ORGANIZAÇÃO
ALCONPAT BRASIL
www.alconpat.org.br
III SEMINÁRIO DE
PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
I CONFERÊNCIA LIVRE REGIONAL DE ENGENHARIA PARA A DEFESA CIVIL
LEME
PÓS ENG UFRGS
DO SUL
- ANAIS -
10 a 12 de dezembro de 2009
Hotel Embaixador | Porto Alegre - RS
APOIO
CAPES
CREA-RS
ISBN 978-85-63207-00-5
PATROCÍNIO
comatra

# Grandes deslizamentos de terra no RS e SC – tipos, causas e monitoramento

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

Resumo: O trabalho apresenta alguns exemplos internacionais e nacionais de grandes escorregamentos de terra, com exemplos de danos e discute sucintamente alguns dos principais condicionantes envolvidos. Apresenta também os principais sistemas de monitoramento utilizados usualmente, com uma discussão de seus erros e incertezas. Os critérios para um adequado uso de instrumentação e as dificuldades de monitoramento dos materiais que apresentam rupturas frágeis são apresentados. Enfatiza-se o estudo adequado dos principais condicionantes geotécnicos nas rupturas.

Abstract: This paper presents some national and international examples of large landslides, with damages associated, and presents a brief discussion of the main geotechnical conditioning related to them. Also is presented the main monitoring systems usually employed with discussion on the uncertainties. The main criteria for instrumentation planning and the difficulties on fragile materials are also presented. The adequate study of geotechnical conditioning factors is emphasized.

## 1 INTRODUÇÃO

A superfície da terra está constantemente sendo submetida a processos de moldagem do terreno através de erosão em várias escalas, deposição de materiais e escorregamentos e soerguimento de terrenos em escala continental. Esta mudança pode ser progressiva, em pequenos eventos, ou episódica, mais acentuada em certos períodos. Os escorregamentos de taludes em várias escalas são parte deste processo de moldagem e da forma da superfície e atuam em escalas de volumes de $10^1$ a $10^3$ $m^3$ (escalas normais de obras de engenharia), até valores de $10^6 m^3$ (grandes escorregamentos de encostas naturais), podendo chegar a valores de $10^9$ $m^3$ nos escorregamentos submarinos (este tema não será discutido aqui).

Por estas razões o estudo de taludes em ambientes tropicais e sub-tropicais tem sido um tema de grande interesse devido à importância para a sociedade e para a engenharia em particular. De acordo com Schuster (1966), as perdas econômicas associadas com movimentos de taludes chegam a US$ 4,5 bilhões por ano no Japão, US$ 2 bilhões nos EUA e US$ 1,5 bilhões na Índia. Para os países sub-desenvolvidos, há uma estimativa de prejuízos na faixa de 1 a 2% do PIB em muitos países (Hutchinson, 1995). Além disto, geralmente nos desastres como monções, terremotos e inundações, as rupturas de taludes não são identificadas individualmente, por isto os números relacionados a taludes podem ser ainda maiores. Infelizmente em muitos destes desastres há também perdas de vidas humanas.

Schuster (1996) já comentava que o número de movimentos de taludes pareciam estar aumentando, devido ao desmatamento, crescente urbanização e crescente precipitação pluviométrica em certas áreas, provocado por mudanças climáticas. Isto está de acordo com a observação empírica que temos feito no sul do Brasil.

Os movimentos de taludes são principalmente respostas do material (solo ou rocha) às trocas de geometria, condições de contorno, poro-pressões ou parâmetros de resistência ao cisalhamento ao longo do tempo (Leroueil, 2001), sendo que a Geomorfologia tem um papel muito importante nos movimentos de taludes (estratos do sub-solo, permeabilidades e níveis de água associados). A investigação geotécnica visa determinar com precisão estes condicionantes e determinar os valores das variáveis de interesse ao estudo dos movimentos.

Este trabalho visa (a) apresentar alguns dos principais fenômenos de deslizamentos de terra que ocorreram nos últimos anos e suas características; (b) apresentar algumas das técnicas de monitoramento e sua utilização.

## 2 TIPOS DE MOVIMENTOS E OS MATERIAIS ENVOLVIDOS

Existem muitas classificações de taludes propostas na literatura, sendo a de Varnes (1978) e

Cruden e Varnes (1996), a mais difundida. Genericamente aquele autor classificou os movimentos considerando o tipo de mecanismo e o tipo de material.

Segundo aquele autor, os principais tipos de instabilidades são (a) quedas, (b) tombamento (*topple*), (c) deslizamento, (d) escoamento (*spread*) e (f) corridas (*flow*s). Estes tipos de ruptura podem ocorrer em (a) rocha, (b) detritos (*debris* - solos grosseiros) ou (c) terra (*earth* - solos finos).

Embora os mecanismos descritos por Varnes (1978) ocorram de maneira quase universal, em climas tropicais, e no Sul do Brasil em particular, a variação dos materiais é mais ampla e isto afeta os tipos de rupturas e materiais envolvidos nelas. Nestas regiões, existem muitos materiais intermediários aos descritos acima e foram criados alguns termos adicionais para defini-los melhor. Assim os detritos são melhor definidos como **tálus e colúvios,** formados geralmente por depósitos formados por movimentos gravitacionais e que apresentam uma parcela variável de materiais finos que, no caso dos colúvios, formam uma matriz. Os tálus são materiais grosseiros, geralmente com blocos de rocha, que não apresentam uma matriz de preenchimento.

Em 2001, Leroueil (2001) apresentou um esquema dos diversos materiais envolvidos nas rupturas. A Tabela 1 incluiu algumas destas idéias e particularidades observadas no sul do Brasil. Embora a Tabela apresente um espectro bastante amplo de materiais, ela ainda está distante de representar adequadamente o universo dos materiais em ambientes tropicais.

Nos materiais naturais também é importante estabelecer as diferenças na estrutura interna dos mesmos. Neste caso Picarelli (1991) apud Leroueil (2001) sugeriu a utilização de 4 classes de estrutura dos solos, como descrito abaixo:

- micro-estrutura, relacionada às partículas do solo (microscópicas até cerca de 0,5mm), seus arranjos e agregações e possíveis ligações entre elas;
- meso-estrutura, relacionada ao tamanho de amostras de laboratório (centímetros a decímetros), o que inclui fissuras e laminações com diferentes tamanhos de grãos;
- macro-estrutura, relacionada ao tamanho da maioria dos projetos de engenharia (metros a dezenas de metros), caracteriza-se por planos de acamamento, juntas e heterogeneidades;
- mega-estrutura, típica de projetos de engenharia de grande porte (dezenas de metros a km), inclui falhas, dobramentos e outros.

Este tipo de arranjo interno dos grãos tem uma grande influência no comportamento mecânico dos solos e na resposta dos taludes e encostas a solicitações que induzam rupturas.

Na maioria dos casos apresentados neste artigo as rupturas foram do tipo escorregamento com geometrias variáveis e diversos materiais.

Tabela 1- Principais tipos de materiais envolvidos em escorregamentos.

| material | | | satur. |
|---|---|---|---|
| Rochas | rochas duras | intactas | |
| | | fissuradas | |
| | rochas brandas | fissuradas | varia |
| | | alteradas | varia |
| Formações complexas | | | varia |
| Solos | argilas | argilas rijas | saturad. |
| | | argilas moles | saturad. |
| | solos residuais argilosos | | varia |
| | colúvios argilosos | | saturad. |
| | siltes e areias finas | | não-satur. |
| | colúvios grosseiros | | varia |
| | siltes e areias finas | | varia |
| | materiais colapsíveis | | não-satur. |
| | solos residuais arenosos | | varia |
| | talus | | não-satur. |

## 3 ALGUNS GRANDES ESCORREGAMENTOS DE TERRAS

O objetivo deste item é apresentar alguns dos grandes deslizamentos de terra que são do conhecimento geotécnico, com comentários sobre os dados conhecidos destes escorregamentos.

### 3.1 ESCORREGAMENTOS LENTOS NA REGIÃO DE SANTA CRUZ DO SUL

A região de Santa Cruz do Sul está situada no contato entre os derrames vulcânicos que formam o Planalto do RGS e os materiais da Depressão Central do estado. Esta condição originou, ao longo do processo de evolução da paisagem, uma série de vales esculpidos e algumas encostas de diferentes declividades. Existem também diversos morros testemunhos na região.

Os materiais presentes no sub-solo são rochas areníticas e argilosas que apresentam resistências ao cisalhamento variáveis de ponto a ponto. Em algumas regiões, devido aos processos de erosão e fluxos de água naturais, os taludes apresentam movimentos sazonais em grandes áreas. O grupo de pesquisa em taludes da UFRGS (LAGEOtec) já estudou duas áreas na região, uma rural e outra urbana (Eisenberg, 2003 e Pinheiro et al, 2002). A Figura 1 mostra um diagrama de um grande escorregamento de solo e rocha o qual envolveu volumes da ordem de 15 x$10^6$ m3 (60 ha em área).

Pelo menos 2 residências foram tão danificadas que foram demolidas. A área só pode ser utilizada para agricultura de subsistência a partir de 2001.

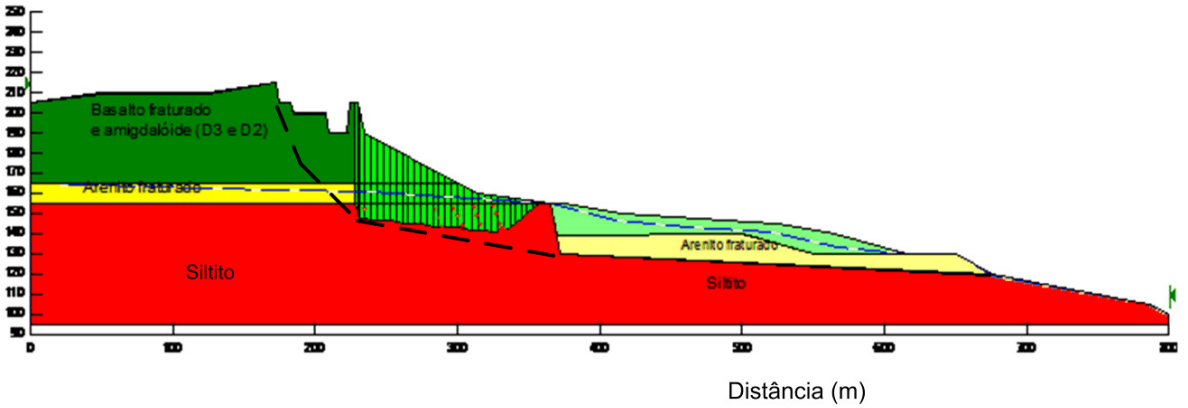


Figura 1 – Diagrama de um grande escorregamento de solo e rocha na localidade de Malhada, Santa Cruz do Sul, RS.

A cidade de Santa Cruz do Sul tem diversas regiões com problemas de estabilidade. A Figura 2 mostra alguns resultados do monitoramento de deformações que indicaram uma superfície de ruptura bem definida no contato colúvio x rocha alterada. Os movimentos ficaram bem relacionados com as pressões de água medidas.

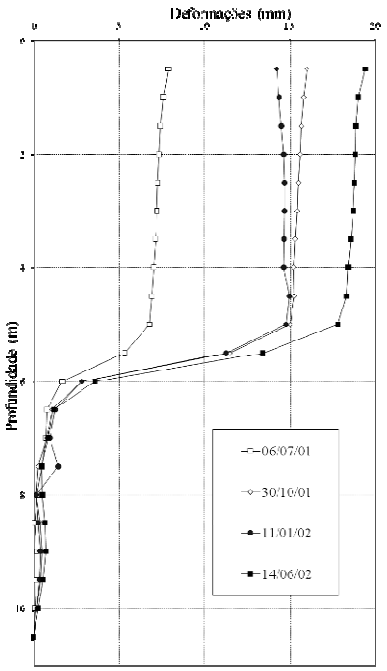


Figura 2 – Deformações medidas com inclinômetro em talude na cidade de Santa Cruz do Sul, RS.

A Figura 3 mostra um exemplo dos danos observados em construções em algumas áreas instáveis da cidade. Neste caso os danos foram tão sérios que a residência foi abandonada.

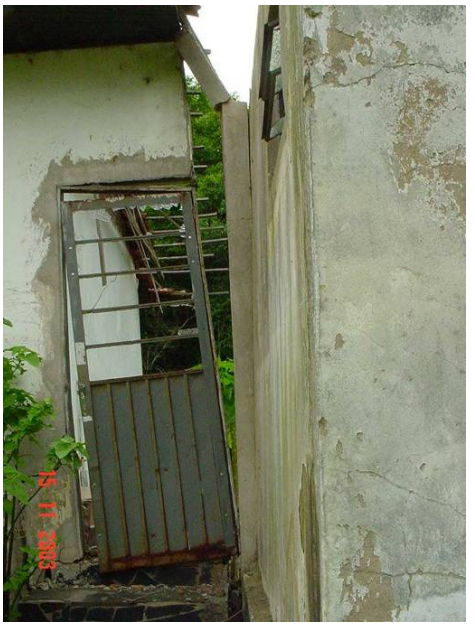

Figura 3- Danos severos em uma construção de Santa Cruz do Sul, RS.

3.2 CARAGUATATUBA, SP (1967)

Em 1967 nesta região de SP, ocorreu um evento de chuva muito intensa. Cerca de 600 mm de chuva foram estimados terem ocorrido num período de 2 dias. Como conseqüência, centenas de escorregamentos rasos ocorreram na região provocando corridas de detritos nas drenagens (Figura 4).

### 3.3 CANYON DO PINHEIRINHO, SC (1995)

Em dezembro de 1995, o estado de Santa Catarina teve eventos de chuva muito intensos, chegando a 500 mm em Florianópolis em 2-3 dias. Neste mesmo período houve uma chuva particularmente torrencial na região de Timbé do Sul (Canyon do Pinheirinho, 600 mm em 2 dias) que provocou uma sequência de escorregamentos rasos nas encostas e ondas de fluxo de detritos que fizeram diversos danos a construções perto das drenagens, destruindo acessos e lavouras.

Figura 4 – Escorregamentos generalizados que ocorreram em Caraguatatuba, 1967.

### 3.4 SÃO VENDELINO, RS (2000)

Em 24 de dezembro de 2000 uma região bem delimitada em área (cerca de 4*10 km2) foi submetida a uma chuva de 2horas de duração com uma precipitação total de 148mm. Esta intensidade provocou um série de escorregamentos translacionais rápidos do solo raso situado sobre a rocha sã ou rocha alterada subjacente. As espessuras de solo envolvidas foram tipicamente da ordem de 1 a 2m. Dezenas de corridas de detritos foram formadas nas drenagens principais, soterrando os bueiros existentes, destruindo pontilhões e erodindo aterros de estradas. Diversas residências foram danificadas e as rodovias ficaram interditadas por meses, até que as drenagens pudessem ser restabelecidas (Figura 5).

### 3.5 REGIÃO DE BLUMENAU, GASPAR, ILHOTA

Nos dias 22 a 24 de novembro de 2008 a região do vale do Itajaí foi submetida a uma chuva torrencial que atingiu valores de 600 a 750 mm em 2 a 3 dias. Este evento, que ocorreu após 56 dias de chuvas intermitentes, provocou uma série de rupturas de encostas, taludes, cortes de estradas e estruturas de contenção de todo o tipo. As áreas urbanas foram profundamente atingidas e os escorregamentos de terra com corridas de detritos associadas, acabaram causando grande parte das 135 vítimas fatais. Perto de 80 mil pessoas foram desalojadas pelos escorregamentos e por danos devidos às inundações.

Cerca de 4000 escorregamentos de terra ocorreram na região, alguns envolvendo grandes volumes de solos que se deslocaram com grande velocidade ao longo do terreno, destruindo de forma muito rápida, residências e construções de todo o tipo que estivessem em seu caminho e causando um profundo impacto no sistema viário.

Figura 5 – Erosão de aterro de rodovia provocado por galgamento, São Vendelino, RS.

### 3.6 CARACAS, Venezuela (1999)

Em dezembro de 1999, num período de 4 dias, a região de Caracas teve um precipitação acumulada de 911 mm em 3 dias. Este evento de chuva provocou uma série de escorregamentos planares rápidos que originaram corridas de detritos ao chegarem nas drenagens. Como a declividade da região era acentuada e grandes volumes de material foram mobilizados, a cidade foi seriamente afetada, com centenas de estruturas destruídas, inclusive prédios residenciais. O número de vítimas fatais alcançou números próximos de 30 mil pessoas.

## 4 DANOS CAUSADOS POR ESCORRE-GAMENTOS

Os danos causados pelos escorregamentos podem ser divididos em 2 tipos: os danos diretos e os indiretos.

4.1 Danos diretos: são causados pelo movimento de terra diretamente sobre infra-estruturas próximas ou sobre eles.

a) fissuras e trincas em residências por deslocamento do terreno;
b) destruição parcial ou total de estruturas pelo impacto do material rompido;
c) destruição de infra-estrutura (cabos telefônicos, água, esgotos)

4.2 Danos indiretos: são causados pelos efeitos do fluxo do material fluidificado (que se deslocam com grande velocidade pelas drenagens).

a) erosão de margens de arroios e rios induzindo novas rupturas
b) erosão de aterros de aproximação de pontes
c) destruição de pontes e pontilhões por impacto direto
d) soterramento de drenagens, galgamento de aterros e erosão
e) destruição de lavouras, mudança de curso de arroios, deposição de destroços.

## 5 PRINCIPAIS MECANISMOS ENVOLVIDOS NAS RUPTURAS

De maneira geral os escorregamentos de terra ocorrem quando a relação entre as forças resistentes máximas disponíveis e as forças instabilizantes atinge a igualdade (toda a resistência é mobilizada).

Nos processos naturais normais, a resistência do solo varia ao longo do tempo principalmente como função do intemperismo natural (processo de degradação dos materiais) e em função da pressão de água que ocorre no sub-solo (redução das tensões efetivas em solos saturados). Em alguns solos o efeito da redução da sucção (poro-pressão negativa) pode ser importante, mas este tema não será analisado neste trabalho.

Por outro lado, mudanças geométricas causadas por erosão no pé, ou cortes antrópicos ou carregamentos, fazem com que as forças instabilizantes aumentem. Estes são processos que ocorrem rotineiramente e levam diversos taludes a ruptura durante períodos chuvosos normais.

Um outro aspecto que está intimamente relacionado ao grau de dano é a velocidade do escorregamento. A velocidade por sua vez está relacionada à declividade do terreno pré-ruptura (que relaciona-se a uma energia potencial) e ao comportamento do solo (micro-estrutura dos solos).

O efeito da estrutura do solo tem sido estudado por diversos autores e um exemplo do aumento da pressão de água no comportamento dos solos pode ser visto na Fig. 6. Nesta figura está representado o caminho de tensões que ocorre quando um talude tem um aumento do "nível de água" (aumento de fluxo, Brenner et al., 1985, Martins, 2001). A envoltória de ruptura do solo residual de arenito Botucatu é atingida e, após a ruptura, o solo sofre grandes deformações levando-o a um estado de desestruturação contínua e plastificação. Em campo este efeito pode ser descrito como fluidização do material, levando ao comportamento mostrado pela ruptura de um aterro e fundação em solo residual de arenito em Estância Velha, RS, o qual se deslocou de maneira muito rápida (cerca de 10m/s) ao longo de mais de 100m.

As rupturas frágeis, com fluidização posterior, podem ocorrer ao longo de superfícies planares ou circulares. A forma da superfície de ruptura é definida pelo tipo de materiais presentes no sub-solo e suas resistências relativas.

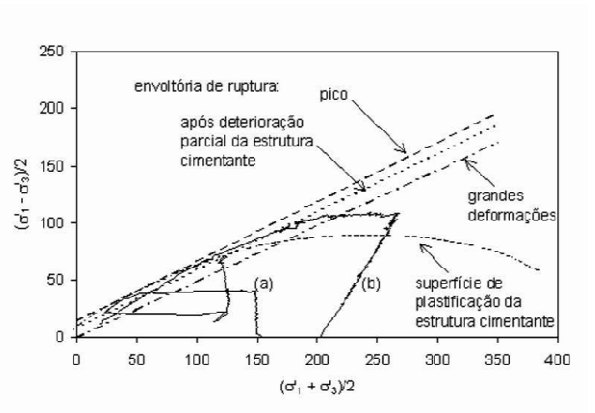


Figura 6 – Caminho de tensões por aumento da pressão de água levando à ruptura (Martins, 2001).

## 6 MONITORAMENTO DE ENCOSTAS

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.

### 6.1 Principais objetivos da instrumentação

A instrumentação de campo é mais frequentemente utilizada em situações de encostas ou escavações que já tenham mostrado movimentos Mikkelsen (1996). Nestes casos, geralmente as características gerais dos

escorregamentos podem ser facilmente observadas e incorporadas no planejamento da instrumentação. O problema é que pequenos movimentos do solo ou de uma massa rochosa antes, ou mesmo durante a ruptura iminente, normalmente não são visualmente evidentes. Nestes casos a importância da instrumentação é muito acentuada.

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.

### 6.2 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.

Na experiência do autor, é recomendado 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. O importante planejamento da instrumentação está detalhado em outra publicação (Bressani, 2009).

### 6.3 Influência dos materiais e do tipo de obra

As instrumentações, análises e níveis de alerta são função do tipo dos materiais e obra. Alguns exemplos:

(a) taludes de corte em solos coluvionares - geralmente apresentam deformações de valor acentuado, comportamentos diferentes e bem definidos para os materiais controlados pelos contatos litológicos; as pressões de água são controladas 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).

(b) taludes de corte em solos saprolíticos (residuais jovens) – geralmente apresentam pequenas deformações pré-ruptura e o comportamento pode ser definido por estruturas reliquiares ou descontinuidades herdadas da rocha mãe. As pressões de água podem ser comandadas por lentes de maior permeabilidade ou pelas descontinuidades.

(c) 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 evapo-transpiração da encosta, variando sazonalmente em profundidade, mas podendo variar rapidamente em resposta às chuvas.

## 7 PRINCIPAIS SENSORES UTILIZADOS

Os sensores de monitoramento podem ser instalados no terreno de forma permanente, ou serem colocados no ponto de medição, lidos e

retirados. O exemplo clássico do primeiro sensor é o piezômetro automático e do segundo 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. 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.

### 7.1 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.

O uso destas técnicas incluem medidores de trincas em superfície (que utilizam desde medidas manuais com trenas, paquímetros ou sistemas automáticos com sensores de deslocamento); extensômetros de superfície; medidas de deslocamento lateral de uma linha de piquetes estabelecida em campo.

### 7.2 Deslocamentos subterrâneos – Inclinômetros, extensômetros

a) 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. Geralmente são associados ao controle de deslocamentos ao longo de superfícies bem conhecidas ou como medidores complementares aos inclinômetros e medidores de superfície.

b) Inclinômetros

Os inclinômetros são sensores de verticalidade que monitoram a variação da inclinação de tubos-guia, especialmente instalados em campo. São reconhecidamente os sensores mais úteis na determinação dos movimentos do sub-solo.

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. A Figura 2 mostra um gráfico obtido com inclinômetro em um talude com uma superfície bem definida em Santa Cruz do Sul.

### 7.3 Pressão de água positiva – Piezômetros e medidores de nível de água

A pressão de água nos solos tem um aspecto fundamental nos problemas geotécnicos. Assim, seu monitoramento deve ser sempre considerado, em especial no caso de taludes.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, ou com fluxo ascendente ou paralelo ao talude. Exceto em problemas simples de geologia bem conhecida, o fluxo de água e as poro-pressões associadas são uma incógnita.

Os piezômetros são arranjos que medem pressão de água em uma região delimitada do maciço. Os mais comuns são os piezômetros de tubo aberto (Bressani, 2009, Dunniccliff, 1988). A determinação da coluna de água de equilíbrio dentro do tubo permite o cálculo da pressão de água na profundidade do filtro.

O tempo de equilíbrio das pressões neste sistema depende da permeabilidade do solo, geometria da instalação e diferença de pressão (veja Penmann, 1960; Dunniccliff, 1988).

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. Nestes casos uma alta frequência de leituras é fundamental para determinação de valores transientes da poro-pressão.

### 7.4 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).

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). O grande problema com estes medidores é a dessaturação que muitas vezes ocorre, sendo necessária a manutenção periódica para saturação do equipamento.

### 7.5 Outros sensores - emissão acústica e TDR

O método conhecido como *Time Domain Reflectometry* (TDR) 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).

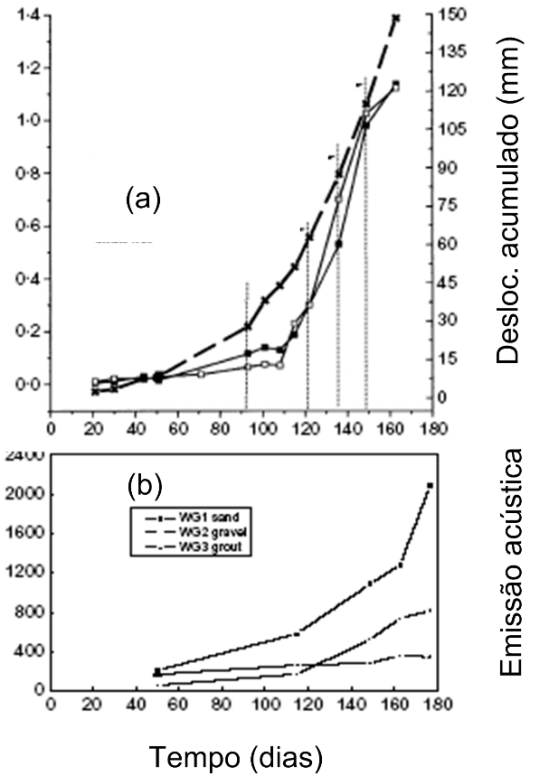


Figura 7 - Monitoramento de ruptura de talude na costa da Inglaterra (a) gráfico de deslocamento acumulado *versus* tempo - inclinômetros convencionais; (b) área sob a curva medida nos transdutores de EA *versus* tempo.

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.

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). A comparação dos resultados obtidos com esta técnica e medidas de inclinômetros mostraram resultados interessantes (Figura 7).

## 8 ASPECTOS DA INTERPRETAÇÃO DA INSTRUMENTAÇÃO

### 8.1 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, Bressani, 2009).

### 8.2 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.

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.

Um caso interessante desta incerteza é relacionado à medição de poro-pressão em taludes de solos saprolíticos com descontinuidades. Nestes casos as medidas de poro-pressão obtidas de piezômetros colocados em um talude podem indicar pressões pequenas,

com respostas lentas em relação aos piezômetros que eventualmente estejam em contato com as descontinuidades.

### 8.3 Instrumentação como ferramenta de investigação

Geralmente a instrumentação é utilizada como ferramenta complementar aos estudos geotécnicos. Mas, não se deve esquecer que a instrumentação é um meio de obter informações adicionais que podem*, ou não*, ser diretamente complementares. Em alguns casos, estas medidas as medidas podem ser diretamente conflitantes com o comportamento esperado. Assim, é interessante analisar os dados da instrumentação com uma visão de ferramenta de investigação.

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.

## 9 COMENTÁRIOS FINAIS

Os mecanismos que causam os escorregamentos de terra tem uma relação direta com a geologia e perfil do sub-solo. As geometrias dos escorregamentos são diretamente relacionadas com estes condicionantes. As velocidades dos escorregamentos, por outro lado estão relacionadas ao tipo de material e à declividade do talude pré-ruptura e à topografia existente abaixo da ruptura.

Nos casos de materiais que tenham um comportamento dúctil (pequena redução de resistência ao cisalhamento com o nível de deformação) o monitoramento convencional de deformações pode ser um excelente indicador do grau de risco envolvido. Entretanto, nos casos de materiais que apresentem fragilidade (forte redução da resistência operacional pós-ruptura) a ruptura é rápida e com pouco aviso pré-ruptura. Em todos os casos, no entanto, o monitoramento das poro-pressões é decisivo.

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, o que é bastante comum nas condições do sul do Brasil, necessitam uma freqüência de monitoramento bastante alta.

É importante salientar que uma boa instrumentação muitas vezes pode ser feita com medidores simples e de baixo custo. A análise de alguns casos históricos internacionais apresentado recentemente (Bressani, 2009) mostrou que: (a) medidas de baixo custo permitem uma ampla cobertura em área e profundidade; (b) a instrumentação pode ter um caráter complementar como ferramenta de investigação do sub-solo; (c) materiais frágeis apresentam pequena deformação pré-ruptura e, se não identificados previamente, podem ter seus sinais de ruptura não reconhecidos.

É interessante a observação de Vaughan (1994) de que “em problemas de engenharia geotécnica, a compreensão do comportamento real é mais importante do que cálculos acurados”. Esta compreensão depende de um adequado conhecimento dos fenômenos do perfil do sub-solo, da morfologia e do comportamnto dos materiais.

A análise das patologias que ocorrem em estruturas submetidas a escorregamentos de baixa velocidade, pode fornecer indicativos importantes sobre a amplitude e a profundidade dos movimentos. Entretanto, nos casos de rupturas frágeis, a prevenção e medidas de redução de risco são fundamentais, já que as rupturas e os danos acontecem de maneira muito rápida.

## 10 AGRADECIMENTOS

O autor agradece o convite do Comitê Organizador para esta apresentação, ao CNPQ por bolsa de pesquisador e aos membros do LAGEOtec por várias contribuições.

## 11 BIBLIOGRAFIA

BRENNER, R.P., TAM, H.K. E BRAND, E.W. (1985) Field stress path simulation of rain-induced slope failure. Proc. XI Int. Conf. Soil

Mech. Fndn Engng, San Francisco, Vol. 2, p. 991-996.

BRESSANI, L.A., BICA, A.V.D., PINHEIRO, R.J.B. & Rigo, M.L. (2001) Residual shear strength of some tropical soils from Rio Grande do Sul. Solos e Rochas, Revista Latino-americana de Geotecnia, ABMS, 24, 2: 103-113.

BRESSANI, L.A., BICA, A.V.D. E MACIEL FILHO, C.L. (1996) A slope instability of a mudstone in Southern Brazil. Proc. 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, ISSMFE/ISRM, Vol. 2, p.1079-1084.

CRUDEN, D.M. E VARNES, D.J. (1996) Landslide types and processes. In Landslides – Investigation and Mitigation. Special Report 247, TRB, national Research Council, Washington.

DIXON, N.,HILL, R. & KAVANAGH,J. (2003) Accoustic 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 Dunniclif with the assistance of Gordon E. Green, Wiley-Interscience Publ., 577 pp.

EISENBERG, C. N. (2003) Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul, RS. Dissertação de mestrado, PPGEC/UFRGS.

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.

LEROUEIL, S. (2001) Natural slopes and cuts: movement and failure mechanism. Géotechnique, 51, no.3, 197-243.

MARTINS, F.B. (2001) Investigação do comportamento mecânico de um solo residual de arenito. CPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 320p. Tese de doutorado.

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 (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.

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.

PERAZZOLO, L., BICA, A.V.D., BRESSANI, L.A., BERNARDES, J.A., MARTINS, F., FLORES, J.A.A., AZAMBUJA, E. (2005) "Análise Comparativa da Estabilidade de Dois Taludes da For mação Serra Geral/RS". Solos e Rochas – Revista Brasileira de Geotecnia, São Paulo, v. 28,n.1,p.31-42.

PINHEIRO, R. J.B. (2000) - Estudo de casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul. Tese de doutorado, PPGEC.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D.; BICA, A . V. D.; BRESSANI, L. A., EISENBERG, C.N. (2002) Investigação geotécnica de uma encosta na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS. Anais do XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XII COBRAMSEG), ABMS, São Paulo, Vol.2, 1247-1257.

RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. (1993) A new instrument for the measurement of soil suction. Géotechnique, 43,2, pag. 321-324.

SKEMPTON, A.W. VAUGHAN, P.R. (1993) The failure of Carsington Dam. Géotechnique, Vol. 43, 1, pág. 151 –173.

SCHUSTER, R.L. (1996) Socioeconomic significance of landslides. In: Landslides Investigation and Mitigation. Special Report 247, pp.12-35. Washington: Transportation Research Board.

VAUGHAN, P. R. (1994). Assumption, prediction and reality in geotechnical engineering. Rankine Lecture, Géotechnique 44, No. 4, 573-609.

VARNES, D.J. (1978) Slope movement types and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. (R.L. Schuster and R.L. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 11-33.