

Instrumentação em obras geotécnicas – taludes e escavações

V Conf. Brasileira de Estabilidade de Encostas (V COBRAE), ABMS, Nov. 2009, São Paulo, Vol.1, p. 3-18.

Bressani, Luiz A.

Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, P.Alegre, RS, Brasil, bressani@ufrgs.br

Resumo: O trabalho apresenta uma revisão sucinta dos principais sistemas e sensores utilizados em instrumentação geotécnica de taludes (topografia, inclinômetros, piezômetros, tensiômetros) e dois métodos complementares promissores (TDR e emissão acústica), com discussão de seus condicionantes e limitações. São relatados os principais passos necessários a um bom plano de instrumentação e plano de ações, apresentada uma discussão sobre as incertezas das medidas e o papel de investigação que a instrumentação pode ter. Por fim, são apresentados alguns casos históricos de instrumentação em obras com rupturas e, onde relevante, as razões que levaram ao insucesso na interpretação ou uso da instrumentação.

Abstract: This paper presents a small review of the main systems and sensors used in geotechnical field instrumentation of slopes (topography, inclinometers, piezometers and tensiometers) and 2 complementary methods (TDR and acoustic emission - AE), with discussion on their limitations and characteristics. The main steps need for an instrumentation and action plans are described. There is also a discussion about measurement uncertainty and the role of subsoil investigation which the instrumentation can play. Some case histories of geotechnical instrumentation involving failures or unforeseen behaviour are also presented and, where relevant, the causes for unsuccessful interpretation or use of instrumentation are discussed.

1 INTRODUÇÃO

Neste artigo serão discutidos alguns dos instrumentos mais utilizados na verificação do comportamento geotécnico de taludes, as principais características dos mesmos, os problemas mais importantes na definição de um programa de instrumentação e alguns exemplos dos resultados geralmente esperados. O artigo apresenta de maneira geral, mas resumida, as etapas de planejamento e execução da instrumentação e alguns exemplos de aplicação de instrumentação.

Em geral quando se discute instrumentação, a maioria dos técnicos pensa imediatamente em instrumentos e técnicas. Entretanto, para o sucesso de um programa de instrumentação, 4 etapas principais devem ser bem executadas para que o programa tenha sucesso:

- planejamento da instrumentação;
- definição da posição e do tipo do instrumento utilizado;
- definição do pessoal envolvido e responsabilidades (envolvendo detalhes como forma dos relatórios e cadeia de informação);
- análise crítica dos resultados.

Existem diversos textos conhecidos sobre instrumentação de taludes e encostas que descrevem os principais objetivos da instrumentação e os tipos

de sensores utilizados (Hanna, 1975; Mikkelsen, 1996). O livro de Dunnycliff (1988), escrito com a assistência de Gondon E. Green, é interessante por compilar uma série de informações úteis. Na sua redação pesquisadores experientes participaram na redação de itens isolados, como A.D.M. Penmann (piezômetros), Ralph S. Carson (incertezas de medições), J. B. Sellers (cargas em elementos estruturais), entre outros.

2 CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS MEDIÇÕES UTILIZADAS

Na instrumentação de taludes e encostas, em geral há uma tendência enfatizar a instrumentação de deslocamentos da superfície e do sub-solo e nas medidas de pressões de água (Georio, 2000; Mikkelsen, 1996). Neste trabalho esta ênfase será em grande parte mantida.

Este texto descreve apenas algumas das características principais dos mais importantes tipos de medições utilizados em taludes e escavações, não fazendo comparações entre diferentes sensores ou arranjos elétricos/mecânicos. Qualquer leitor que proceda uma pequena busca no mercado nacional e internacional achará muitas opções para instrumentos e sensores que podem ser utilizados, com diferentes faixas de operação e preços. E a

tecnologia continua avançando a passos largos na melhoria dos sensores existentes e no desenvolvimento de novos equipamentos.

2.1 Tipos de sensores ou transdutores

Os sensores são os instrumentos de medida utilizados para transformar uma força, pressão ou deslocamento em uma grandeza correlacionada a ela, tal como resistência elétrica ou deslocamento de um ponteiro em medidores tipo relógio (manômetros analógicos), por exemplo. Os sensores podem ser baseados em diferentes técnicas, sendo as mais comuns os mecânicos, elétricos, pneumáticos e hidráulicos. Os instrumentos de determinação de poro-pressão (piezômetros) podem ser instrumentados com sensores hidráulicos ou elétricos, entre outros. Ou o sensor pode ser diretamente enterrado em campo, protegido apenas por um elemento filtrante (pedra porosa) e representar todo o sistema de medida. As células de carga podem ser lidas através de uma saída elétrica ou uma saída analógica, e os medidores de deslocamento podem ser lidos por instrumentos manuais (paquímetros ou trenas) ou por sensores de deslocamento (LVDTs, relógios comparadores).

Está fora do escopo deste trabalho entrar em profundidade sobre os muitos diferentes sensores utilizáveis em instrumentação geotécnica, mas é importante salientar alguns aspectos relacionados ao tipo de sensor, geometria da medição e suas interferências nos resultados.

Em relação à forma de instalação, os sensores podem ser instalados no terreno de forma permanente, no início das medições, como alguns piezômetros, ou serem colocados no ponto de medição, lidos e retirados. O exemplo clássico do segundo sensor é o inclinômetro tipo torpedo (*probe*). As diferenças fundamentais dos dois sistemas é que no primeiro caso pode-se ter leituras dos valores de medição ao longo de um grande intervalo de tempo de forma regular, desde que um sistema automático de leituras esteja instalado. No segundo caso, embora as leituras sejam discretas no tempo, já que exigem uma operação manual, o sensor pode ser calibrado e testado para verificação a qualquer momento. Existem também alguns sistemas em que os sensores podem ser instalados em campo de forma semi-permanente, de tal forma que sua retirada e calibração seja possível em certos intervalos de tempo, como os inclinômetros fixos com monitoramento contínuo.

2.2 Medidas de deformação por topografia e métodos diretos de medida de deslocamento

Métodos topográficos são utilizados para monitorar a magnitude e a taxa de deformações horizontais e verticais da superfície do terreno ou de extensômetros ou tassômetros colocados em pontos

subterrâneos. Topógrafos bem treinados em técnicas complementares simples (apoios de miras e técnicas de minimização de erros) podem obter medidas de ótima qualidade, tanto em acurácia quanto em precisão, utilizando equipamentos e técnicas convencionais (Standing, 2009).

Os métodos topográficos são importantes porque permitem referência geral e ampla em área, permitem uma verificação simples e rápida quando algo necessita ser medido com rapidez, geralmente com custo acessível, facilidade de instalação e grande confiabilidade se bem operados.

Os métodos topográficos são ainda utilizados como auxiliares no controle de cotas de boca dos furos de piezômetros, como controle do deslocamento do topo de tubos de inclinômetros, como métodos de verificação de recalques gerais e suas áreas de influência em superfície.

São muitas as possíveis variantes de medição utilizando topografia ou métodos diretos de medida. Entre eles os mais utilizados são medidores de trincas em superfície (que utilizam desde medidas manuais com trenas, paquímetros ou sistemas automáticos com sensores de deslocamento); extensômetros de superfície, utilizando arames tensionados entre 2 referências; ou medidas de deslocamento lateral de uma linha de piquetes estabelecida em campo. O importante é a flexibilidade do sistema que permite que diferentes medidas sejam obtidas em pouco tempo, de forma confiável e adaptada a cada problema.

As características gerais dos métodos topográficos ou de medida direta fazem com que eles sejam especialmente úteis em situações emergenciais, já que podem fornecer medidas confiáveis em questão de horas. Em muitos casos emergenciais a precisão buscada é menos importante do que a velocidade de obtenção da medida. Assim, medidas de deslocamentos com precisão de $\pm 2-5$ mm obtidas em horas podem ser muito mais importantes do que medidas com precisão de $\pm 0,5$ mm obtidas em 5 ou mais dias, especialmente se as taxas de deslocamento/tempo forem consideradas.

2.3 Deslocamentos Subterrâneos – Inclinômetros, Extensômetros

2.3.1 Extensômetros

Os extensômetros aqui considerados são sistemas que utilizam barras de aço ancoradas em pontos bem determinados no sub-solo e com seu deslocamento relativo medido na superfície. Isto permite determinar de maneira direta quanto de deslocamento está ocorrendo em diferentes áreas do sub-solo. Quando a topografia controla a extremidade dos extensômetros, pode-se ter medidas de deslocamento absoluto além da deformação de massas de solo. Geralmente são associados ao

controle de deslocamentos ao longo de superfícies bem conhecidas ou como medidores complementares aos inclinômetros e medidores de superfície. Podem medir deslocamentos até deformações bastante grandes.

2.3.2 Inclinômetros

Os inclinômetros são sensores de verticalidade que monitoram a variação da inclinação de tubo-guia, especialmente instalados em campo. São reconhecidamente os sensores mais úteis na determinação dos movimentos do sub-solo pela sua precisão na identificação das principais regiões de movimento. Existe toda uma série de cuidados na instalação do tubo-guia ranhurado e na forma de medição que estão bem descritos na literatura específica e manuais dos equipamentos (Mikkelsen, 1996 e Dunncliff, 1988), devendo-se salientar:

- importante garantir que a extremidade do tubo esteja ancorada em região estável;
- cuidados em preencher completamente o espaço entre o tubo guia e o furo de sondagem (solo granular ou *grout* de areia-bentonita e cimento).

A diferença entre as leituras em diferentes datas e aquela considerada inicial, ou zero, indica as mudanças relativas na posição do tubo, sendo possível calcular os deslocamentos horizontais que o mesmo sofreu. Há muitos exemplos na literatura de medidas obtidas com inclinômetros. Apenas a título de exemplo, a Figura 1 mostra um gráfico de

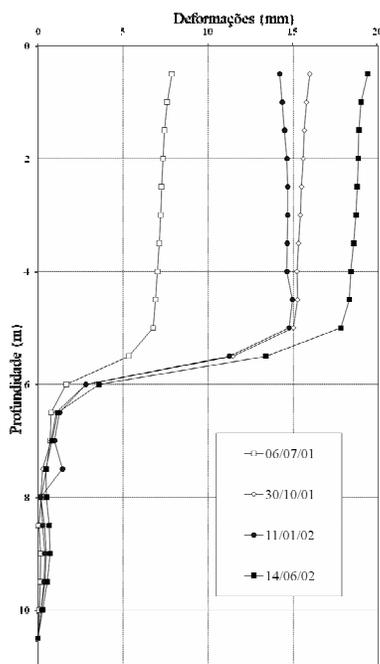


Figura 1 – Gráfico de medidas com inclinômetro em talude com movimento bem definido em Santa Cruz do Sul (Eisenberg, 2003).

deslocamentos medidos por inclinometria em um talude de Santa Cruz do Sul, RS, monitorado por Eisenberg (1993).

2.4 Pressão de Água Positiva – Piezômetros e Medidores de Nível de Água

A pressão de água nos solos tem um aspecto fundamental nos problemas geotécnicos pela relação direta com as tensões efetivas que ocorrem no maciço e é dos fatores mais importantes na estabilidade de taludes. São elas fundamentalmente que causam variação de comportamento dos maciços, seja por variação de resistência ao cisalhamento, seja por variação de sua rigidez.

As poro-pressões positivas são função do fluxo de água existente no sub-solo e pode variar muito em função de redes de fluxo confinadas, fluxo ascendente ou paralelas ao talude. Exceto em problemas simples de geologia bem conhecida, o fluxo de água e as poro-pressões associadas são uma incógnita. Nestes casos os piezômetros e, secundariamente, os medidores de nível de água, precisam ser instalados para permitir o conhecimento e monitoramento de suas variações.

Embora as diferenças fundamentais de instalação e funcionamento dos piezômetros e medidores de nível de água sejam bem descritas na literatura geotécnica, um aspecto merece ser enfatizado: o piezômetro é um medidor de pressões *pontual* e para isto é preciso selar a área em que a medida é feita. Os medidores de nível de água determinam um nível médio de água que chega a um equilíbrio dentro de um poço de pequeno diâmetro ou furo de sondagem com revestimento permeável.

Os piezômetros são, portanto, arranjos que medem pressão de água em uma região delimitada do maciço. A Figura 2 mostra um croqui simplificado da instalação de um piezômetro de tubo aberto e o selo de vedação para que somente a pressão na região do filtro seja medida. No caso do piezômetro de tubo aberto, a determinação da coluna de água de equilíbrio dentro do tubo permite o cálculo da pressão de água na profundidade do filtro. Isto pode ser feito de diversas maneiras, sendo as mais comuns o uso de medidores de nível elétricos tipo buzina (“pio”), ou por injeção de bolhas de ar e medida da pressão do gás, ou por uso de transdutores de pressão elétricos colocados no fundo do furo. Cada sensor tem características diferentes quanto à estabilidade de leitura, facilidade de uso, custo, confiabilidade e possibilidade de monitoramento contínuo. Note que a carga hidráulica dentro do tubo pode ser diferente da altura determinada pelo Nível de Água regional (como indicado pela linha horizontal à esquerda do piezômetro).

O fato de que a pressão de água existente na ponta com filtro tenha que ser equilibrada por uma coluna de água dentro do tubo de medida, faz com

que o tempo de equilíbrio das pressões depende da permeabilidade do solo (fator mais importante), sendo influenciado também pelo tamanho do filtro, diâmetro do tubo e diferença de pressão (veja Penmann, 1960; Dunnicliff, 1988, para detalhes).

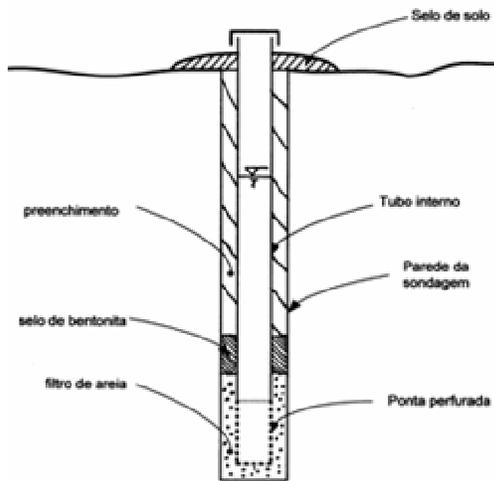


Figura 2: Detalhes construtivos do piezômetro de Casagrande (tubo aberto).

A utilização de transdutores de pressão de pequeno volume e grande rigidez (pequena relação volume/pressão – cm^3/kPa), diretamente enterrados no terreno, reduz muito os tempos de resposta das medidas. Isto é importante em materiais argilosos de baixa permeabilidade, porque as variações de poro-pressão podem ser rápidas dentro do solo (caso de carregamentos ou descarregamentos), mas levarem muito tempo para serem medidas por instrumentos com grande flexibilidade. Este ponto é bem referido na literatura geotécnica de solos moles e argilas em geral, sendo importante no aspecto de conformidade de medidas.

Em solos de maior permeabilidade, o problema de flexibilidade do sistema pode ser menos importante porque os tempos de resposta são curtos. Porém, esta alta permeabilidade muitas vezes faz com que as variações transientes de poro-pressão no maciço sejam muito rápidas. Com isto os intervalos de medição têm que ser adequadamente pequenos, sob o risco de não medir importantes picos de pressão. A Figura 3 mostra dados de monitoramento contínuo do nível de água dentro de um piezômetro de tubo aberto, com medidas a cada 2 h. Os 3 picos de pressão causados por chuvas intensas não foram percebidos pela leitura manual em piezômetros próximos devido à rapidez da oscilação. Neste caso uma alta frequência de leituras é fundamental para determinação de valores transientes da poro-pressão.

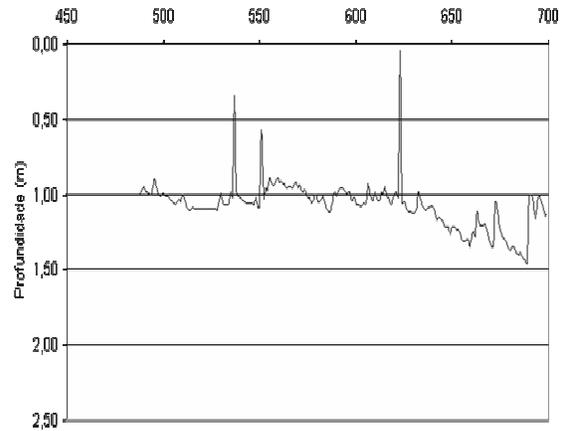


Figura 3: Exemplo de rápida variação das poro-pressões num talude de solo coluvionar de Santa Cruz do Sul (Eisenberg, 2003) – medidas automáticas com intervalos de 2 h.

2.5 Cargas – células de carga de tirantes e elementos de reforço

Nos casos em que as medidas de cargas sejam necessárias em tirantes ou chumbadores, é possível instrumentar estes elementos com células de carga comerciais, ou especialmente construídas, instaladas na extremidade dos apoios. Nos casos dos grampos e reforços a instrumentação de cargas é mais difícil, pois o interesse é de monitorar as cargas ao longo dos reforços e para isto é necessário instrumentar diversas seções ao longo do comprimento, ou com inserção de células de carga em série com o reforço ou com instrumentação do próprio elemento. Nos casos de elementos de aço, sensores do tipo resistivo (*strain gages*) podem ser colados diretamente no tirante ou barra em ponte completa. No caso de materiais poliméricos ou fibras em geral, a instrumentação exige técnicas especiais.

2.6 Pressão de água negativa – tensiômetros para solos não-saturados

Nos problemas que envolvem solos não-saturados, há a necessidade de medir os valores de sucção (poro-pressões negativas) dentro da massa de solo. Para isto é preciso utilizar os tensiômetros, que são aparelhos capazes de medir valores de pressão na água abaixo da pressão atmosférica (valores negativos).

2.6.1 Tensiômetros de baixa sucção (tipo agrônômicos)

São instrumentos bastante conhecidos e utilizados na agricultura, sendo capazes de medir sucções tipicamente na faixa de 0 a 70kPa (equivalente a 7m de coluna de água). Existem equipamentos que utilizam colunas de mercúrio para indicar a sucção

ou modelos mais simples com manômetros de vácuo (pressões negativas). O grande problema com estes medidores é a dessaturação que muitas vezes ocorre, sendo necessária a manutenção periódica para saturação do equipamento. Uma vez dessaturado, o equipamento não é mais capaz de ler as sucções e, ao dessaturar, ele libera água para dentro do solo, afetando as medidas. Seu tempo de resposta depende também da permeabilidade não-saturada do solo e da flexibilidade do sistema de medida. Nos casos de solos de baixa permeabilidade não-saturada, este tipo de instrumento pode apresentar uma grande não conformidade de medidas.

2.6.2 Tensiômetros de alta capacidade (TAC)

O desenvolvimento destes tensiômetros ocorreu na Inglaterra na década de 90 (Ridley & Burland, 1993 e Marinho e Chandler, 1995). É possível medir com eles sucções de até 15 atm negativas, embora o intervalo de confiança seja até 7-8 atm, tipicamente. Nos períodos secos do centro do país, tem sido medidos valores de sucção muito elevados, os quais se reduzem durante o período chuvoso, mas não a ponto de zerá-los. Assim, é possível fazer projetos em que estes valores de sucção, e a correspondente resistência ao cisalhamento, possam ser considerados. Os sensores utilizados são elétricos e bastante rígidos, permitindo monitoramento contínuo e apresentando baixa flexibilidade (alta conformidade).

Ridley (2009) tem utilizado uma adaptação destes sensores para monitorar a sucção presente em taludes em argilas plásticas de baixa permeabilidade no Reino Unido como forma de monitoração da estabilidade e planejamento de intervenções. Esta técnica tem sido aceita por seguradoras e tem levado a definição de prioridades de obras.

3 OUTROS INSTRUMENTOS: TDR E EMISSÃO ACÚSTICA

3.1 Time domain reflectometry (TDR)

Este método utiliza um cabo coaxial inserido no terreno e ancorado com uma mistura de solo-cimento (*grout*) ao longo de todo o comprimento. O cabo pode ser utilizado então como um sensor de deformações já que, ao ser deformado, muda suas características elétricas localmente, sendo que variações de umidade ou temperatura têm pouca ou nenhuma influência na medida (Dowding *et al.*, 1988). Para efetuar as medições, um pulso eletromagnético é enviado pelo cabo e as reflexões de pontos deformados do cabo podem ser localizados de forma precisa. O tempo que o sinal refletido leva para ir e voltar determina a localização da zona de cisalhamento e a voltagem de reflexão é proporcional à deformação do cabo, podendo ser

diretamente correlacionada à deformação do maciço (Su *et al.* 2009). Um problema que existe é a possibilidade de danos à proteção dos cabos, o que permite a entrada de água e mudança nas suas características elétricas.

O uso do TDR é muito interessante porque é mais barato de instalar do que os inclinômetros convencionais, pode ser adaptado para sistemas de monitoramento contínuo e eles continuam a funcionar até deslocamentos muito maiores do que é possível para os inclinômetros. Eles podem cumprir uma função muito importante como instrumentos complementares no monitoramento de grandes escorregamentos, permitindo monitorar a baixo custo os deslocamentos subterrâneos em diversos pontos.

3.2 Emissão acústica (EA)

O uso de emissões acústicas (EA) no monitoramento de taludes e escavações é interessante porque pode indicar movimentações incipientes bem antes do que elas se tornem visíveis ou mensuradas por outros sensores (Dixon *et al.*, 2003). Entretanto, existem dificuldades importantes no desenvolvimento de sistemas confiáveis de monitoramento de EA em campo: (a) dificuldades de obtenção de EA de maciços deformando em profundidade, devido à atenuação das emissões; (b) problemas com a contaminação das medidas pelo ruído ambiente; e (c) a natureza qualitativa dos critérios de interpretação (em geral definidos com termos como 'sem emissões, níveis moderados, níveis altos ou muito altos').

O trabalho descrito por Dixon *et al.* (2003) foi o desenvolvimento de um sistema que pudesse medir as emissões acústicas (EA) e quantificá-las de maneira mais direta. Para contornar os problemas de atenuação que as AE sofrem no solo, normalmente é sugerido utilizar tubos metálicos inseridos no solo para servirem de transmissores passivos das emissões. Um desenvolvimento adicional, proposto por aqueles autores, foi a construção de um sistema ativo de guias de ondas acústicas, composto por um tubo metálico colocado dentro de um furo de sondagem e rodeado de material selecionado, como areia ou cascalho. O material de preenchimento do furo, ao ser deformado por possíveis movimentos, gera as EA de acordo com suas próprias características. O tubo metálico serve como condutor destas ondas acústicas para um sensor colocado na superfície.

Dixon *et al.* (2003) testaram dois materiais granulares (areia e cascalho) em testes realizados em escala real, com resultados promissores. O monitoramento com transdutores piezoelétricos de ressonância foi feito dentro de uma faixa relativamente estreita de frequências para evitar o ruído ambiente (15-45kHz), e as medidas foram realizadas em intervalos contínuos de cerca de 3 min

(para reduzir o número de dados para serem tratados), nas datas escolhidas para o monitoramento. A comparação dos resultados obtidos com esta técnica e medidas de inclinômetros mostraram resultados interessantes. Num caso apresentado pelos autores, a energia medida pelos transdutores piezoelétricos cresceu ao longo do tempo de forma muito similar às curvas de deformação acumulada medidas em inclinômetros convencionais (Figuras 4 (a) e (b)).

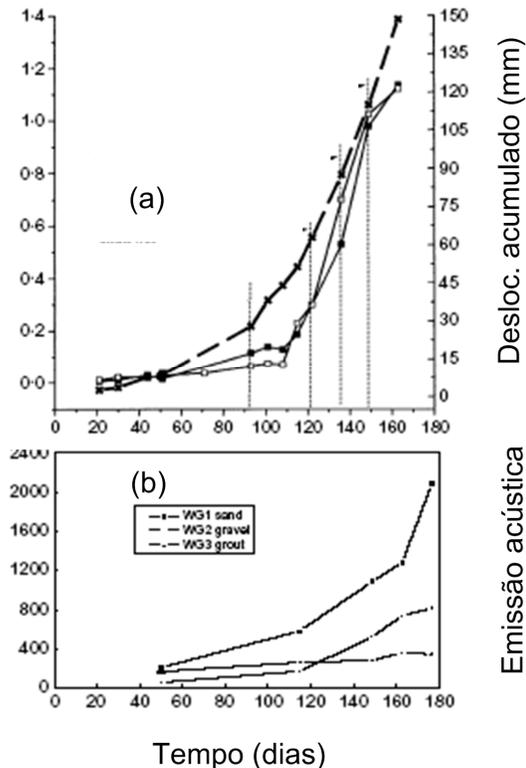


Figura 4: Monitoramento de ruptura de talude na costa da Inglaterra (a) gráfico de deslocamento acumulado *versus* tempo - inclinômetros convencionais; (b) área sob a curva medida nos transdutores de EA *versus* tempo.

Por outro lado, em outro caso, o sinal de AE monitorado apresentou claramente um grande pico coincidente com o início da aceleração dos movimentos indicado por um inclinômetro e ao início de movimentos indicado por um segundo inclinômetro, mas não apresentou mais variações significativas para movimentos adicionais da escavação (Figura 5).

4 OBJETIVOS E PLANEJAMENTO DA INSTRUMENTAÇÃO

4.1 Principais objetivos da instrumentação

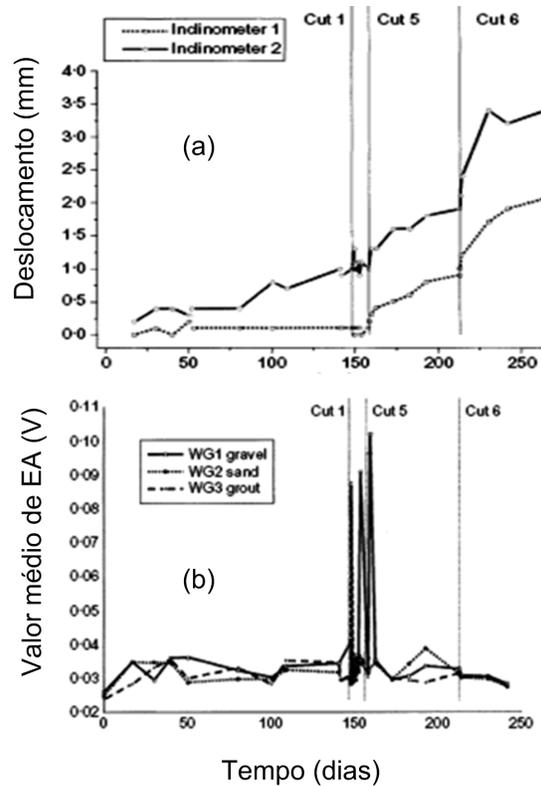


Figura 5: Monitoramento de uma escavação feita em etapas (a) deslocamentos de 2 inclinômetros *versus* tempo e (b) valores médios de EA *versus* tempo (modificado de Dixon et. al., 2003).

Na sua revisão de instrumentação de taludes, Mikkelsen (1996) comenta que a instrumentação de campo é mais frequentemente utilizada em situações de encostas ou escavações que já tenham mostrado movimentos. Nestes casos, geralmente as características gerais dos escorregamentos podem ser facilmente observadas e incorporadas no planejamento da instrumentação. Entretanto, pequenos movimentos do solo ou de uma massa rochosa antes, ou mesmo durante a ruptura iminente, normalmente não são visualmente evidentes. Portanto, o valor da informação que se pode obter por observação da superfície do terreno é limitada e a instrumentação pode fornecer dados valiosos.

Mikkelsen (1996) também elenca as situações típicas para as quais vários instrumentos são utilizados:

- determinação da profundidade e da forma da massa escorregada em um escorregamento já desenvolvido (para utilização em retro-análises);
- determinação dos movimentos laterais verticais e laterais absolutos dentro de uma massa escorregada;

- determinação da taxa de deslocamento (velocidades) de forma a servir como aviso de perigo iminente;
- monitoramento da atividade de talude escavados ou encostas com estabilidade marginal e identificação dos efeitos de construção ou de chuvas;
- monitoramento dos níveis de água subterrâneos, ou das poro-pressões, normalmente associados com movimentações;
- estabelecimento de um sistema de alerta através de medidas remotas que possam alertar a população de possíveis perigos;
- monitoramento e avaliação da efetividade de medidas de controle adotadas.

4.2 Planejamento básico necessário

Intuitivamente todos desejam quantificar a magnitude do risco de um desastre potencial, mas o que devemos medir, onde e com que precisão?

A resposta está vinculada aos dados de topografia, geologia, níveis de água e propriedades dos materiais (Mikkelsen, 1996, Dunnicliff, 1988). O problema da instrumentação geralmente requer informação variando de escala geral para uma escala mais refinada, envolvendo uma variedade de instrumentos. Esta metodologia recomenda que sejam instalados um número de sensores mais simples e de menor custo, em geral mais confiáveis, ao lado de alguns sensores mais sensíveis e precisos, mas de confiabilidade menor. Por terem custo de instalação menor, sensores e técnicas simples podem ser instalados em ampla área, de forma a garantir que diversos possíveis mecanismos de movimento ou variáveis geotécnicas possam ser avaliados dentro do orçamento.

Para explicar de forma direta as diversas etapas de um bom plano de instrumentação, adaptamos abaixo a sequência proposta por Franklin (1977), a qual deveria ser seguida em um projeto típico de instrumentação.

4.2.1 Predição do comportamento do terreno, níveis de perigo e planos de ação

A primeira etapa de um programa de instrumentação refere-se ao entendimento do projeto que será instrumentado. Para isto é necessário conhecer adequadamente a geometria e a geologia do problema, os níveis de água esperados, as tensões de solo (ou sobre as estruturas) e a sequência executiva (escavações, cortes, rebaixos temporários, concretagens, sobre-cargas, etc.). Na maioria dos problemas geotécnicos algumas destas variáveis não são conhecidas de forma adequada, e a instrumentação está sendo colocada lá para verificar as hipóteses (*controlling*). De qualquer forma, mesmo que conhecidas de forma imprecisa, estas

premissas de projetos tem que estar bem estabelecidas no planejamento e compreendidas por todos.

A partir daí é preciso ter uma previsão do comportamento do terreno durante as obras e dos possíveis mecanismos de movimento, para identificar locais críticos de movimentos, tensões ou poro-pressões. É bastante importante também fazer previsões sobre magnitudes esperadas das variáveis que serão monitoradas e os valores esperados para taxas de variação (mm/dia, kPa/etapa ou kPa/dia, por exemplo), o que é certamente difícil na maioria dos empreendimentos.

Uma etapa muitas vezes desconsiderada na instrumentação refere-se ao que fazer se a instrumentação mostrar que algo não está correndo bem, isto é, se as variáveis medidas ficarem acima do aceitável. Isto é conhecido como Plano de Ação ou Plano Emergencial. Estas medidas devem ser planejadas de antemão e discutidas com todos os envolvidos, pois, se necessário, devem ser implementadas em questão de horas ou dias para que sejam eficientes.

Alguns exemplos de obras e seus respectivos Planos de Ação:

- construção de uma barragem de terra com compactação em camadas – se o monitoramento das poro-pressões do solo geradas pelo alteamento da estrutura mostrarem valores acima de certos patamares, reduzir o ritmo da obra e acompanhar as deformações do maciço. Possível alteração da geometria da barragem.
- construção de paredes diafragma estrocnadas para metrô em áreas urbanas – se o monitoramento das cargas nas estrocnas mostrar valores acima dos considerados aceitáveis, suspender ou reduzir o ritmo da escavação, reforçar a região (tirantes ou estrocnas adicionais), checar demais condicionantes;
- construção de túneis em solo – se o monitoramento das deformações do revestimento em uma certa seção indicar movimentos acima dos previstos, parar o avanço, reforçar o revestimento da área, rever condições do material escavado, aumentar a frequência das medidas.

Um dos grandes problemas dos Planos de Ação é a definição dos níveis de alerta. Eles devem ser baseados em valores que configuram situações-limite entre um comportamento esperado, normal, e o comportamento que indicaria que algo precisa ser feito adicionalmente. Geralmente estes valores são baseados em experiência prévia com outras obras ou em análises numéricas do comportamento da obra.

A Tabela 1 mostra uma situação de uma grande escavação subterrânea em rocha, na qual foram estabelecidos 3 níveis de ação em função das deformações medidas na parede da escavação

(Franklin, 1977). Para cada limite de deformação corresponde um Nível de Alerta e uma ação prevista. É importante que as medidas de estabilização sejam planejadas para os diversos níveis de alerta, incluindo emergências. Isto significa não só o planejamento do que fazer, mas como fazer: materiais, equipamentos e recursos humanos bem definidos e disponibilizados na obra. Assim, se num problema de taludes a obra prevista para controle da poro-pressão é a abertura de trincheiras drenantes, é importante ter disponibilidade e estoque de materiais drenantes, maquinário necessário, pessoal experimentado e controle da execução (locação e profundidades).

Tabela 1 – Exemplo de Níveis de Alerta em uma escavação subterrânea em rocha (Franklin, 1977)

Nível de alerta	Critério	Ação
1	Movimento maior do que 10 mm em qualquer ponto	Relato verbal ao engenheiro da obra
2	Movimento maior do que 15 mm em duas posições adjacentes ou velocidade maior do que 20 mm/mês	Relatório verbal, reunião na obra seguida por relatório escrito com recomendações.
3	Movimento maior do que 15 mm e acelerando (qualquer ponto)	Inspeção imediata por engenheiro consultor, reunião na obra, execução de medidas de estabilização.

4.2.2 Plano geral de medições

O chamado Plano Geral de Medições é onde se definem o quê e onde medir e os custos do sistema, levando em conta as equipes necessárias e as tarefas. Para isto é necessário determinar os seguintes itens:

- Objetivos: deslocamentos, pressões de água ou de terra, cargas.
- Instrumentos: escolha, calibração, detalhamento do *layout* de campo, desenhos detalhando instrumentos (locação, profundidade, cabos elétricos, tubos, unidades de leitura). Critérios: facilidade de instalação, economia, proteção contra equipamento de obra e vandalismo.
- Medições: onde medir: identificar seções/profundidades e estabelecer prioridades quando medir: duração da obra (começar antes para obter medida “zero”); frequência de leituras (acompanhar etapas importantes); definir programa/cronograma detalhado; estimar tempos de leitura, etapas da obra que são importantes; ajustar frequência em função dos valores sendo medidos; pontos críticos

que são observados tem frequência ajustada de acordo.

- Pessoal: número de pessoas (um único operador dos instrumentos é preferível); definição de responsabilidades.
- Definição de hierarquia: responsabilidade por relatórios e ações decorrentes; definição de procedimentos.

Importante: bom relacionamento entre os membros da equipe e compreensão de cada tarefa e sua importância.

4.3 Influência dos materiais e do tipo de obra

Embora a importância do planejamento da instrumentação de encostas e taludes seja bastante enfatizada na literatura, isto nem sempre é exemplificado adequadamente. Qualquer engenheiro que esteja envolvido num plano de instrumentação, rapidamente reconhece que as situações abaixo envolvem necessidades e instrumentos diferenciados, em função do tipo dos materiais e obra.

- Taludes de corte em solos coluvionares – geralmente apresentam deformações de valor acentuado, comportamentos diferentes e bem definidos com divisões coincidentes com contatos litológicos, pressões de água controlados pela diferença de permeabilidade entre o colúvio e os solos inferiores. Os colúvios tendem a apresentar curvas tensão-deformação sem pico e, em campo, os movimentos são grandes e claramente cumulativos e muitas vezes sazonais. A permeabilidade dos colúvios brasileiros tende a ser na faixa dos materiais arenosos (10^{-4} m/s).
- Taludes de corte em solos saprolíticos (residuais jovens) – geralmente apresentam pequenas deformações pré-ruptura e o comportamento pode ser definido por estruturas reliquias ou descontinuidades herdadas da rocha mãe. Geralmente as deformações variam de forma gradual com a profundidade, sem limite característico até próximo da ruptura. As pressões de água podem ser comandadas por lentes de maior permeabilidade ou pelas descontinuidades.
- Taludes de corte em rochas alteradas ou sãs – em geral os deslocamentos pré-ruptura são muito pequenos, sendo difíceis de serem monitorados de forma eficiente. As pressões de água medidas são muito dependentes do grau de fraturamento do maciço. Maciços muito fraturados apresentam níveis de água mais bem comportados (pressões variam de maneira mais predizível, há transição suave vertical e lateralmente). Maciços pouco

fraturados podem apresentar grandes e rápidas variações de pressão localizadas.

- Encostas naturais em solos parcialmente saturados – diversos estratos de solos, com a vegetação tendo um papel importante na saturação dos solos. Os movimentos podem ser variáveis lateral e verticalmente, sendo dependentes do nível de sucção apresentado pelos solos. A sucção varia com as precipitações acumuladas e com a evapotranspiração da encosta, variando sazonalmente em profundidade, mas podendo variar rapidamente em resposta às chuvas. Há dificuldades na medição, e caminhos preferenciais de percolação de água podem ter forte influência nas medidas.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

A apresentação dos resultados é uma etapa muito importante no processo, porque serve de controle da qualidade das medidas, permitindo a checagem dos dados, além de consolidar a informação.

Deve-se observar o seguinte:

- estabelecer os procedimentos de cálculo (calibrações, escalas, formas de leitura, zeros, referências, trocas de equipamentos);
- arquivos de resultados - manter as planilhas originais para referência;
- frequência de relatórios (tornar a informação disponível no momento necessário; definir formatos e tempos – amarrado ao cronograma da obra ou avanço)
- se houver boa integração entre equipes, relatórios sintéticos e seqüenciais;
- tabelas/gráficos – definir como os dados serão apresentados (*versus* tempo – marcando eventos importantes, *versus* estaca ou etapa de obra) e estabelecer escalas padrões. Gráficos de cada etapa e gráficos cumulativos. Indicar trocas de equipamentos e possíveis erros de medição, indicação clara dos pontos de leitura.
- As escalas adequadas não exageram ou diminuem fenômenos e são mantidas por todo o tempo da obra. Exemplos de gráficos: deslocamentos contra tempo, deslocamentos x chuvas, velocidades x tempo, aceleração x tempo.
- hierarquia/responsabilidade - cada folha ou desenho é assinada e datada pelo executante; quem mede também calcula e desenha. Este auto-controle elimina facilmente erros com trocas de aparelhos, ou outros justes necessários, aumenta a confiança nos resultados, e facilita a resposta a questionamentos futuros.

Problemas típicos que podem ocorrer: acumulação de leituras sem preparação de gráficos

ou relatórios sucintos, provocando atraso em adotar medidas. Causas: muitas leituras para pequena equipe. É preferível reduzir número de pontos de medição, mas manter relatórios atualizados. Como regras (Franklin, 1977): (i) normalmente o tempo de preparação dos dados é similar ao tempo de leitura; (ii) os intervalos dos relatórios tem que ser mantidos (ou aumenta equipe ou reduz pontos de leitura ou automatiza leituras).

6 ASPECTOS DA INTERPRETAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

6.1 Incerteza nas medidas dos sensores

Em relação aos sensores utilizados na instrumentação deve-se sempre estabelecer o grau de variabilidade ou incerteza nas medidas obtidas pelo sensor e sistema de medidas (cabos, leitoras, manômetros, etc.). Esta incerteza, inerente ao sistema utilizado, é diferente da incerteza geológica associada aos problemas de variabilidade dos dados em campo, que será discutida adiante.

Os sensores e seu sistema de medida (sensor, cabos, leitoras, etc.) têm suas incertezas relacionadas a: conformidade, acurácia, precisão, resolução, sensibilidade, linearidade, histerese e ruído (Dunnicliff, 1988). Será apresentado aqui apenas um breve resumo destes itens, sendo indicado ao leitor interessado a leitura das referências.

Conformidade significa que o valor medido é igual à grandeza que tinha no meio sem a interferência do sensor; uma adequada conformidade significa que o sensor *não alterou este valor*. Exemplo: a medida de poro-pressão não é afetada pela colocação de um medidor rígido. Acurácia mede a proximidade da medida obtida ao valor verdadeiro (em geral relacionado como porcentagem do fundo de escala – $FS \pm x\%$); geralmente calibrado em laboratório. Precisão é a proximidade de cada uma de várias medidas à média aritmética destas medidas (~repetibilidade). Isto pode ser muito melhorado se cada medida for, na verdade, a média de várias medidas individuais. Quanto mais preciso, menor o número de medidas necessárias, *mas isto não afeta a acurácia* (desvio do zero, por exemplo). Sensor ideal é o preciso e acurado. Sensor bom é o acurado embora pouco preciso (mais medidas são necessárias).

Resolução é a menor divisão de escala que tenha estabilidade de leitura; é comum um indicador digital fornecer 4 dígitos após a vírgula, mas somente 3 serem estáveis. Sensibilidade é tipicamente medida como (mV/mm ou mA/kPa); indica a resposta do sensor a variações da grandeza medida. Linearidade está relacionada à forma da equação de calibração, onde geralmente se procura respostas lineares. Histerese representa a diferença entre as respostas do sensor quando carregado e

descarregado a plena escala; indesejada, mas comum de ocorrer em sistemas com atritos mecânicos. Ruídos são interferências externas à medição causadas por vibrações, efeitos eletromagnéticos, oscilação da voltagem de excitação; a variação de temperatura, se não eliminada por um projeto adequado do sensor, pode ser incluída como ruído, podendo ter uma interferência muito grande.

Estes fatores e os fatores humanos, podem gerar os erros nas medições. Calibração adequada, leituras realizadas de maneira sistemática, rotinas de cálculo bem estabelecidas e equipes bem treinadas reduzem estes erros de sensores a valores admissíveis.

6.2 Incertezas dos parâmetros

Embora seja comum esperar que a investigação geotécnica do projeto defina todos os dados necessários para o projeto, não se deve esperar que todas as incertezas sejam removidas pela investigação. É aceitável encontrar algumas discrepâncias durante a obra em relação ao que foi previsto a partir da investigação geotécnica.

Em obras com instrumentação, estas novas observações devem ser analisadas e incorporadas tanto ao projeto em si como na revisão da instrumentação, fazendo-se as adaptações julgadas necessárias. Em geral, somente pequenas mudanças são realizadas durante a obra, como aumento de cargas em tirantes ou em seu espaçamento, mudanças na sequência de escavação e suporte, reajuste das obras de drenagem. Nos casos em que as novas condicionantes geológicas encontradas sejam fundamentalmente diferentes das originais, isto pode levar a mudanças fundamentais nos critérios de projeto e na própria concepção da obra. Em qualquer das duas condições, a instrumentação instalada terá que ser avaliada em função destas novas condicionantes.

Grande parte das medidas são basicamente medidas *pontuais*, sujeitas à variabilidade da geologia ou outras características e podem, portanto, não representar as condições de uma escala maior. Nestes casos Dunnicliff (1988) recomenda que um grande número de pontos de medida seja adotado, até que se possa ter confiança nos dados. Por outro lado, o mesmo autor cita que muitas das medidas de movimentos respondem a deformações de zonas grandes e representativas dos maciços (*medidas médias*) e, por isto, dados de instrumentos isolados podem ter sentido; conclui que as medidas de deformação são geralmente as mais confiáveis e menos sujeitas a dúvidas.

Um caso interessante desta incerteza é relacionado à medição de poro-pressão em taludes de solos saprolíticos com discontinuidades. A Figura 6 mostra as medidas de poro-pressão obtidas de 4 piezômetros colocados em um talude com uma família de discontinuidades. Como pode-se observar, a maioria dos piezômetros indica pressões

pequenas, com respostas provavelmente lentas em relação às chuvas, exceto aquele correspondente à posição (2).

A tendência natural é a de ignorar este resultado como espúrio por erro de medição (erro humano, calibração, variação do zero, etc.). Embora a possibilidade de erro deva ser analisada sempre, deve-se investigar simultaneamente outras possíveis razões para este resultado. Neste exemplo, o fato de a ponta do piezômetro estar dentro de uma pequena lente ou descontinuidade de alta permeabilidade que responde rapidamente às chuvas. Qualquer gráfico de variação da poro-pressão *versus* a chuva acumulada em x dias tenderá a ter um conjunto com respostas lentas e um outro (no exemplo apenas o piezômetro 2), com respostas rápidas.

Esta discussão mostra um dado estatístico interessante: quando uma variável *pontual*, como a poro-pressão ou permeabilidade, tiver uma alta dispersão de resultados em campo, sua variabilidade média é pequena. No entanto, se a dispersão é pequena, a variabilidade dos extremos pode ser importante.

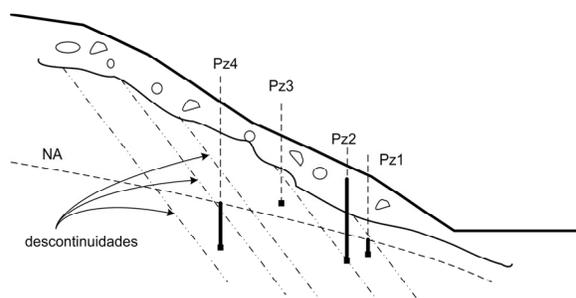


Figura 6: Medidas de poro-pressão em maciço de solo com descontinuidades permeáveis logo após período de chuvas.

6.3 Instrumentação como ferramenta de investigação

Como ponto de partida a todo o processo de planejamento de instrumentação, sempre há o desenvolvimento de idéias (a) sobre as causas do escorregamento; ou (b) sobre as prováveis causas de um futuro movimento ou (c) os limites espaciais e a forma das superfícies de ruptura potenciais. Em geral se trabalha com um Modelo Geomecânico (MG) que envolve a topografia superficial e subterrânea, materiais e níveis de água. Isto pode ser comparado a um diagnóstico do problema, definido como “juízo declarado ou proferido sobre o perfil e sua composição e as características do comportamento de um talude ou encosta, com base nos dados e/ou informações obtidos por meio de investigações.” É um modelo interpretativo.

Note que, embora todos os trabalhos sejam baseados nas informações geotécnicas e topográficas anteriores, que são de boa qualidade em muitos projetos, não se deve esquecer que a

instrumentação é um meio de obter informações adicionais que podem, *ou não*, ser francamente complementares. Em alguns casos, as medidas podem ser diretamente conflitantes. Nestes casos é interessante analisar os dados da instrumentação com uma visão de ferramenta de investigação.

Alguns exemplos simples para deixar claro o que está sendo discutido:

- quando medidas de inclinômetros mostram valores de deslocamento lateral em profundidade, porém medidas de deslocamento do topo do tubo (topografia convencional) mostram que há movimentos laterais não medidos. Causa: há superfícies de ruptura mais profundas, não identificadas ou não consideradas pelo Modelo Geomecânico.
- quando certos pontos do terreno parecem ter movimentos inesperados (verticais ou laterais, por topografia), não condizentes com outras observações (visuais ou de sub-superfície). Causa possível: movimentação de pontos considerados fixos e utilizados como referência de medidas, extensão lateral dos movimentos maior do que estimado (problema em áreas urbanas em que uma estrutura distante do problema crítico é considerada estável e utilizada como referência, mas se movimentou);
- medidas de poro-pressão não condizentes com os valores esperados (expectativas baseadas ou em modelos numéricos, ou em outras medições próximas ou em experiências anteriores). Causas possíveis: caminhos preferenciais de água no sub-solo não conhecidos, processos de geração de poro-pressão não considerados (artesianismo, drenagem inferior, geração não uniforme de pressão por carregamento ou cisalhamento localizado).

Este papel investigativo da instrumentação geralmente não é especificamente considerado, já que todas as etapas de planejamento requerem que haja um entendimento da geologia e das fases de instrumentação para que as seções de instrumentação sejam escolhidas. Assim, a instrumentação é colocada para verificar se está tudo correndo bem, de acordo com este modelo escolhido. Quando a instrumentação mostra algo diferente, as primeiras verificações são: a instrumentação, a execução, o projeto. Se utiliza como base de análise os modelos conceituais conhecidos até ali. Isto é um procedimento fundamentalmente correto, já que este é o procedimento a ser seguido inicialmente.

Assim, se um sensor de deformações indica que há deformações grandes em certo ponto, o que está sendo feito é comparar esta deformação com a prevista na sequência executiva do projeto. Mas a seção básica de projeto continua válida ou durante a construção foram percebidas nuances de

geologia/materiais? Estas mudanças irão afetar o comportamento real ou as previsões? (se o problema fosse re-analisado com os novos dados). Estes novos dados foram incorporados na interpretação das medidas?

Um dos problemas que pode ocorrer em taludes com geologia muito variável e de grande espessura de solos é a definição do ponto de ancoragem do inclinômetro. Na verdade, somente após a realização das leituras do inclinômetro e do controle do topo do tubo é que se pode assegurar que a extremidade inferior está estável.

Para esclarecer esta discussão é interessante verificar alguns dos casos históricos relatados adiante, em particular as construções subterrâneas em Londres, que são exemplos de instrumentação bem documentados.

É interessante observar que há uma similaridade entre os processos de investigação geotécnica e o de instrumentação também quando há problemas ou falhas nos resultados. Analisando as razões que levam a que as condições gerais geotécnicas em um empreendimento sejam grosseiramente diferentes das assumidas a partir das investigações, Osterberg (1979) cita 5 razões gerais para estas falhas, que se aplicam bem à instrumentação:

- o planejamento e a análise das investigações não levou em conta adequadamente os processos geológicos presentes no local;
- o investigador já tinha idéias pré-concebidas do que deveria ser encontrado e, em geral inconscientemente, relutou em aceitar e até mesmo negou-se a considerar evidências contrárias a estas idéias;
- nem todas as possíveis ferramentas de investigação foram utilizadas na investigação, muito embora elas possam ser simples e óbvias;
- o responsável não discutiu adequadamente os objetivos da investigação com todos os envolvidos;
- linhas diretas de comunicação sem restrições não foram estabelecidas.

Pode-se acrescentar ainda problemas relativos à pressão econômica ou urgência em efetuar a obra, quando as equipes de instrumentação (ou de investigação) ficam submetidas a grandes tensões para não atrapalhar a produção, já que seu trabalho atrasa os demais.

7 ALGUNS CASOS HISTÓRICOS

7.1 Construções subterrâneas da Jubilee Line, Londres

Standing & Burland (2006) descrevem as investigações feitas ao longo da construção da extensão dos túneis da Jubilee Line em Londres, quando grandes variações de volume foram medidas ao longo de 2 km de construção. Durante o projeto,

as perdas de solo de 2% foram adotadas como valor conservador; na prática, perdas maiores do que 3% foram medidas na região de Westminster. Como estas estimativas de perdas eram fundamentais para critérios de aprovação de outras obras, uma série de investigações adicionais foram feitas, permitindo definir as seguintes conclusões relatadas naquele trabalho: (a) o método de escavação utilizado (avanço da frente) era responsável por cerca da metade das perdas medidas ocorrerem antes da frente chegar ao ponto de medida; (b) a parte superior do revestimento de um dos túneis está exatamente abaixo de uma divisão da argila de Londres, a qual contém numerosas partes de areia e silte, o que aumentou muito o potencial de perdas na escavação. Os autores mencionam nas suas conclusões a importância da geologia de engenharia no entendimento do problema, mesmo em um sítio como Londres onde décadas de experiência em túneis e condições do terreno são bem caracterizadas.

No contexto deste trabalho seria interessante mencionar que as medições da instrumentação eram feitas de maneira sistemática, os erros das medidas foram reduzidos a valores muito baixos por procedimentos bem estabelecidos e as técnicas utilizadas foram basicamente as de topografia de precisão convencional por pessoal altamente treinado (Standing, 2009).

Nesta mesma região a instrumentação das estruturas da Casa dos Comuns (House of Parliament) e a torre conhecida mundialmente como Big Ben tiveram seu comportamento de inclinação e recalque monitorados e foram estabilizadas com sucesso por injeção de compensação. Esta técnica e seus resultados estão bem descritos em Burland (2006).

É interessante mencionar que alguns anos, antes ao ser escavado o estacionamento subterrâneo do parlamento ao lado da torre do Big Ben, grande cuidado foi tomado com as deformações da torre e estruturas vizinhas. A instrumentação utilizada foi da melhor qualidade assim como as previsões numéricas e os controles de execução. Entretanto, durante a obra, a torre começou a adernar de forma preocupante. Embora todas as cautelas estivessem sido tomadas, as cargas em tirantes e a sequência executiva estivessem como planejado, a torre movia-se. A obra foi suspensa, a instrumentação checada sendo que as demais estruturas se comportavam dentro do previsto. Após algum tempo de sérias preocupações, a torre começou a movimentar-se de volta, no sentido da verticalização.

A movimentação, que era real, havia sido um efeito sazonal de variação de umidade nas fundações da torre devido à diferença de insolação entre os extremos de inverno e verão (Burland, 2006). Era um fenômeno desconhecido até então. Efeito parecido já havia sido relatado por Tschebotarioff

(1978) em relação à oscilação diária de um minarete de uma mesquita do Cairo (Figura 7).

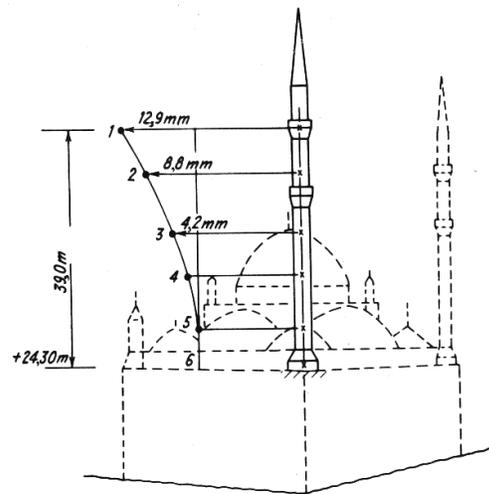


Figura 7: Oscilação reversível de um minarete de 39 m de altura da cidade do Cairo entre o nascer do sol e às 15h – efeito da variação da temperatura nas fundações (Tschebotarioff, 1978).

7.2 Escavação experimental de Selbourne

Um trabalho experimental envolvendo uma ruptura induzida em uma escavação em argila pré-adensada, através de recarga de água em furos de sondagem, foi descrito por Cooper *et al.* (1998). A escavação foi instrumentada com um grande número de sensores. A Figura 8 mostra um padrão interessante das deformações medidas em inclinômetros colocados dentro do maciço e a forma da ruptura observada. É interessante observar que as deformações medidas indicaram movimentos até uma distância semelhante à própria altura do corte, estando concentradas em uma profundidade próxima da transição de materiais observada em campo. Houve diversas evidências de ruptura progressiva até a formação da superfície de ruptura observada.

7.3 Ruptura no metrô de Heathrow

Um dos piores acidentes de engenharia civil do Reino Unido nos últimos 25-30 anos foi a ruptura de um túnel em construção sob a área central de terminais do aeroporto de Heathrow, na noite de 20-21 de Outubro de 1994. Uma análise bastante rigorosa das causas do acidente foi feita e publicada em forma de Relatório (HSE, 2000). Este relatório menciona o uso de injeções de compensação de recalque sem um adequado controle como uma das causas do acidente. Entretanto, o Relatório enfatiza muito o problema de organização e planejamento das obras (incluindo análise dos resultados da instrumentação) como problemas principais. Abaixo algumas das frases retiradas diretamente daquele relatório:

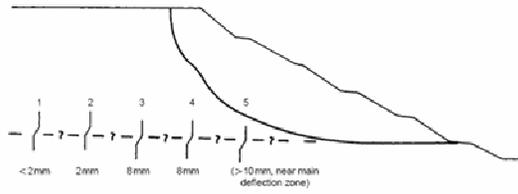


Figura 8: Deformações medidas por inclinômetros em escavação de Selbourne (Cooper *et al.*, 1988).

- “Os colapsos poderiam ter sido evitados, mas um foco mental cultural focou atenção nas economias aparentes e na necessidade por produção, ao invés de atentar para riscos particulares. Desde os primeiros estágios das rupturas até o colapso final, houve falhas em demonstrar o necessário nível de cuidado e erros sérios foram feitos. Avisos do colapso em vias de acontecer (*approaching collapse*) estavam presentes desde fases iniciais da construção, mas não foram reconhecidos (pág. 8)”;
- “A investigação encontrou que os erros humanos eram meramente uma consequência de falhas organizacionais predizíveis. (...) As causas do acidente estavam enraizadas nas falhas dos sistemas ‘defensivos’ que não consideraram adequadamente a identificação dos riscos, meios de evitá-los e ou reduzi-los”;
- “A falha em prever adequadamente os recalques de superfície em trabalhos com multi-túneis teria uma consequência significativa durante a construção” (pág. 23);
- “As pessoas envolvidas não conheciam os mecanismos críticos de ruptura considerados no projeto. Em particular em relação à sensibilidade do revestimento de fundo (*invert*).”
- “A instrumentação do túnel especificada era inadequada para o monitoramento dos movimentos cruciais do levantamento deste revestimento. De maneira geral, níveis de alerta, contra os quais monitorar as magnitudes e velocidade de variação, não foram estabelecidos pelo projetista.”
- Em uma série de comentários sobre as medidas, fica claro que a forma de apresentação dos dados não facilitava o entendimento do processo de deformação dos túneis. “Em alguns casos, informação fundamental não foi desenhada (a variação das cordas medidas por convergência).”

A descrição do processo de ruptura feita no Relatório é interessante, sendo parte dela reproduzida abaixo.

“Em 16 de Agosto de 1994, engenheiros da NATM notaram fissuras circunferenciais em ambas as paredes (...). As fissuras se propagavam para

cima e se alargavam. Entre 17 e 21 de agosto, o movimento da Camborne House sofreu uma aguda reversão de movimento, de levantamento (*por injeção*) para 9 mm de recalque. A combinação de ruptura do *invert* e fissuramento vertical das paredes era significativo, na medida que o *invert* estava coberto por aterro temporário e permaneceu invisível enquanto as paredes proviam um indicador diretamente observável de ruptura. Entretanto, é inaceitável que as pessoas somente se deram conta da severa distorção pela aparência das fissuras. Uma análise dos dados de monitoramento no tempo correto e uma revisão de engenharia deveria ter identificado os danos iniciais.”

7.4 Carsington Dam Failure

A barragem Carsington Dam rompeu logo antes do final da construção, de forma rápida, em 1984. A ruptura começou na ombreira direita e se espalhou pelo vale com um comprimento total de quase 500m (Skempton e Vaughan, 1993).

A Figura 9 mostra a seção transversal do talude de montante da barragem como projetado e construído. A barragem contava com um núcleo com formato especial (*boot*) como forma de reduzir ao máximo a percolação pela fundação. A barragem estava apoiada em solo argilo-siltoso e argila plástica marrom-amarelada. A altura total da barragem era de 37m, tendo a construção iniciado em maio de 1982 e prosseguido ao longo de 3 verões, com paradas durante o inverno.

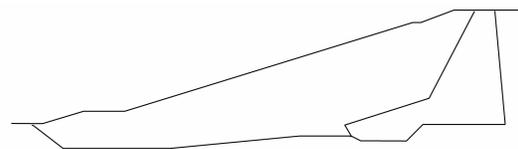


Figura 9: Seção transversal do talude de montante da barragem Carsington Dam, mostrando o núcleo tipo “bota” construído de material argiloso sobre uma fundação considerada competente (FS~1,6 para resistência de pico - Vaughan, 1994).

Em agosto de 1983 uma pequena berma foi colocada no talude de montante como compensação para um aumento da velocidade de construção. Observações das poro-pressões e recalques foram feitas durante a construção em quatro seções instrumentadas e medidas de deslocamento de pinos na face do talude de montante foram monitorados a partir de agosto de 1983.

Após a ruptura, uma extensa de investigação foi feita e dados foram coletados durante a reconstrução. Foi determinado que a ruptura passou pelo núcleo e ao longo de uma camada superficial da fundação. Os materiais ali presentes eram frágeis e com baixas resistências residuais, com a superfície de ruptura passando através de lentes argilosas

presentes logo abaixo do contato entre fundação e aterro compactado, as quais não haviam sido consideradas (ou reconhecidas) no projeto.

A Figura 10 mostra os dados de deslocamento medidos nos pinos colocados no talude de jusante em relação à cota de construção da barragem, até a ruptura. O comportamento de deformação dos pinos mostra claramente uma deformação por fluência durante o inverno de 1983 e certo enrijecimento posterior do solo da fundação, seguido por uma variação rápida logo antes da ruptura.

Utilizando os dados da investigação e resultados de ensaios de laboratório, Dounias, Potts e Vaughan (1990) fizeram análises numéricas que demonstraram que a ruptura progressiva podia ser modelada adequadamente se as características geométricas e de comportamento da fundação fossem bem conhecidas. A Figura 11 mostra a seção analisada no programa de elementos finitos, considerando a camada frágil da fundação, e os vetores de deslocamento obtidos.

Vaughan (1994) ao sumarizar os principais resultados obtidos comenta que nestes materiais de comportamento frágil, uma vez iniciada a ruptura a resistência ao cisalhamento operacional média se reduz e o escorregamento tende a acelerar. Portanto, a ruptura do aterro foi abrupta, com pouco aviso e a massa rompida se deslocou certa distância, até que um novo equilíbrio fosse atingido. O autor enfatiza a importância de modelar os materiais realisticamente, de acordo com seu comportamento de laboratório e verificado em campo (inspeção e instrumentação).

Neste caso, a interpretação dos dados da instrumentação não foi capaz de indicar a ruptura devido a falhas na concepção da instrumentação decorrentes de falhas na investigação e concepção do modelo geomecânico. Nas palavras de Vaughan (1994) “em problemas de engenharia geotécnica, a compreensão do comportamento real é mais importante do que cálculos acurados”.

8 COMENTÁRIOS FINAIS

Os instrumentos utilizados devem ser adequados ao tipo de movimento, magnitude e velocidades esperados, que são função do problema a ser investigado. Casos de instrumentação de poro-pressão em solos muito permeáveis necessitam uma frequência de monitoramento bastante alta.

Os instrumentos têm apresentado um grande desenvolvimento tecnológico ao longo dos últimos anos, em especial devido à eletrônica, tornando-se cada vez menores, mais precisos e acurados e de menor custo (condições de laboratório). Mesmo assim os programas de instrumentação de obras ainda são encarados como custosos, pelo comprometimento que todos os envolvidos têm que ter com o programa e por que a instrumentação interfere com a produção (afeta ritmo da

construção). Além disto, nos casos em que a obra funciona bem, a instrumentação é considerada excessiva ou dispensável, embora certamente esta não seja a visão das seguradoras e projetistas menos conservadores.

É importante salientar que uma boa instrumentação muitas vezes pode ser feita com medidores simples e de baixo custo. É plenamente possível fazer um programa de instrumentação de taludes (ou de outras obras) seguindo grande parte dos conceitos apresentados utilizando-se medições manuais, observações visuais sistemáticas, medidas de níveis de água com uso de bóias em poços ou medidas de deslocamentos feitas com topografia básica. O importante na instrumentação é ter medidas significantes ao problema e que permitam entender o fenômeno com confiabilidade e com a precisão necessária à análise, o que muitas vezes significa uma precisão relativamente baixa para os equipamentos modernos ($\pm 1\text{cm}$ nos deslocamentos de superfície, por exemplo). A mais desejada das características de um bom programa de instrumentação é a confiabilidade das medidas (Dunnicliff, 1988).

A instrumentação de taludes ou escavações pode cumprir os seguintes objetivos:

- forma de controle de obras, permitindo verificar se as hipóteses de projeto estão corretas ou para verificar se as deformações, esforços ou poro-pressões são aceitáveis durante as etapas de execução;
- meio de monitoramento do comportamento de taludes naturais, especialmente os de maior porte (com movimentos sazonais, por exemplo);
- forma de investigação indireta do sub-solo; no caso de taludes que apresentem sinais de movimento, fornecendo indicações sobre nível(eis) de água, tipo e forma dos movimentos (que pode servir de indicativo para camadas de sub-solo).

Naturalmente existem situações mistas, em que a instrumentação é colocada para monitorar um comportamento limite e serve tanto com monitoramento como controle de obras. É o caso de grandes taludes instáveis em áreas urbanas, que são monitorados de forma a verificar quando o comportamento indica uma situação de risco que exija obras ou outras intervenções. Neste caso o problema é conhecido, existem projeto de estabilização ou intervenção que, pelo custo ou prioridade, só serão implementadas se houver real necessidade. A instrumentação ajuda a definir estas prioridades e a melhorar a relação “custo/benefício” das obras numa certa área.

A instrumentação deve ser entendida como um processo onde é importante que haja confiança nos equipamentos (funcionamento, calibração, erros), nas medidas (técnicos qualificados) e no treinamento das equipes para tomar medidas

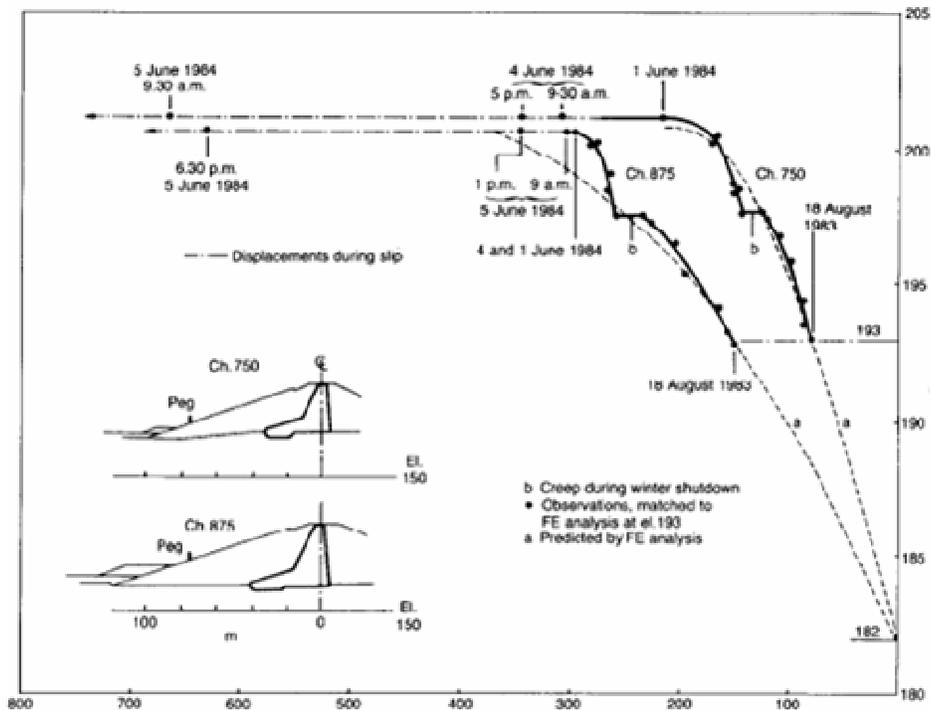


Figura 10: Deslocamento de pinos de controle do talude de montante *versus* cota de construção da barragem, mostrando fluência durante o inverno de 1983/84 (sem construção) e a súbita aceleração pouco antes da ruptura (Skempton e Vaughan, 1993).

adequadas a partir de sua interpretação.

Dos casos históricos analisados podemos ressaltar: (a) que medidas simples, mas confiáveis são de grande utilidade; (b) medidas de baixo custo permitem uma ampla cobertura em área e profundidade; (c) o caráter complementar de instrumentação e investigação, mesmo em locais como o centro de Londres, investigado competentemente há décadas; (d) medições de grande qualidade podem medir alguns efeitos normais, mas até então desconhecidos, tais como oscilação de temperatura ou sazonalidade de umidade (oscilação de torres, por exemplo); (e) materiais frágeis apresentam pequena deformação pré-ruptura e, se não identificados previamente, podem ter seus sinais de ruptura não reconhecidos.

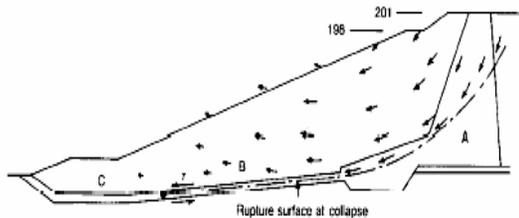


Figura 11: Seção transversal utilizada na modelagem numérica e vetores de deslocamento encontrados na modelagem numérica (Vaughan, 1994).

Em recente relato do estado da arte em monitoramento e previsão de comportamento de obras geotécnicas Negro Jr. et al. (2009) comentam “Mesmo para a maioria dos casos publicados desde 2000, parece que os dados de solos nos quais o projeto e as análises são baseadas frequentemente vem de investigações de solos simples e às vezes rudimentares. Resultados de ensaios de adensamento, triaxiais e mesmo cisalhamento direto **em amostras de alta qualidade** são raramente relatados. Para fazer previsões realísticas e realmente tirar lições de retro-análises, são requeridos dados de solos de alta qualidade.”

Para encerrar, complemento frase do Prof. P.R. Vaughan (1994): “Em problemas de engenharia geotécnica, a compreensão do comportamento real é mais importante do que cálculos acurados”. Esta compreensão é idealmente estabelecida na fase de projeto, mas pode ser ajustada pela interpretação dos dados de instrumentação e investigação complementar durante a obra. Se por motivos diversos isto não for atingido, resta aos engenheiros geotécnicos proceder uma análise criteriosa dos dados pós-ruptura, para entender o comportamento real.

9 AGRADECIMENTOS

O autor agradece o convite do Comitê Organizador do COBRAE para esta apresentação, ao CNPQ por

bolsa de pesquisador e àqueles que forneceram informações pessoais.

10 BIBLIOGRAFIA

- BURLAND, J.B. (2006) Informação pessoal sobre instrumentação da escavação do Westminster Underground Car Park.
- CASPURRO (200x) Método observacional no controle de obras rodoviárias. VII Congresso Nacional de Geotecnia.
- COOPER, M.R., BROMHEAD, E.N., PETLEY, D.J. & GRANT, D.I. (1998) The Selborne cutting stability experiment. *Géotechnique* 48, no.1, 83-101.
- DEERE, D.U.; PATTON, F.D. (1971) Slope Stability in Residual Soils. In: 4th PCSMFE, Puerto Rico. Proc., State of the Art Volume, p. 87-170.
- DIXON, N., HILL, R. & KAVANAGH, J. (2003) Acoustic emission monitoring of slope instability: development of an active guide system. Proc. Inst. Civil Engineers, Geot. Engineering, p.83-95.
- DUNNICLIFF, J. (1988) Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Dunicliff with the assistance of Gordon E. Green, Wiley-Interscience Publ., 577 pp.
- FRANKLIN, John A. (1977) Some practical considerations on the planning of field instrumentation. Int. Symp. Field Measurements in Rock Mechanics, editor K. Kovari, Zurich, vol. 1, 3-13.
- GEORIO (2000) Manual Técnico de Encostas. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000, 2ª.ed.
- HANNA, T.H. (1985) Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. Trans Tech publications, Clausthal-zellerfeld, F.R. Germany.
- HEALTH SAFETY EXECUTIVE (2000). The collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport. Health and Safety Executive. Her Majesty's Stationery Office, ISBN 0 7176 1792 0.
- HUTCHINSON, J.N. (1981) Methods to locate slip surfaces in landslides. Reprinted in Bulletin Ass. Engng Geologists, 20, pp. 235-252.
- MARINHO, F.A.M., CHANDLER, R.J. (1995) Cavitation and the direct measurement of soil suction. In Unsaturated Soils, Proc. 1st International Conference on Unsaturated Soils, Paris. Edited by E.E. Alonso and P. Delage. Vol. 2, pp. 623-630.
- NEGRO JR., A., KARLSRUD, K., SRITHAR, S., ERVIN, M., VORSTER, E. (2009) Prediction, Monitoring and Evaluation of Performance of Geotechnical Structures. 17th Intl. Conf. Soil Mechanics and Geot. Eng., Alexandria, SOA3. Disponível em [HTTP://www.soa3-alexandria.com](http://www.soa3-alexandria.com) (03 setembro 2009).
- OSTERBERG, J.O. (1979) Failures in exploration programs. In Site Characterization and Exploration (C.H. Dowding, ed.), American Society of Civil Engineers, New York, p.3-9.
- PECK, R.B. (1969) Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics. *Géotechnique*, vol. 19, No.2, p. 171-187.
- PENMAN, A.D.M. (1960) A study of the response times of various types of piezometers. Proc. Conf. on Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, p. 53-58.
- POTTS, D. M., DOUNIAS, G. T. & VAUGHAN, P. R. (1990) Finite element analysis of progressive failure of Carsington embankment. *Géotechnique* 40, No. 1, 79-101.
- RIDLEY, A.M. (2009) Informação pessoal sobre trabalhos da GeoObservations.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. (1993) A new instrument for the measurement of soil suction. *Géotechnique*, 43,2, pag. 321-324.
- RIDLEY, A.M., SCHNAID, F., da SILVA, G.F., BICA, A.V.D. (1997) In situ suction measurements in a residual soil of southern Brazil. In NSAT'97 - 3o Simpósio Brasileiro sobre Solos Não-Saturados, Rio de Janeiro, Brazil. Edited by T.M.P. de Campos and E.A. Vargas Jr. Freitas Bastos Editora, Rio de Janeiro, Brazil.
- SÊCO e PINTO, P.S. (2006) Algumas Reflexões sobre a Instrumentação de Estruturas Geotécnicas. 8º. Congresso Nacional de Geotecnia.
- SKEMPTON, A.W. VAUGHAN, P.R. (1993) The failure of Carsington Dam. *Géotechnique*, Vol. 43, 1, pág. 151-173.
- STANDING, J.R. (2009) Informação pessoal sobre técnicas utilizadas na instrumentação de recalques.
- STANDING, J. R. & BURLAND, J. B. (2006) Unexpected tunnelling volume losses in the Westminster area, London. *Géotechnique* 56, No. 1, 11-26.
- STANDING, J.R. (2009) Informação pessoal.
- SU, M.B., CHEN, I.H., LIAO, C.H. (2009) Using TDR Cables and GPS for Landslide Monitoring in High Mountain Area. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, No. 8, August 1, 2009.
- TSCHEBOTARIOFF, G.P. (1978) Fundações, Estruturas de Arrimo e Obras de Terra. Ed. McGrawHill do Brasil. 513p.
- VAUGHAN, P. R. (1994). Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering. Rankine Lecture, *Géotechnique* 44, No. 4, 573-609.
- ZHAN, T.L., NG, C.W.W. & FREDLUND, D.G. (2007) Field study of rainfall infiltration into a grassed unsaturated expansive soil slope. *Can. Geotech. J.* 44(4): 392-408.