tendência dos corpos de prova menores exibirem um comportamento *strain-softening*. Nos elementos com 100 mm de lado praticamente não houve pico. O aumento de volume durante o cisalhamento foi maior nos corpos de prova de 50×50 mm.

Os efeitos de escala observados no cisalhamento direto também se manifestaram nos ensaios triaxiais. Para uma dada tensão efetiva (σ'_0), a resistência não-drenada dos corpos de prova com 70 mm de diâmetro nominal resultou inferior à dos elementos de 38 e 50 mm. O efeito de escala mostrou-se menos pronunciado para valores de σ'_0 superiores a 800 kPa. Os parâmetros de resistência efetivos também foram influenciados pelas dimensões dos corpos de prova. Para a faixa de tensões envolvida nos ensaios com os elementos de menor dimensão (38 e 50 mm), que variou de 60 a 1519 kPa, o intercepto coesivo resultou elevado, em média igual a 114 kPa, e o ângulo de atrito situou-se em torno de 21° . Nos ensaios dos corpos de prova de 70 mm ($38 \leq \sigma'_0 \leq 785$ kPa), as resistências sugeriram uma coesão nula, com o ângulo de atrito de $30,7^\circ$ assumindo um valor típico de um material “granular”. Esse comportamento – que se deve à influência das descontinuidades – é compatível com o observado por outros autores em argilas sobreadensadas fraturadas (e.g. Marsland, 1972).

A faixa de tensões associada aos efeitos de escala aqui identificados é aplicável à maioria dos problemas práticos relacionados com fundações, taludes ou escavações.

Quando ensaios de laboratório forem programados para avaliar parâmetros de resistência de materiais fraturados como os da Formação Guabirotuba, é importante o uso de corpos de prova com a maior dimensão possível. Os elementos de pequenas dimensões rotineiramente empregados – tais como corpos de prova de cisalhamento direto com 50×50 mm ou 60×60 mm, ou amostras de 38 mm de diâmetro em ensaios triaxiais – podem conduzir a parâmetros de resistência não-conservadores.

Por outro lado, em análises de estabilidade de maciços de argilas rijas e duras fraturadas, tanto a curto como a longo prazo, deve-se minorar a resistência de pico usualmente obtida com ensaios de campo ou de laboratório, mesmo se elementos de grandes dimensões forem utilizados. Além da redução da resistência operacional provocada pelas fraturas, possíveis efeitos de “amolecimento” e ruptura progressiva tornam recomendável a adoção de parâmetros de projeto inferiores aos da condição de pico. No presente estudo, uma envoltória inferida com ensaios de cisalhamento direto de solo reconstituído ($c'=0$; $\phi'=19,7^\circ$) ilustrou um critério empírico frequentemente citado na literatura – o da resistência *fully-softened* (Skempton, 1977). Entretanto, a aplicabilidade desse procedimento deve ser avaliada com cautela. Estudos mais recentes (Potts et al., 1997) demonstram que um processo de ruptura progressiva controla o comportamento de maciços escavados em argilas sobre-adensadas, e que este fenômeno decorre da presença de tensões horizontais elevadas. A complexidade dos processos envolvidos requer um aprofundamento das pesquisas, buscando-se definir critérios adequados às particularidades de cada sítio ou formação geológica.

7.6 Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba – Possíveis Mecanismos Intervenientes

Os estudos do presente trabalho permitiram delinear, ainda que qualitativamente, possíveis mecanismos que levariam as argilas rijas e duras da Formação Guabirotuba a se comportarem de uma forma instável em obras geotécnicas.

No caso de escavações, seja em cortes ou mesmo em perfurações do fuste de estacas, o “desconfinamento” associado à remoção do suporte lateral provoca um alívio nas

tensões horizontais do terreno. Caso o maciço possua poro-pressões positivas, o descarregamento determina o aparecimento de sucções. As superfícies polidas ou fraturamentos tectônicos podem não suportar as sucções impostas pelo descarregamento. Como resultado, algumas descontinuidades se “abririam”. Fraturas abertas não possuem resistência ao cisalhamento. Uma das primeiras conseqüências desse fenômeno é a queda de blocos de solo. Fraturas orientadas criticamente em relação à escavação aumentam os riscos de deslizamentos.

A presença de pressões horizontais elevadas contribui para o desenvolvimento das poro-pressões negativas associadas ao alívio de tensões. Os solos argilosos da Formação Guabirota podem reter elevadas sucções matriciais (por exemplo, 2 MPa), em uma condição próxima à saturação. Entretanto, nos materiais mais sobre-adsensados ou cimentados, o comportamento da curva característica faria com que pequenos acréscimos de umidade reduzissem rapidamente as eventuais sucções presentes. A drenagem através de lentes granulares e fraturas, bem como a infiltração de água proveniente de precipitação pluviométrica, podem contribuir para diminuir as sucções e, conseqüentemente, as tensões efetivas. A queda nas tensões efetivas é acompanhada de um decréscimo na resistência não-drenada. Uma eventual presença de pressões horizontais elevadas intensifica os deslocamentos associados à redução das tensões efetivas, o que no curto prazo pode favorecer a abertura das fraturas existentes no maciço.

A matriz argilosa pouco permeável propicia a formação de lençóis empoleirados, nos quais as fraturas e lentes granulares exercem importante controle. Excessos de pressão hidrostática podem se desenvolver nas descontinuidades, como conseqüência de uma redistribuição de água devido à escavação ou, particularmente, quando da ocorrência de chuva. A pressão em excesso na água que percola nas fraturas, associada à baixa resistência do maciço, também contribui para uma instabilidade.

A orientação das partículas nas fraturas reduz a sua resistência ao cisalhamento, que pode tender a valores residuais. Quando a esmectita for o argilo-mineral envolvido, um ângulo de atrito muito baixo estará associado à condição residual ($\phi_{res} < 10^\circ$). A resistência disponível nas descontinuidades tectônicas – ao longo das quais já ocorreram deslocamentos cisalhantes no passado – seria próxima à residual. Também

nas superfícies polidas a coesão seria mínima, e o ângulo de atrito influenciado pelos valores de ϕ_{res} do material.

A longo prazo, o maciço em questão reuniria maiores condições de se manter estável à medida que o terreno fosse capaz de sustentar sucções matriciais elevadas. Caso contrário, um processo de instabilização pode se iniciar. Para baixos níveis de tensão efetiva, a coesão do material tende a ser nula, pois o comportamento do solo é condicionado pelo atrito entre blocos delimitados pelas fraturas. As discontinuidades diminuem a resistência de pico do solo.

O desenvolvimento de uma superfície de ruptura em parte se daria pelas superfícies polidas ou fraturamentos, uma vez que tais feições representam regiões de menor resistência. Concentrações de tensões surgiriam nas regiões intactas do terreno. Caso pressões horizontais elevadas sejam atuantes, os deslocamentos subseqüentes à remoção de solo teriam uma maior magnitude. Tais movimentações também poderiam contribuir para gerar concentrações de tensões cisalhantes, principalmente na base da escavação. Concentrações de tensão implicam em deformações não uniformes. Em alguns pontos, a resistência de pico do material intacto pode ser ultrapassada. Após o pico, a curva tensão \times deformação apresenta uma queda significativa, devido à tendência de aumento de volume durante o cisalhamento e à resistência residual reduzida. Essas condições podem desencadear um processo de ruptura progressiva, que a longo prazo contribuiria para a instabilidade. O tempo necessário para que todo o mecanismo se desencadeasse dependeria, em parte, da magnitude do coeficiente do empuxo no repouso, pois o mesmo interferiria na intensidade das poro-pressões negativas a serem dissipadas e, conseqüentemente, na magnitude dos deslocamentos subseqüentes à escavação. Caso as condições do maciço contribuam para a preservação de sucções matriciais, o processo de ruptura pode não ser deflagrado. O desenvolvimento do mecanismo dependeria também da intensidade do intemperismo químico, pois o mesmo pode atenuar feições como as superfícies polidas e outras fraturas, e reduzir a intensidade das pressões horizontais.

O comportamento do solo descrito nos parágrafos precedentes também interfere na execução e no desempenho de fundações. No curto prazo, problemas como o estrangulamento de perfurações dos fustes de estacas escavadas e tubulões estão associados ao fraturamento do terreno e às reduções de tensão efetiva que infiltrações

acarretam. O atrito lateral e a resistência de ponta podem ser influenciados pelo processo de instalação, particularmente se houver a entrada de água nas perfurações através de lentes granulares ou fraturas. A concretagem das fundações deve se processar o mais brevemente possível após a escavação.

Sob condições de trabalho, a capacidade de suporte de fundações profundas tende a ser afetada por efeitos de escala causados pelo fraturamento do terreno. Nos elementos moldados *in loco*, tanto a resistência de ponta como o atrito lateral unitários podem se reduzir à medida que a seção transversal aumentar. Em estacas de deslocamento, os efeitos de escala se manifestariam na resistência de ponta unitária.

No caso de fundações superficiais, a tensão de ruptura do solo também seria influenciada pelas fraturas e pelas dimensões dos elementos. Entretanto, como fundações superficiais normalmente solicitam o terreno em um estado “confinado”, as fraturas permaneceriam “fechadas”, com a consistência do solo contribuindo para a capacidade de suporte.

As discontinuidades podem aumentar a variabilidade dos maciços da Formação Guabirota. Os efeitos dessas feições e a heterogeneidade dos sedimentos – nos quais a massa argilosa apresenta intercalações de lentes granulares – podem ajudar a esclarecer a dispersão observada no desempenho de fundações. A possibilidade da ocorrência de fenômenos de ruptura progressiva deve ser investigada tanto em fundações profundas como superficiais.

Evidentemente, a importância dos diferentes mecanismos descritos é variável. Em um dado ponto da Formação Guabirota, apenas parte dos agentes pode ser interveniente. Uma quantificação do papel que cada fator exerce e a identificação de procedimentos que permitam antecipar e evitar os problemas, ainda demandam trabalhos de pesquisa. No momento, uma atenção às condições específicas de cada local pode ajudar a evitar acidentes em obras geotécnicas.

7.7 Considerações Finais

As conclusões do presente trabalho não deixam de refletir a opinião do autor face as informações disponíveis no momento. Tendo-se em vista a dinâmica inerente a um processo de construção do conhecimento, as tendências aqui delineadas serão aperfeiçoadas à medida que novos elementos se tornarem disponíveis. Além das questões colocadas em aberto nos parágrafos precedentes, a continuidade das pesquisas encontra uma série de assuntos que podem ser abordados.

As fraturas exercem um papel decisivo na resistência ao cisalhamento, causando efeitos de escala no campo e laboratório, reduzindo a resistência operacional do terreno e interferindo na formação de superfícies de ruptura nos maciços. Esse comportamento evidencia a necessidade de um estudo específico e aprofundado sobre as diferentes descontinuidades que ocorrem na Formação Guabirotuba.

Embora indícios de cimentação tenham sido apontados, um esclarecimento de sua natureza demanda investigações. Análises mais completas da composição do solo ainda são necessárias, com particular ênfase nos cátions adsorvidos. As causas da reduzida atividade dos solos da Formação Guabirotuba merecem ser pesquisadas. A identificação da natureza das substâncias depositadas nas fraturas requer estudos específicos.

Ensaio triaxiais em laboratório podem contemplar corpos de prova com maiores dimensões, tensões efetivas mais elevadas e trajetórias de tensão distintas das aqui utilizadas, incorporando-se medições locais de deformação axial e radial. Ensaio de resistência com sucção controlada são desejáveis e medidas contínuas de sucção no campo ampliariam o entendimento dos problemas de instabilidade. Determinações de sucção matricial, envolvendo técnicas mais sofisticadas que o papel filtro empregado no presente estudo, são bem vindas. No campo, a pesquisa de efeitos de escala pode considerar fundações diretas e tipos adicionais de fundações profundas.

O estudo da magnitude do coeficiente de empuxo no repouso em diferentes pontos da Formação Guabirotuba contribuiria para o entendimento de aspectos relacionados com a evolução geológica dos sedimentos e seria útil para estabelecer critérios de projeto de escavações. A disponibilidade de parâmetros permitirá que o

comportamento dos maciços da Formação Guabirotuba seja modelado numericamente. O entendimento das questões relacionadas com o desenvolvimento de ruptura progressiva demanda análises computacionais.

A continuidade das pesquisas é fundamental para superar os desafios que a Formação Guabirotuba e outros solos com comportamento semelhante colocam à engenharia geotécnica. Nesse sentido, as palavras de Marsland (1972) não deixam de se manter atuais: *“At the present time it is essential that each type of fissured clay be regarded as a new material and studied by all means available. In this way the uses and limitations of laboratory tests, in situ field tests and other methods of field investigation will be established. This new, more flexible, approach to the study of natural soils is probably one of the most encouraging features in the development of geotechnics at the present time.”*

