

6

Conclusões e Sugestões para futuros trabalhos

6.1.

Conclusões

A partir de resultados de sondagens à percussão e geofísicas realizadas de 1992 a 2009 foi possível desenvolver um modelo geológico tridimensional representativo da estratigrafia do material de fundação do AMG. Com base nos dados das sondagens SPT foi possível determinar, de forma razoável, as cotas do topo e da base da camada de argila mole a muito mole correspondentes ao ano de 2009. O topo do material rochoso foi passível de ser inferido a partir dos resultados das sondagens de resistividade elétrica.

Com base nos resultados dos ensaios de campo (SPT com medida de umidade) e nos ensaios de caracterização, efetuados em laboratório, as seguintes camadas de solo encontradas na fundação do AMG foram definidas:

a) Camada de argila A (CH - argila de alta plasticidade), com consistência muito mole (nSPT menor ou igual a 2 golpes), teor de umidade variando de cerca de 100% a 170%, teor de finos maior que cerca de 80% e IP variando de cerca de 90% a 130%;

b) Camada de *argila B (MH - silte de alta plasticidade)*, com consistência mole a média (SPT variando de 3 a 6 golpes), teor de umidade variando entre cerca de 90% e 60%, teor de finos maior que 50% e IP maior que 60%.

c) Solo de transição compreendendo, essencialmente, solos de baixa plasticidade ou não plásticos (solo arenoso, solo residual) com nSPT maior que cerca de 15 golpes.

Considerando o conjunto dos ensaios de campo realizados no local do AMG, os ensaios de palheta forneceram resultados de resistência não drenada considerados como melhor representativos para o local. A partir de resultados de retro-análises da ruptura de um aterro experimental antigo, envolvendo novos dados produzidos no presente trabalho, definiu-se um valor de 0,62 como fator de correção dos ensaios de palheta para o solo da camada de argila A (argila muito

mole) e de 0,67 no caso da camada de argila B (argila mole a média). Tais valores estão próximos aos que seriam obtidos utilizando a sugestão de Bjerrum, baseada nas características de plasticidade das argilas.

No que se refere aos ensaios de piezocone, os mesmos foram de alta relevância na definição de perfis geológico-geotécnicos e orientação de pontos de amostragens indeformadas. Tendo como base valores de resistência não drenada corrigidos dos ensaios de palheta, o valor do parâmetro N_{KT} do piezocone variou entre 8 e 12,5.

Visando a obtenção de relações entre tensões efetivas, teor de umidade e resistência não drenada a partir de resultados de ensaios de laboratório, utilizou-se a técnica de papel filtro e um tensiômetro de alta capacidade para determinar a sucção das amostras. Os resultados obtidos indicaram que a técnica de papel filtro foi mais adequada para tal. Apesar do uso do tensiômetro propiciar determinações muito mais rápidas (ordem de minutos, contra um tempo de uma semana relacionado ao papel filtro), dificuldades associadas à manutenção da saturação deste instrumento dificultaram o uso do mesmo.

Características de compressibilidade do solo de fundação do aterro foram obtidas a partir de ensaios de carga incremental (adensamento convencional), tendo sido determinadas linhas de compressão virgem representativas da argila A, da argila B e do solo residual ou de transição. Efeitos de amolgamento mecânico foram avaliados para as argilas A e B, tendo-se verificado que as amostras obtidas foram de qualidade boa (N de 7-9). A partir de propostas existentes na literatura, foram introduzidas correções nas linhas de compressão virgem das argilas de fundação quanto ao efeito de amolgamento.

A influência da velocidade de cisalhamento na resistência não drenada da argila muito mole foi verificado ser relevante, sendo possível que efeitos de velocidade podem ser responsáveis pela diferença observada entre os ângulos de atrito efetivo obtidos de provas não drenadas e drenadas. A obtenção da resistência não drenada de provas CIU é considerada ter sido mais realista que no caso dos ensaios UU, em virtude das dificuldades de se definir tensões efetivas iniciais neste último tipo de ensaio. As correlações da resistência não drenada em função da umidade, ou de resistência normalizada (Shansep), mostraram-se adequadas (dentro do contexto da teoria de Estado Crítico) depois das correções pelos efeitos de amolgamento introduzidas. As correlações entre a umidade e a

resistência não drenada definidas nesta dissertação foram importantes, possibilitando que o S_u seja estimado a partir do conhecimento só do teor de umidade.

Análises de fluxo em regimes estacionário e transiente foram realizadas para avaliar poro-pressões atuantes na fundação do aterro em diferentes períodos de tempo. Resultados de simulações implementadas demonstraram que excessos de poro-pressão em áreas não carregadas da argila de fundação são dependentes de excessos produzidos em áreas carregadas relativamente distantes. Medidas de poro-pressão no solo de fundação, incluindo pontos localizados sob porções centrais do aterro são, desta forma, relevantes.

A avaliação de poro-pressões e, em decorrência, de tensões efetivas (requeridas na determinação da resistência não drenada a partir da normalização $S_u/\sigma'v$) mostrou-se constituir um dos principais desafios enfrentados na previsão das condições de estabilidade do aterro ao longo do tempo. Diferentes técnicas numéricas foram utilizadas na avaliação das poro-pressões (análises de fluxo estacionário para definição de condições iniciais tomando-se como base leituras piezométricas locais e análises de fluxo transiente – adensamento acoplado – visando avaliar efeitos de carregamentos e dissipação de poro-pressões ao longo do tempo). Verificou-se que a definição de condições de fluxo inicial e de parâmetros de permeabilidades do RSU e, principalmente, da argila muito mole, são críticos no momento de se encontrar fatores de segurança.

Levando-se em conta as diferentes hipóteses introduzidas, em particular no que se refere ao RSU, a condição do AMG é, de um modo geral, estável para a geometria projetada até 2012. A seção 04, tomada como representativa da aba norte do aterro, é a que apresenta maior estabilidade. A seção 16, tomada como representativa da aba sul do aterro, onde ocorrem maiores espessuras de argila muito mole, é a que apresenta piores condições de estabilidade.

O método de análise de estabilidade que se considerou mais realista foi o de equilíbrio limite utilizando as relações $S_u/\sigma'v$ obtidas para as argilas da fundação do aterro. A técnica de procura otimizada é boa para encontrar o fator de segurança mínimo nas análises de E.L e a superfície de ruptura gerada de forma qualquer (poligonal) é razoável e acreditável do acontecido no campo.

6.2. Sugestões para futuros trabalhos

Sugere-se, para investigações futuras:

- a) Complementar os ensaios de campo com sondagem e linhas de refração sísmica para definir com melhor precisão a profundidade do solo residual, rocha fraturada e rocha sã, de preferência nas seções 17, 14, 11, 07, na área da estrada circundante e na parte central do AMG;
- b) Definir as propriedades hidráulicas da argila de fundação a partir da execução de ensaios de campo tipo, por exemplo, *slug tests*, e instalar piezômetros no interior da camada de argila em diferentes pontos sob a massa aterrada, de forma a se poder propiciar uma melhor avaliação de condições iniciais de poro-pressões e uma melhor previsão de efeitos de carregamentos em diferentes pontos do aterro;
- c) Definir características de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade a partir de ensaios de campo / laboratório, bem como o peso específico total do RSU novo e antigo, de forma a possibilitar uma avaliação mais criteriosa de condições de estabilidade presentes e futuras do aterro e sua fundação;
- d) Executar ensaios tipo CK_0U nas argilas da fundação de forma a propiciar uma melhor avaliação de efeitos de amolgamento e uma validação das relações $S_u \times \sigma'_v$ obtidas, bem como o uso da teoria do Estado Crítico na interpretação dos resultados dos ensaios triaxiais executados.
- e) Executar ensaios CIU com medidas de poro-pressão à meia altura das amostras, sem o emprego de papel filtro lateral, a diferentes velocidades de deslocamento, de forma a se obter uma melhor avaliação do efeito da velocidade de cisalhamento nas características de resistência das argilas de fundação.
- f) Executar ensaios CK_0D com medida de poro-pressão à meia altura das amostras, de forma a, a partir de comparações com os resultados dos ensaios CK_0U , procurar melhor entender as diferenças observadas entre os parâmetros drenados de resistência ao cisalhamento definidos a partir dos ensaios CIU e CID.

- g) Para análises de estabilidade em tensão deformação devem-se empregar modelos constitutivos mais sofisticados, considerando o comportamento drenado e não drenado, com medida de creep (para a argila) e, no caso do RSU, modelos que colem informação do endurecimento e reforço como fibra.