

ANÁLISE DA INSTABILIDADE DE UMA ENCOSTA LOCALIZADA NA ÁREA URBANA EM SANTA CRUZ DO SUL, RS

Rinaldo José Barbosa PINHEIRO ¹, Andréa Valli NUMMER ²,
Luiz Antônio BRESSANI ³

- (1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM. Avenida Roraima, 1000 – Camobi. CEP 97105-900. Santa Maria, RS. Endereço eletrônico: rinaldo@ufsm.br
(2) Programa de Pós-Graduação em Geografia-Geociências, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria / UFSM. Avenida Roraima, 1000 – Camobi. CEP 97105-900. Santa Maria, RS. Endereço eletrônico: a.nummer@gmail.com
(3) Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal de do Rio Grande do Sul / UFRGS. Rua Osvaldo Aranha, 99, 3º. andar – Centro. CEP 90035-190. Porto Alegre, RS. Endereço eletrônico: bressani@ufrgs.br

Introdução
Descrição da Área de Estudo
Geologia
Investigação Geotécnica
Sondagens
Ensaio de Laboratório
Determinação dos Parâmetros de Resistência
Instrumentação e Monitoramento da Encosta
Medidas de Poro-Pressão e Nível d'Água
Levantamento de Subsuperfície - Inclinação
Levantamento das Deformações nas Moradias
Análise das Patologias das Moradias
Análise de Estabilidade da Encosta
Considerações Finais
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este trabalho apresenta um estudo sobre uma encosta urbana instável situada na cidade de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul. A encosta está localizada na parte nordeste da cidade, onde várias moradias têm sido afetadas por movimentos de solo. A área total afetada é de aproximadamente oito hectares. A base da encosta é constituída por siltitos vermelhos da Formação Santa Maria recobertos por um colúvio de espessura variável. Instrumentos de monitoramento de campo foram instalados e apresentaram uma boa relação entre deslocamentos da encosta e picos do nível piezométrico. Análises de estabilidade foram realizadas, usando-se parâmetros de resistência ao cisalhamento de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais. Fatores de segurança obtidos, na análise, foram próximos da unidade, apresentando alguma variabilidade. Uma análise das patologias nas construções causadas pelo movimento da encosta também foi procedida, empregando-se dados obtidos de uma inspeção visual e entrevistas, as quais indicaram uma extensa área lateral na encosta e que se encontra sujeita a movimentos.

Palavras-chave: estabilidade de encostas; monitoramento; instrumentação; ensaios geotécnicos.

ABSTRACT – *R.J.B. Pinheiro, A.V. Nummer, L.A. Bressani – Analysis of an unstable slope located in the urban area of Santa Cruz do Sul, RS.* This paper presents a study of an unstable urban slope situated in the city of Santa Cruz do Sul, RS. The slope is located in the northern part of the city, where several buildings have been affected by soil movement. Its overall size is around 8 hectares. The base of the slope consists of red siltstones of the Santa Maria Formation covered by colluviums of variable thickness. Instruments for field monitoring have been installed and they showed a relationship between slope displacements and peaks of piezometric level. Slope stability analyses were carried out using shear strength parameters from direct shear and triaxial tests. Factors of safety obtained in the analysis were typically close to one, presenting some variability. An analysis of building pathologies caused by slope movement was also carried out, using data obtained with site inspection and interviews, which indicated the lateral extent of the movement.

Keywords: stability slope; instrumentation, monitoring, geotechnical tests.

INTRODUÇÃO

A cidade de Santa Cruz do Sul está localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul, com uma população de 118.000 habitantes (IBGE, 2010). A cidade é rodeada por encostas com colúvios,

ao norte e a leste, e por uma zona de inundação do rio Pardinho a oeste.

A cidade é conhecida pelos problemas de instabilidade de encostas desde a década de 70 (Grehs, 1976;

Bressani et al., 2008). Este artigo descreve um trabalho realizado em uma região da cidade com moradias danificadas por processos de movimentos de massa nos depósitos superficiais que recobrem a

encosta. O estudo foi levado a efeito em um período com uma precipitação pluviométrica elevada quando foram medidos os movimentos de massa gravitacionais.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade apresenta uma altitude média, na sede do município, de 122 m. A encosta em estudo localiza-se na zona urbana de Santa Cruz do Sul, na zona norte da cidade na rua Dr. Álvaro Correa da Silva.

O estado do Rio Grande do Sul encontra-se em uma posição geográfica denominada fronteira climática, em que ocorrem grandes oscilações de clima e erros frequentes nas previsões meteorológicas, devidos aos choques entre massas de ar quente, vindas da linha do Equador, e massas de ar polar, provenientes do sul. A região tem um clima subtropical com verões quentes e úmidos.

Em Santa Cruz do Sul, as chuvas dos últimos quinze anos apresentaram um valor mínimo anual de 1419 mm (1996) e um valor máximo anual de 2100 mm. É típico do estado gaúcho que as chuvas sejam bem distribuídas ao longo do ano. Nas estações frias, as chuvas geralmente são prolongadas e de intensidade média a fraca, enquanto que, nas estações quentes, as chuvas são de curta duração e grande intensidade. Grande parte da área das encostas em Santa Cruz do Sul constitui uma zona de preservação ambiental.

GEOLOGIA

A área estudada situa-se essencialmente dentro da Região Geomorfológica denominada Depressão Central Gaúcha, abrangendo ainda parte da borda da Região Geomorfológica chamada de Planalto das Araucárias (Figura 1). A geologia das regiões norte e leste da cidade de Santa Cruz do Sul é constituída pela Formação Santa Maria na base, estando-lhe sobrepostos os arenitos da Formação Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral no topo. Em alguns locais, os basaltos estão em contato direto com a Formação Santa Maria, o que caracteriza uma discordância de não conformidade. A Formação Santa Maria na região é constituída por siltitos de coloração vermelha. Em áreas isoladas, nas encostas, ocorre a Formação Botucatu, aparecendo sobre a Formação Santa Maria e intercalada aos derrames da Formação Serra Geral (arenitos intertrápicos). A Figura 2 apresenta a geologia da encosta da rua Dr. Álvaro Correa da Silva, onde se encontra a área em estudo (adaptado de Wenzel, 1996).

A Formação Santa Maria é constituída por siltitos argilosos maciços, micáceos, de cor avermelhada e com argilominerais do grupo das montmorilonitas. Esta

formação encontra-se em praticamente toda a zona urbana de Santa Cruz do Sul, ocupando a área entre as cotas 30 e 100.

As rochas da Formação Santa Maria são as mais antigas e se encontram em grande parte da zona urbana do município em estudo (Figura 3). Grehs (1976) afirma que esta formação deve ter um comportamento pré-adensado, pois as rochas das Formações Botucatu e Serra Geral sobrepostas a ela foram erodidas na região. Devido à granulometria das rochas desta formação ser bastante fina, elas são pouco permeáveis. O mesmo autor também menciona que o solo residual desta Formação sofre escorregamentos com grande facilidade.

A Formação Botucatu (arenitos finos a médios, quartzosos e com presença de feldspatos, de grãos arredondados e sub-angulares) aparece na área urbana em uma posição intermediária entre o pacote sedimentar e a Formação Serra Geral, principalmente nas encostas da cidade (zonas norte e leste) e em morros testemunho ao sul. Ressalte-se que estes arenitos não foram encontrados na área estudada em afloramentos ou nas sondagens.

A Formação Serra Geral em Santa Cruz do Sul é constituída por três derrames basálticos heterogêneos e pouco desenvolvidos. Grehs (1976) registra que estas rochas estão bastante fraturadas, apresentando principalmente diaclasamentos verticais e horizontais. O processo de intemperismo transforma os minerais ferromagnesianos e feldspatos cálcicos das rochas basálticas em minerais argilosos, sendo este processo mais intenso em locais em que ocorrem preferencialmente fraturas horizontais devido ao acúmulo de água. Em zonas de fraturas predominantemente verticais, estas funcionam como drenos verticais, não permitindo o acúmulo de água.

INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

As investigações geotécnicas feitas na encosta foram sondagens a trado e à percussão com ensaio SPT, segundo as NBR 9603/1986 e NBR 6484/2001. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para a realização de ensaios laboratoriais.

Sondagens

Para a caracterização da área, Pinheiro et al. (2002) realizaram sondagens à percussão com ensaio

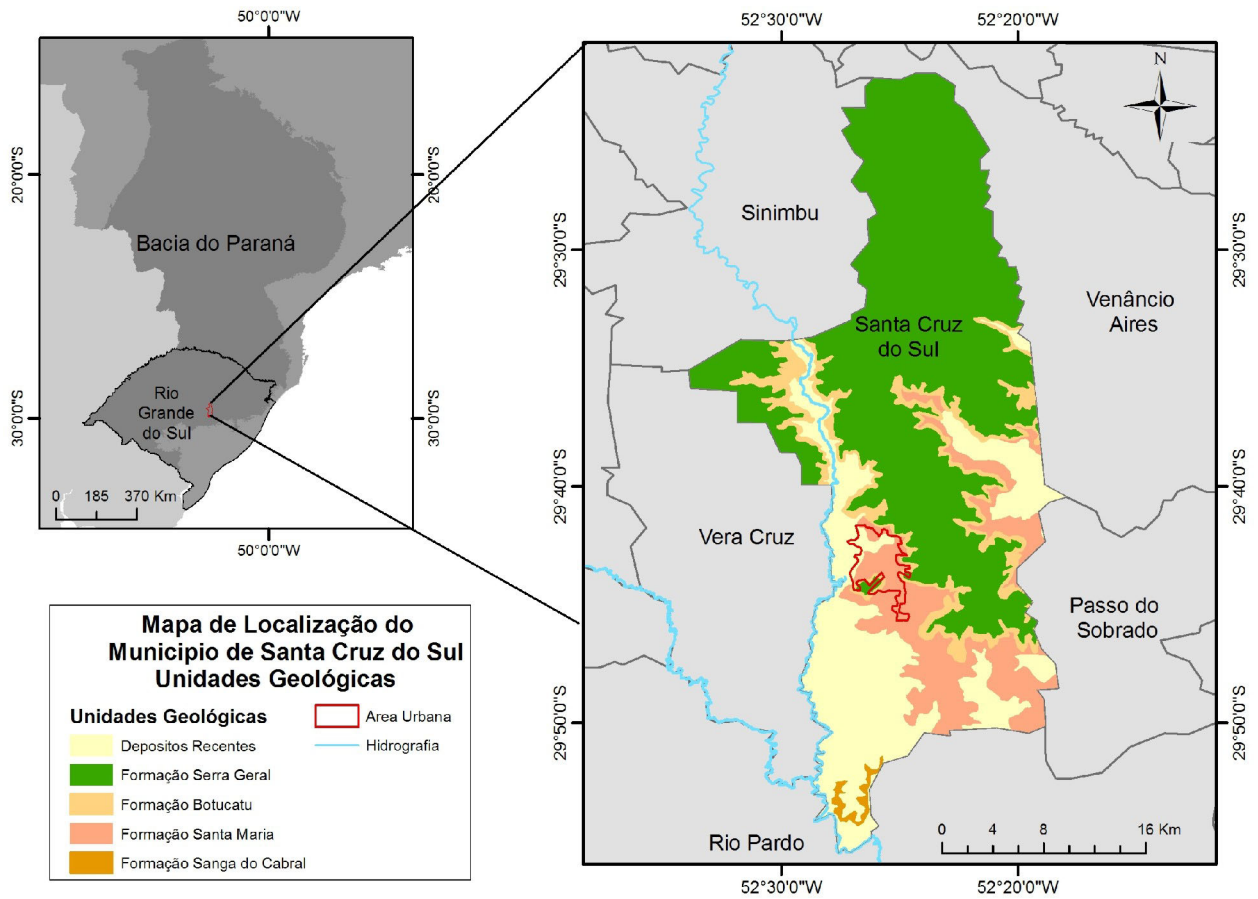


FIGURA 1. Localização da cidade de Santa Cruz do Sul e o seu contexto geológico.

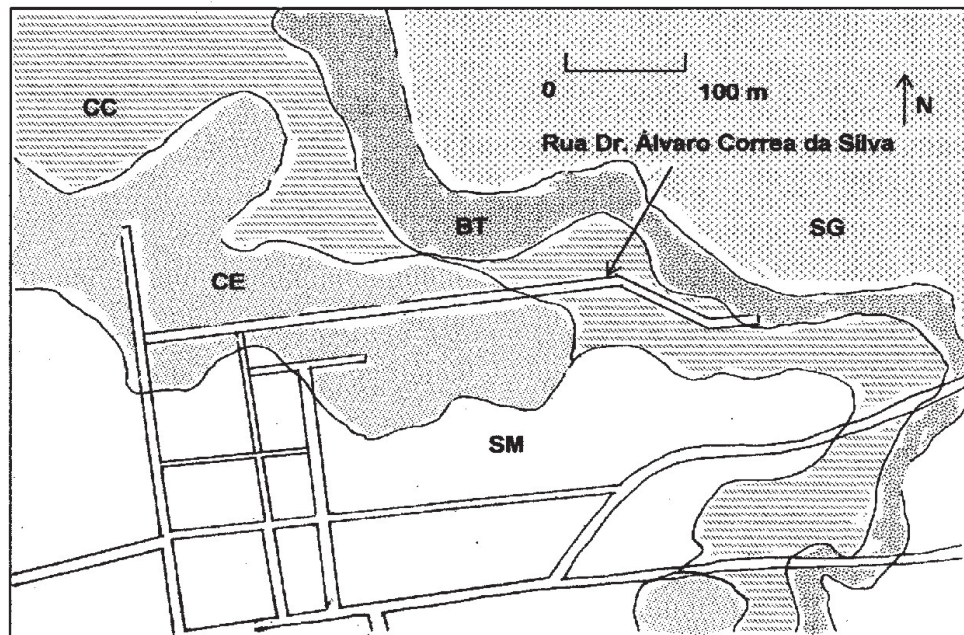


FIGURA 2. Mapa geológico simplificado da encosta na área de estudo (CC = colúvio; CE = colúvio onde se verificaram os processos de escorregamento; SM = Formação Santa Maria; SG = Formação Serra Geral; BT = Formação Botucatu).

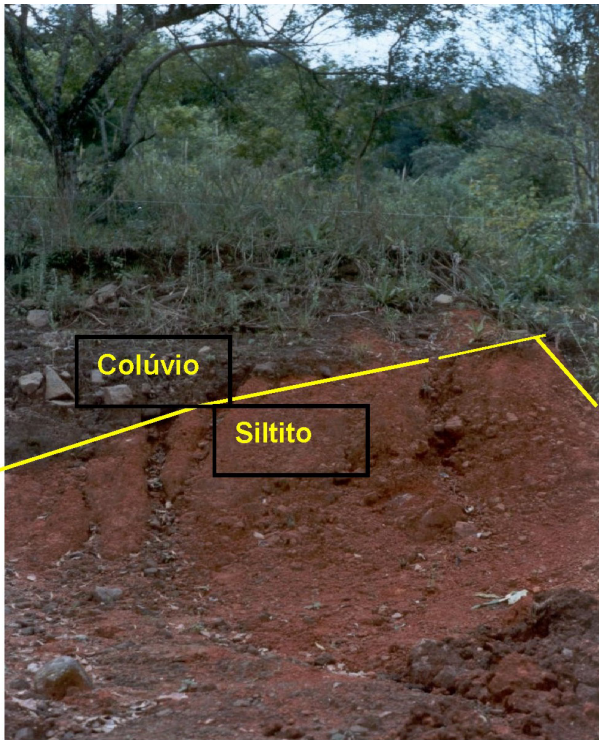


FIGURA 3. Contato entre solo coluvionar e o siltito da formação Santa Maria na área de estudo.

SPT e sondagens a trado (manual), com coleta de amostras para ensaios de laboratório. O perfil da área de estudo foi caracterizado como sendo constituído por um colúvio de espessura variável (2 a 10 m), composto de materiais silto-arenosos e areno-siltosos, de cor predominantemente marrom, com a presença de blocos e matacões de basalto e de arenito. Ainda, segundo estes autores, a camada basal é constituída de siltitos vermelhos da Formação Santa Maria. A Figura 4 traz os perfis de sondagens obtidos na encosta estudada. As sondagens S1 e S2 localizam-se acima da rua em estudo, onde o colúvio apresenta menor espessura (variando de 2 a 6 m) e com NSPT < 10. As sondagens S3 e S4 situam-se abaixo da mesma rua, onde a espessura do solo coluvionar é maior (da ordem de 8 a 10 m).

Ensaio de Laboratório

Pinheiro et al. (2002) e Eisenberger (2003) realizaram vários conjuntos de ensaios de caracterização com os materiais provenientes das sondagens feitas na encosta. A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de granulometria (NBR 7181/1984), limites de consistência (NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984) e índices físicos (NBR 6502/1995; NBR 6508/1984) ao longo da profundidade em 12 pontos da encosta.

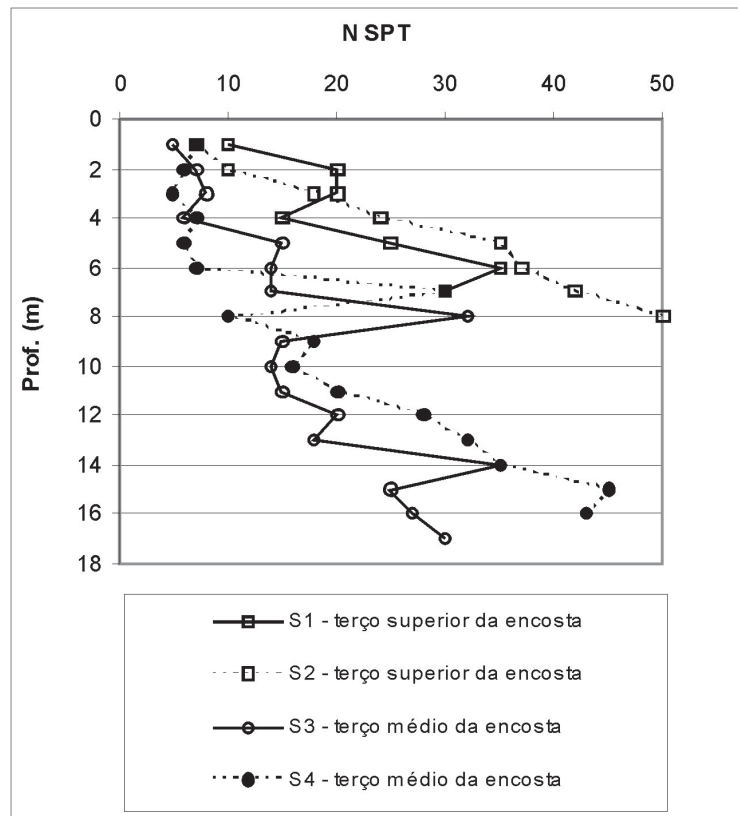


FIGURA 4. Resultado típico de ensaios penetrométricos (NSPT = número de golpes).

O solo coluvionar possui uma textura variável desde siltoso a arenoso com uma fração argila inferior a 30%. Esta camada apresenta média a baixa plasticidade ($w_l < 50\%$) com N_{SPT} de 5 a 10 golpes,

com matacões e blocos de arenito e rocha vulcânica, principalmente na parte superior da encosta (sondagens S1 e S2). A Figura 5 contempla os locais das sondagens, coletas de amostras e instrumentação da encosta.

TABELA 1. Caracterização geológica-geotécnica da encosta (Pinheiro et al., 2002 e Eisenberger, 2003).

Furo / Amostra	Prof. (m)	Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedr. (%)	wl (%)	IP (%)	Índices Físicos
9/1	0,3	Colúvio	10	52	38	-	49	23	$\gamma_s = 26,3$ a $27,4$ kN/m ³ $\gamma = 15,5$ a $16,7$ kN/m ³ $e = 1,2$ a $1,4$ $w = 20$ a 40% $S = 49$ a 83%
1/1	0,5 - 1	Colúvio	16	64	20	-	33	7	
1/2	1 - 1,5	Colúvio	18	56	26	-	37	13	
1/3	1,5 - 1,7	Colúvio	20	72	8	-	35	8	
1/4	1,7 - 2	Colúvio	22	48	30	-	38	7	
1/5	2 - 2,5	Colúvio	26	54	20	-	40	10	
1/6	2,5 - 3	Colúvio	15	37	48	-	30	4	
1/7	3,5 - 4	Colúvio	10	28	42	-	-	-	
7/3	10,0	Colúvio	8	22	70	-	28	12	
0/1	0,5	Siltito	9	72	18	-	32	5	$\gamma_s = 26,3$ a $26,8$ kN/m ³ $\gamma = 20,3$ kN/m ³ $e = 0,5$ a $0,6$ $w = 16$ a 19% $S = 80$ a 83%
1/1	0,6	Siltito	26	44	30	-	67	36	
2/2	0,6	Siltito	25	50	25	-	56	29	
3/2	0,9	Siltito	16	64	20	-	36	13	
3/3	2,1	Siltito	15	60	25	-	40	15	
6/1	1,3	Siltito	24	56	18	2	44	14	

Nota: w_l = limite de liquidez; IP = índice de plasticidade γ_s = peso esp. real dos grãos; γ = peso esp. natural; e = índice de vazios; w = teor de umidade; S = grau de saturação.

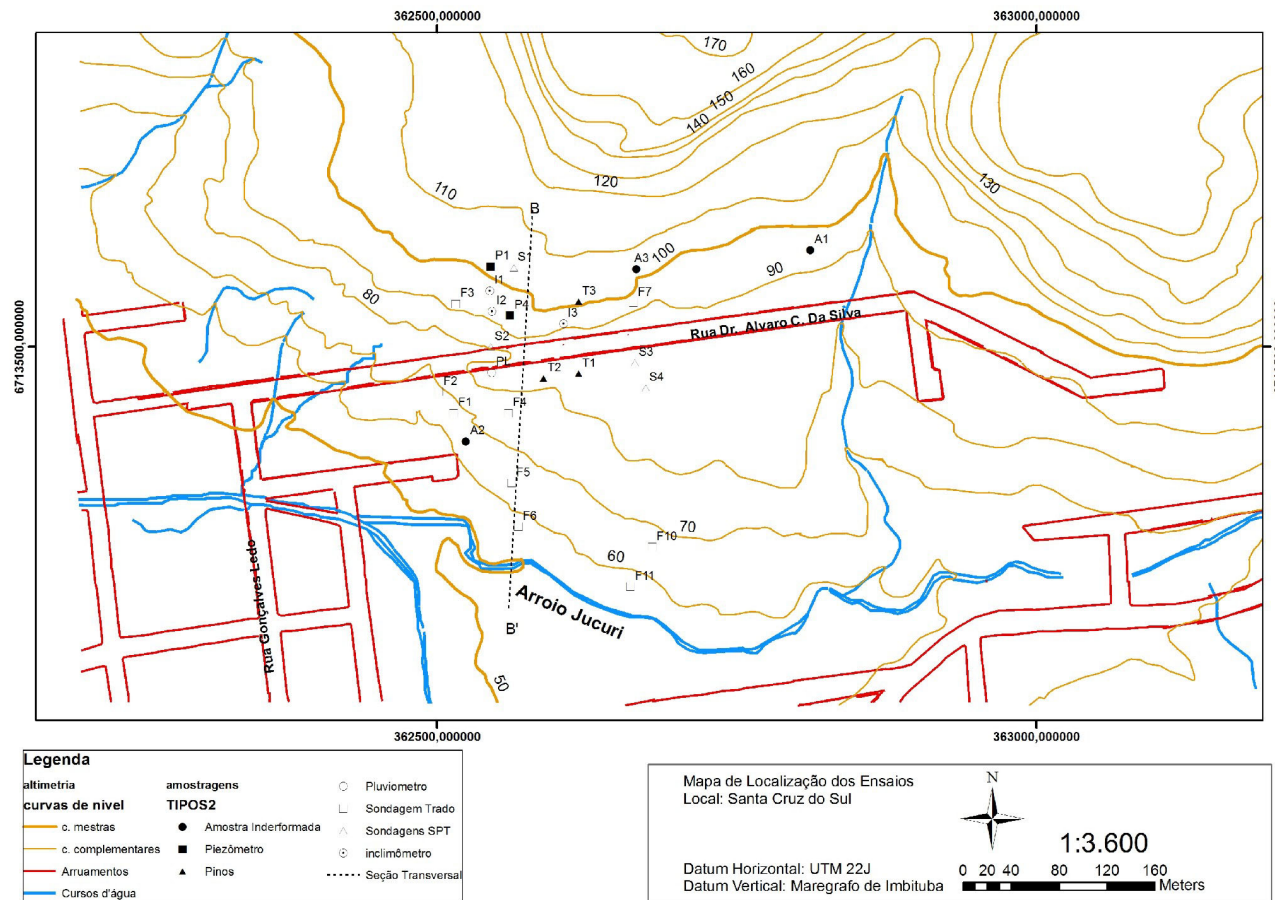


FIGURA 5. Localização das sondagens e instrumentos de monitoramento.

A camada de base da encosta é um siltito da Formação Santa Maria, de textura predominantemente silto-arenosa, de média a alta plasticidade e de consistência rija e dura (índice de vazios inferior a 0,6). O N_{SPT} nesta camada, é crescente com a profundidade. Ambos os materiais apresentam-se não saturados ($S < 100\%$). O solo coluvionar possui um peso específico mais baixo e um índice de vazio mais elevado, típico de depósitos de encosta.

Determinação dos Parâmetros de Resistência

Procederam-se ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova (5x5cm e 10x10cm) embebidos em água para saturação do solo coluvionar e do siltito vermelho. Ensaios triaxiais do solo coluvionar do tipo CD (consolidado drenado) em corpos de prova

5x10 cm também foram realizados. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto em todos os corpos de prova não evidenciam ocorrência de pico de ruptura (ou perda de resistência após o pico). Observa-se que os materiais coluvionares mantêm um nível de tensão cisalhante para vários níveis de deslocamento da caixa de cisalhamento, sendo a ruptura definida em função do deslocamento. As variações volumétricas apresentaram apenas comportamento compressivo. A Figura 6 traz as tensões cisalhantes máximas obtidas, nestes ensaios, para toda faixa de variação de tensões normais aplicadas. Verifica-se claramente que as envoltórias não são lineares e, para tensões normais superiores a 100 kPa, as envoltórias de resistência passam pela origem, apresentando um intercepto coesivo (c) nulo e um ângulo de atrito interno (Φ) entre 25 e 34°.

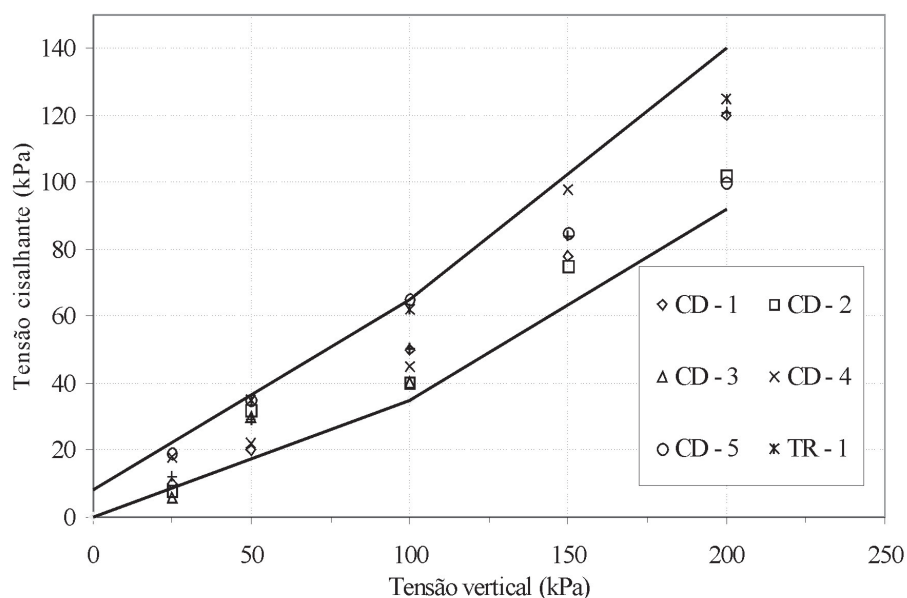


FIGURA 6. Envoltórias de resistências para o solo coluvionar.

INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA ENCOSTA

A instrumentação desta encosta foi iniciada em trabalho anterior apresentado por Pinheiro et al. (2002). Foram instalados, na encosta, tubos de inclinômetros, medidores de nível d'água e piezômetros de Casagrande em 2001. Em 2002, a instrumentação foi ampliada e foi instalado outro tubo de inclinômetro, um piezômetro de leitura automática, um pluviômetro (dados de pluviometria local com intervalos de uma hora) também de leitura automática e pinos de controle de trincas de edificações na encosta, os quais permitem um monitoramento da abertura das trincas através de um paquímetro. Os procedimentos de instalação e monitoramento destes equipamentos seguem as reco-

mendações de Dunnclif (1988). Todos os gráficos apresentados com escala de tempo em dias correspondem ao período de 30 de março de 2001 a 8 de março de 2003, totalizando 707 dias de monitoramento. Recentemente, Schneider (2010) realizou uma vistoria na encosta, verificando as condições das moradias e comparando com o levantamento feito anteriormente. Constatou-se que algumas moradias foram removidas e construídas novas nos mesmos locais.

MEDIDAS DE PORO-PRESSÃO E NÍVEL D'ÁGUA

Os piezômetros são dispositivos para medidas e monitoramento das poro-pressões na encosta. Entre

os vários piezômetros instalados, destaca-se o piezômetro P4 que foi colocado em furo de sondagem com diâmetro 10 cm e 2,45 m de profundidade, realizado com trado manual. Após a execução do furo, colocou-se areia para o preenchimento do fundo até uma altura de aproximadamente 30 cm. Em seguida, foi introduzido, no furo, o tubo de PVC, preparado previamente em laboratório. O tubo tem uma ponteira ranhurada de cerca de 60 cm na extremidade inferior, envolta por um geossintético amarrado com fios de nylon, a fim de evitar o seu entupimento por partículas de solo. A seguir, foi colocada areia ao redor do tubo de PVC até cerca de 30cm acima da ponteira ranhurada. Acima desta cota, colocaram-se esferas de bentonita secas, previamente preparadas em laboratório e que, depois de instaladas foram imediatamente hidratadas pela colocação de água no furo, para garantir o selamento do piezômetro nessa profundidade. Por fim, no trecho superior, foi utilizado o próprio solo local compactado. A instalação do piezômetro limitou a comunicação hidráulica entre o tubo e o solo apenas pela ponteira ranhurada. Após a instalação do piezômetro, executou-se uma pequena

caixa de alvenaria com uma porta sobre o piezômetro, de modo que a caixa serviu para instalar o sistema de medição automática de dados, evitando, assim algum vandalismo.

As leituras dos outros piezômetros (P1, P2 e P3) deram-se manualmente, tendo sido iniciadas em maio de 2001. Os dados obtidos indicam uma variação máxima de 2 a 3 m de coluna de água nestes piezômetros, assim sendo, os resultados demonstram uma mesma tendência de variação dos níveis piezométricos. Não se observou a ocorrência de artesianismo na encosta. A Figura 7 mostra os resultados obtidos com o piezômetro automático P4. Os resultados do monitoramento automático demonstram picos de variação do nível piezométrico, chegando próximo à superfície. Observe-se, neste sentido, que estes picos não são detectados com o monitoramento manual.

O pluviômetro automático fez seus registros, com um intervalo de uma hora entre leituras, durante o período compreendido entre 24 de junho de 2002 a 15 de fevereiro de 2003 e os resultados obtidos são apresentados parcialmente na Figura 7 (mês de setembro e outubro).

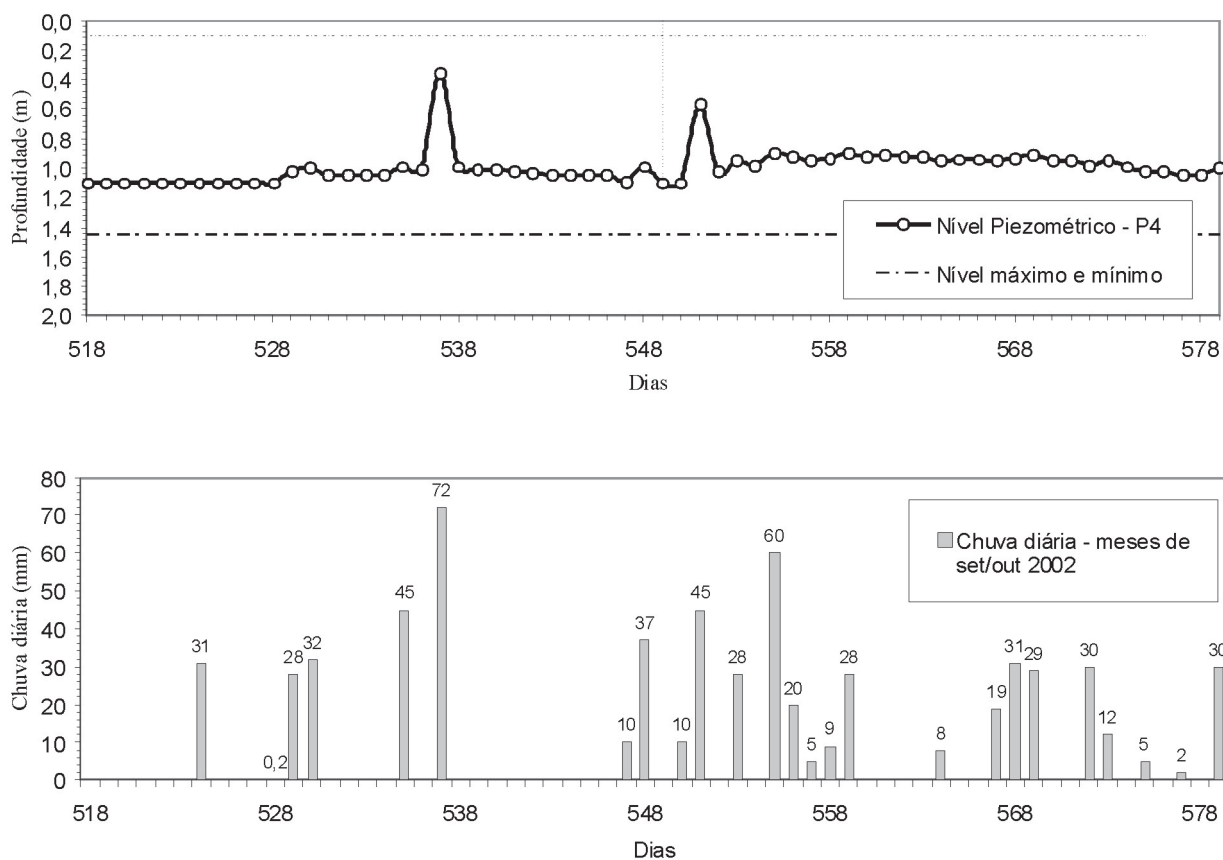


FIGURA 7. Medidas de precipitação e poro-pressão no piezômetro automático (P4) entre os meses de setembro e outubro de 2002.

As chuvas registradas pelo pluviômetro na encosta indicam valores mensais superiores a média mensal da série histórica de 16 anos, sendo similares ou maiores aos máximos mensais registrados. No mês de outubro, a precipitação atingiu 369 mm, sendo este valor o máximo registrado para este mês no período da série histórica. O mês de janeiro de 2003 apresentou uma precipitação de 89mm, ficando bastante abaixo da média para o mesmo mês, que é de 159 mm. Os resultados demonstram a grande intensidade das chuvas que ocorreram no ano de 2002, o que provocou diversos alagamentos na cidade de Santa Cruz do Sul e este evento natural, por sua vez, permitiu observar a encosta em uma situação bastante crítica.

Comparando-se a precipitação acumulada com o nível piezométrico do piezômetro automático P4, observa-se que as chuvas acumuladas não possuem boa correlação. A chuva diária ocorrida no mês de setembro de 2002 apresenta uma boa correlação com a variação do nível piezométrico, conforme representado na Figura 7. Naquele mês, verificou-se que, no dia 6 (524) choveu 30 mm e não houve modificação no nível piezométrico. Nos dias 11 (530) e 12 (531) choveu 27 e 32 mm respectivamente, já provocando leve alteração no nível piezométrico. No dia 17 (536), choveu 45 mm, alterando levemente o nível. A chuva do dia 19 (538), 72 mm, provocou um pico no nível piezométrico de cerca de 65 cm.

Analisando-se o mês de outubro (Figura 6), verifica-se que a chuva diária ocorrida no dia 3 (551) foi de 45 mm, provocando um pico no nível piezométrico de cerca de 45 cm. Entretanto, no dia 7 (551) de outubro, a precipitação foi de 60 mm, o que não determinou singela alteração no nível piezométrico. No restante

do mês de outubro, ocorreram chuvas diárias máximas de 30 mm, o que não alterou o nível piezométrico. Este comportamento sugere que a chuva deve ultrapassar certo patamar para instaurar mudanças do nível piezométrico, elevando-o próximo à superfície quando a precipitação for alta. Anote-se que este comportamento é verificado também para os outros meses de monitoramento de chuva.

LEVANTAMENTO DE SUBSUPERFÍCIE – INCLINÔMETRIA

Os inclinômetros permitem a determinação da distribuição do movimento lateral da encosta em função da profundidade e do tempo. Eles são constituídos por tubos flexíveis instalados permanentemente em furos de sondagem que, através de um torpedo que contém um transdutor sensível a inclinação em relação à inclinação em relação à vertical. Os dados obtidos de 2 tubos instalados na encosta encontram-se representados nas Figuras 8 e 9. Na Figura 8 (inclinômetro I-1), verifica-se que a superfície de ruptura ocorre em torno dos 6m de profundidade, exatamente no contato do solo coluvionar com o siltito vermelho. Esta ruptura provoca deslocamentos constantes ao longo do perfil da camada coluvionar. O deslocamento total medido foi de 35 mm ao longo de 22 meses.

O segundo tubo de inclinômetro (I-2), localizado na encosta a jusante do tubo I-1, atravessa uma espessura de colúvio menor, com a ruptura não tão definida e limitada a 3 m de profundidade (Figura 9). Os deslocamentos horizontais medidos indicam velocidades diferentes dentro da camada coluvionar, com uma velocidade maior no topo da camada. O deslocamento total medido foi de 63 mm em 22 meses

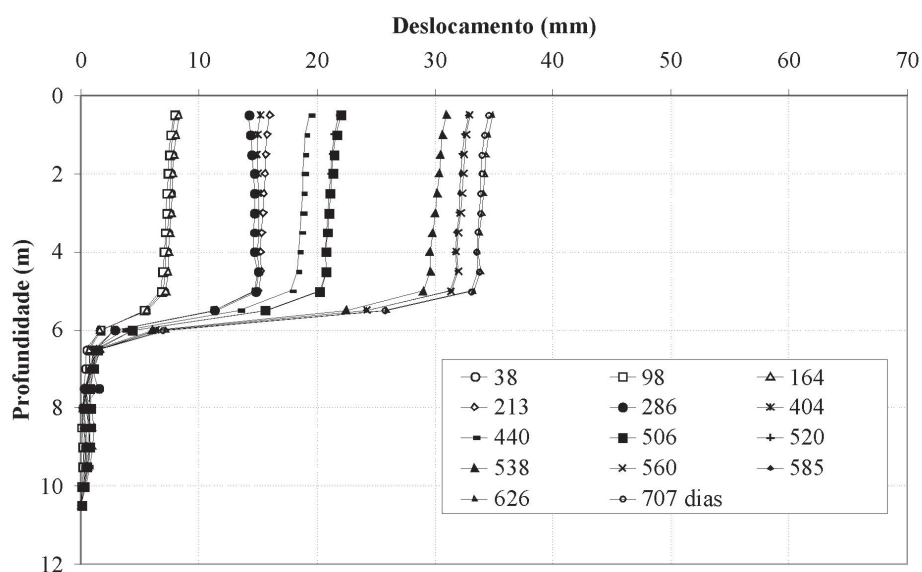


FIGURA 8. Medidas dos deslocamentos no inclinômetro I-1.

de monitoramento. Apesar dos 2 tubos de inclinômetros estarem próximos (na parte superior da encosta) verifica-se a variação de espessura do solo coluvionar, que neste local da encosta variou entre 2 e 6 m de espessura.

Já a Figura 10 apresenta os deslocamentos horizontais observados no topo dos tubos de inclinômetros no período de junho de 2002 a março de 2003 (450 a 707 dias). Nota-se que os maiores deslocamentos horizontais, observados nos tubos, aconteceram no período de setembro a outubro (520 a 560 dias), em que se verificaram valores consideráveis de chuva (Figura 6). Percebe-se que há períodos de aceleração

do movimento, enquanto, em outros períodos, não há praticamente deslocamento horizontal. Comparando as Figuras 6 e 9, verifica-se que no, mês de setembro de 2002, a chuva mensal foi de 251 mm, sendo a média histórica de 166 mm. O mês de outubro apresentou precipitação de 369 mm, sendo que, neste mês, a precipitação média foi de 170 mm e a máxima da série histórica foi de 360 mm. Embora os meses de julho, agosto, novembro e dezembro também tenham registrado precipitações acima da média mensal histórica, não houve significativos deslocamentos horizontais observados através dos tubos de inclinômetro neste período.

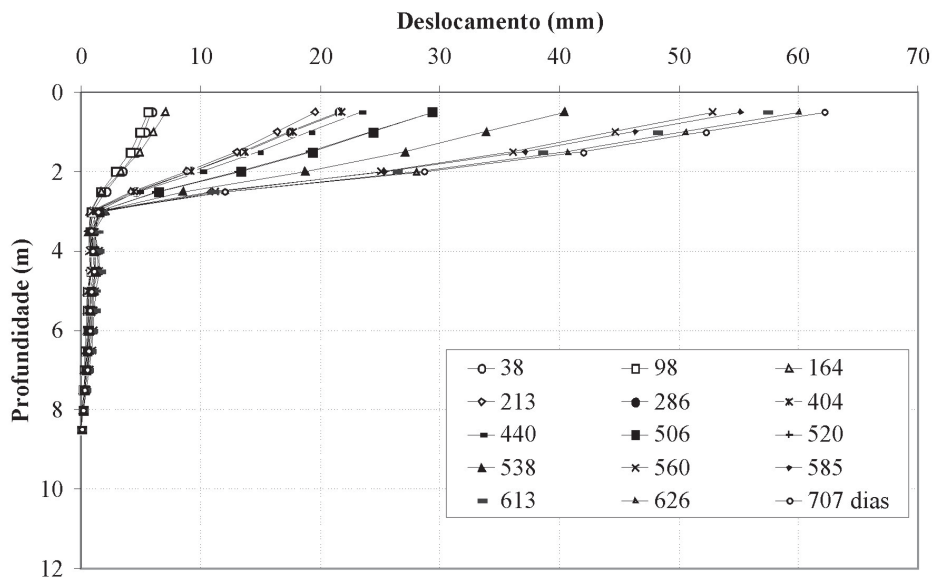


FIGURA 9. Medidas dos deslocamentos no inclinômetro I-2.

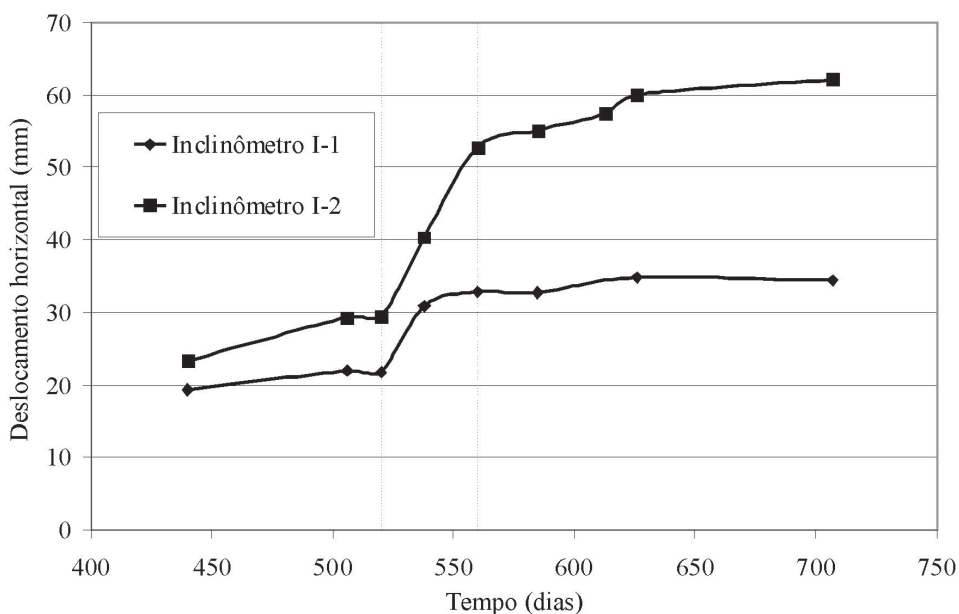


FIGURA 10. Deslocamentos no topo dos tubos dos inclinômetros.

LEVANTAMENTO DAS DEFORMAÇÕES NAS MORADIAS

A fim de monitorar a abertura de trincas pela movimentação da encosta das edificações, foram instalados, em três locais, pinos no entorno de trincas pré-existentes em moradias (T1, T2 e T3). Os pinos foram posicionados em forma de triângulo em um plano vertical, o que possibilitou o monitoramento das componentes horizontal e vertical do movimento de abertura. As primeiras leituras foram realizadas com um paquímetro metálico e posteriormente, em virtude da magnitude dos deslocamentos relativos, a distância entre os pinos ficou maior que o curso do paquímetro e o monitoramento da abertura das trincas passou a ser realizado com uma trena. O erro associado a leituras realizadas com a trena é da ordem de 1 mm, sendo aceitável frente aos deslocamentos relativos totais medidos.

Nos locais das trincas T1 e T2, os pinos foram instalados no encontro das paredes laterais de uma residência com o muro de divisa lateral, na parte situada à frente da residência. Os locais foram escolhidos pelo fato desta residência apresentar sérias patologias provocadas pela movimentação da encosta. A Figura 11 apresenta os resultados das medições realizadas nesta residência. A componente horizontal de abertura observada é de direção norte-sul, sendo concordante com o mergulho da encosta. Observa-se que, no local do pino T1, o movimento é um pouco maior na componente vertical do que na componente horizontal, totalizando uma componente horizontal de 27 mm e uma componente vertical de 39 mm num período de seis meses.

A trinca monitorada T2 apresenta um movimento predominantemente horizontal. No início do monito-

ramento, o movimento foi basicamente vertical e, depois, o movimento foi preponderantemente na direção horizontal. O deslocamento total medido foi de 24,3 mm, na componente horizontal, e 6 mm, na componente vertical, em um período de seis meses.

A terceira trinca monitorada (T3) situa-se em outra residência, situada em frente à residência das trincas T1 e T2. Esta moradia foi originalmente construída em duas etapas, as quais estão sendo separadas pela movimentação da parte frontal da residência. Observa-se que os deslocamentos são principalmente horizontais, em que houve um deslocamento horizontal total de cerca de 80 mm, indicando um movimento local mais translacional. Os deslocamentos verticais foram oscilantes em um intervalo de cerca de 4 mm.

Na Figura 12, apresentam-se, em conjunto, os deslocamentos obtidos no topo dos tubos de inclinômetro I-1 e I-2 e os medidos nos pinos colocados nas duas residências. Verifica-se a tendência crescente do aumento dos deslocamentos. A abertura das trincas movimentou-se com deslocamentos horizontais bastante superiores aos deslocamentos medidos nos tubos de inclinômetro, chegando a 80 mm em um período de seis meses. Constata-se, nesta Figura, que o período de maior deslocamento foi no início das medições, no mês de setembro (523 dias), até início de novembro (580 dias), correspondendo em um intervalo próximo ao período em que os deslocamentos horizontais foram mais intensos nas medições dos tubos dos inclinômetros. Embora os deslocamentos horizontais de abertura das trincas instrumentadas sejam maiores do que os deslocamentos horizontais registrados pelos tubos dos inclinômetros, o período em que ocorreram os maiores deslocamentos horizontais foram coincidentes.

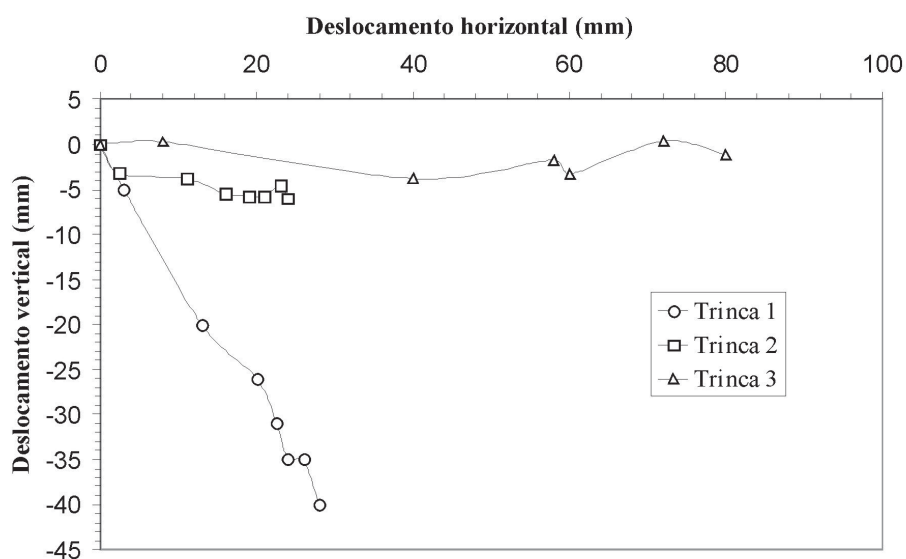


FIGURA 11. Monitoramento dos pinos de setembro de 2002 a março de 2003.

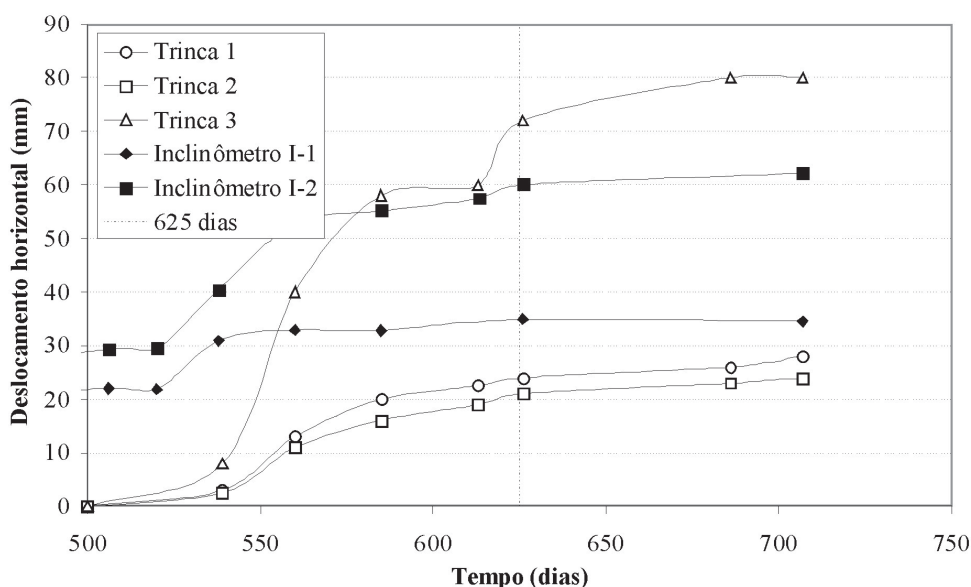


FIGURA 12. Comparação entre os valores medidos nos pinos e inclinômetros.

Observando-se a Figura 7, a qual apresenta o nível piezométrico com leitura automática, percebe-se que os dois picos ocorridos próximos ao dia 550 correspondem ao período de aceleração dos deslocamentos horizontais, registrados nos tubos dos inclinômetros e nas trincas instrumentadas. O pico do nível piezométrico correspondente ao dia 625 teve repercussão no tubo de inclinômetro I-2 e na trinca T3, não provocando deslocamento horizontal significativo no tubo de inclinômetro I-1 e nas trincas T1 e T2, conforme visualizado na Figura 12. Isto se deve ao movimento da encosta não ser homogêneo, em forma de um bloco, mas retrogressivo, efetuando-se deslocamentos diferentes ao longo da encosta. Como a instrumentação é pontual, os picos piezométricos podem provocar deslocamentos em uma

área da encosta, não ocorrendo em outras partes. Compreende-se com isto, porque alguns picos piezométricos não resultaram em deslocamentos significativos na instrumentação da encosta.

Comparando-se as medidas do nível piezométrico do piezômetro automático com os níveis piezométricos dos piezômetros de leitura manual, tem-se que as leituras manuais não apresentam os picos piezométricos. Estes picos são extremamente importantes, pois, embora de curta duração, eles fazem com que os fatores de segurança da encosta diminuam e os deslocamentos aconteçam. Portanto, o monitoramento do nível piezométrico desta encosta, que apresenta tempo de resposta da piezometria rápido em relação às precipitações, deve ser realizado com piezômetros de leitura automática.

ANÁLISE DAS PATOLOGIAS DAS MORADIAS

Fez-se um levantamento e uma análise das patologias nas edificações provocadas pela movimentação da encosta. Através de inspeções e entrevistas realizadas nas residências visitadas, mapearam-se as áreas afetadas pela movimentação, bem como a sua intensidade. As patologias visualizadas foram fotografadas, sendo, após, classificadas pela sua origem e por sua gravidade, através de metodologias propostas na literatura para este fim (Alexander, 1986; Chiochio et al., 1997).

De acordo com os resultados das entrevistas efetuadas, constatou-se que as estruturas existentes no local são relativamente novas, de uso exclusivamente residencial e, na maior parte dos casos, de alto padrão.

Observa-se que, em geral, as residências possuem estruturas de concreto armado e fundações profundas, principalmente do tipo metálicas cravadas, Strauss ou escavadas. Os terrenos são, via de regra, aterrados, em especial aqueles situados ao sul da rua Dr. Álvaro Correa da Silva (Figura 1). Em relação às patologias, 47% das edificações apresentam, atualmente, algum tipo de patologia. Destas, 69% possuem fundações profundas. Através das inspeções realizadas nas edificações, observou-se que a principal causa de patologias é a movimentação da encosta, seguida de recalques de fundação, os quais podem estar associados à movimentação da massa de solo, ou serem provocados por problemas executivos de fundações profundas,

devidos à frequência de matações no solo coluvionar (Pinheiro et. al, 2006).

Os critérios utilizados para classificar as principais causas das patologias foram as características destas patologias, tais como: inclinação, abertura, posição, quantidade de trincas, posição de alicerces, entre outras. Adotaram-se também as considerações apresentadas por Thomaz (1989).

As residências próximas à rua Gonçalves Ledo estão assentadas sobre fundações profundas, apresentando patologias leves, geralmente associadas a recalques diferenciais. Já as casas localizadas na parte central da encosta evidenciam patologias mais graves.

A partir da medição dos deslocamentos do piso de uma das moradias, pode-se inferir que o deslocamento total observado, na encosta, entre os anos de 1997 e 2002, foi de aproximadamente 40 cm na direção horizontal e 20 cm na direção vertical. A partir da observação destas patologias, confeccionou-se, o mapa que consta na Figura 13, em que estão representados os níveis de severidade de danos encontrados e as causas prováveis destes danos em algumas residências indicadas pela letra R.

A observação do mapa permite concluir que existem movimentos do terreno bastante ativos na região, principalmente em uma faixa de sentido norte-sul, onde estão localizadas as residências R6, R7, R8,

R9, R10 e R11. Estas residências são as que apresentam os maiores índices de danos de edificações provocadas pela movimentação da encosta.

Em conformidade com a classificação de Chiochio et al. (1997) apresentada na Tabela 2, as residências desta faixa apresentam níveis 3 (moderado) e 4 (sério), destacando, pois, patologias graves. As outras residências da rua Dr. Álvaro Correa da Silva, localizadas mais no extremo da rua, apresentam patologias mais leves ou nem mesmo apresentaram-nas associadas à movimentação da encosta. Em face destas constatações, pode-se afirmar que tal dado indica o movimento ocorre principalmente em uma faixa central que vai desde o topo da encosta até o arroio Jucuri, passando pelas residências em que os níveis de severidade são mais altos.

Em trabalho recente (Schneider, 2010), nesta encosta, verificou-se que as moradias R7, R8 e R9 foram destruídas e novas edificações foram construídas, cujas fundações são constituídas por estacas metálicas cravadas (perfis I) até uma profundidade média de 20 m (de 8 a 12 m mais compridas que as usualmente adotadas). Não foram mais utilizadas estacas de concreto (escavadas e Strauss). A Figura 14 traz alguns dos tipos de patologias mais comuns na área de estudo e em outras encostas na cidade de Santa Cruz do Sul.

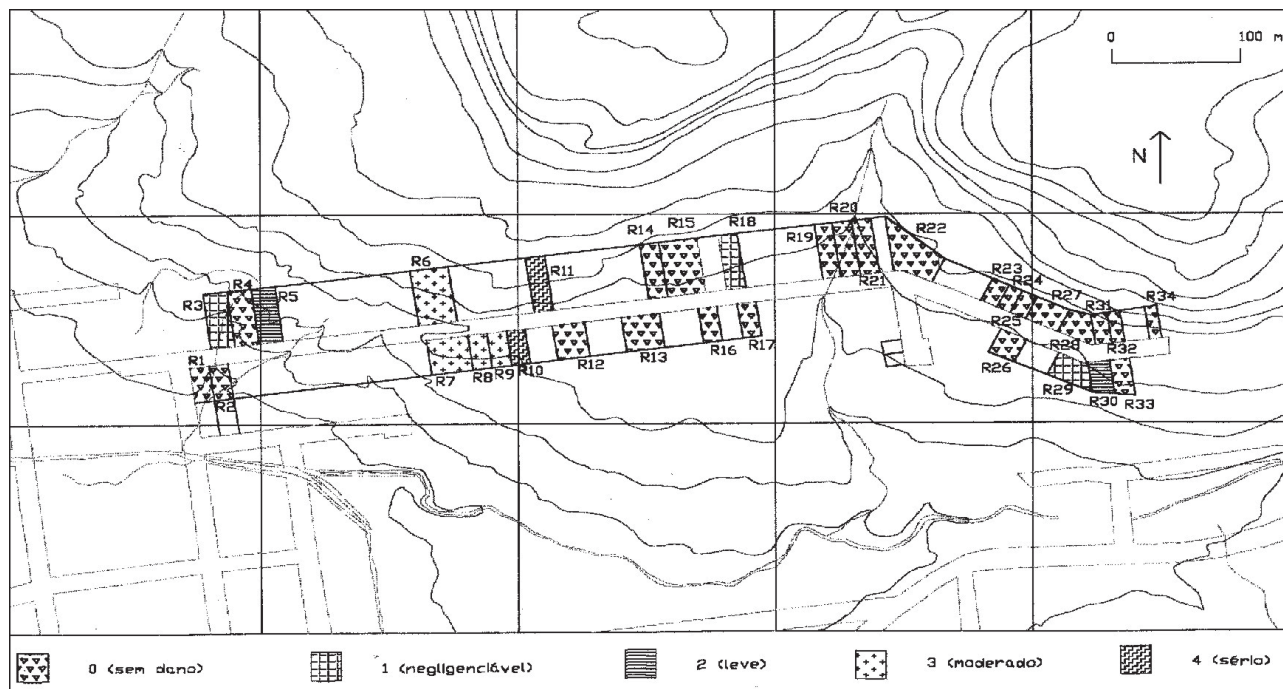


FIGURA 13. Mapa de severidade de patologias provocadas pelo movimento da massa de solo.

TABELA 2. Classificação adotada de dano nas edificações provocados pela movimentação da encosta (Alexander, 1986).

Grau	Nível do Dano	Características
0	sem dano	Edificação intacta
1	negligenciável	Pequenas fissuras nas paredes ou membros da estrutura sem distorção da estrutura ou destacamento de detalhes decorativos externos
2	leve	Edificação continua habitável, os reparos não são urgentes; recalque de fundação, distorção da estrutura e inclinação de paredes não são suficientes para comprometer a estabilidade
3	moderado	Paredes fora de prumo de 1 a 2°, ou fissuração substancial de membros da estrutura, ou fundações apresentando recalques diferenciais de pelo menos 15 cm; necessidade de evacuação da edificação
4	sério	Paredes fora de prumos por vários graus; fissuras abertas nas paredes; fraturamento de elementos da estrutura; fragmentação da alvenaria; recalques diferenciais de pelo menos 25 cm comprometendo as fundações; piso com inclinação de 1 a 2°, ou ruptura por soerguimento; paredes divisórias internas terão que ser recuperadas; não fechamento de portas e janelas; ocupantes devem evacuar e principais danos corrigidos.
5	muito sério	Paredes fora de prumo por 5-6°, estrutura torcida; recalque diferencial provoca sérias trincas em pisos e paredes ou a rotação na edificação; em edificações de madeira há o destacamento completo das fundações; paredes de alvenaria de vedação parcialmente colapsadas; os ocupantes devem ser realocados, pois provavelmente não há mais recuperação da edificação.
6	colapso parcial	Evacuação imediata e isolamento da área para evitar acidentes com o colapso da alvenaria.
7	colapso total	Isolamento da área



FIGURA 14. Trinca na rua Dr. Álvaro Correa e aspecto de uma moradia com sérios danos.

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DA ENCOSTA

Através dos dados obtidos na instrumentação e na investigação de campo e nos resultados dos ensaios de laboratório, foram realizadas análises de estabilidade em seções da encosta. As seções foram escolhidas em função da gravidade das patologias que ocorrem na área. Várias simulações foram feitas, incluindo a variação paramétrica da poro-pressão, a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos, etc. Para a análise de estabilidade, empregou-se o programa SLOPE/W da GEOSLOPE (1984), seguindo os procedimentos da NBR 11682/2009 – Estabilidade de encostas. Este programa utiliza a teoria de equilíbrio limite para o cálculo do fator de segurança. O método adotado, na determinação dos fatores de segurança (FS), foi Bishop Simplificado. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados na análise foram baseados nos valores obtidos nos ensaios de laboratório.

A Tabela 3 demonstra os resultados da análise de estabilidade para a seção típica (norte-sul), variando-se os valores de ângulo de atrito interno (Φ) e coesão do solo (c) coluvionar. Os valores dos parâmetros de resistência do siltito, utilizados nesta análise de estabilidade, foram os obtidos por Pinheiro et al. (2002), ou seja, intercepto coesivo igual a zero e ângulo de atrito interno igual a 34° .

Os valores dos fatores de segurança calculados são bastante baixos, próximos de 1,0 para os ângulos de atrito entre 28° e 29° . A Figura 15 explicita o resultado gráfico com as superfícies mais críticas de ruptura

TABELA 3. Fatores de segurança obtidos na análise de estabilidade variando a coesão e o ângulo de atrito do solo coluvionar.

FS	$\Phi = 28^\circ$	$\Phi = 31^\circ$	$\Phi = 34^\circ$
$c = 0$ kPa	1,10	1,24	1,39
$c = 3,25$ kPa	1,21	1,36	1,51
$c = 6,5$ kPa	1,33	1,47	1,64

encontradas. Estas superfícies de ruptura situaram-se no contato entre o solo coluvionar e o siltito vermelho. O local da ruptura, apresentada na Figura 15a, situa-se próximo de uma trinca de tração observada *in situ*. A superfície de ruptura de fator de segurança mais baixo, encontrada na parte superior (Figura 15b), corresponde à região em que estão instalados os inclinômetros I1 e I2, nos quais se observou uma ruptura entre 3 e 6 m de profundidade.

O nível d'água, utilizado nesta análise, foi o máximo medido pela instrumentação de campo. Adotando-se os valores médios c e Φ , o FS situou-se entre 1,2 e 1,4. Foi verificado também que, elevando-se o nível d'água até a superfície do terreno, o FS cai para 1,0. Observa-se que, na análise apresentada, não houve uma superfície crítica cobrindo todo o comprimento da encosta, mas uma série de superfícies restritas a pequenas áreas. Estas superfícies reproduzem bem os movimentos identificados no local e os deslocamentos monitorados.

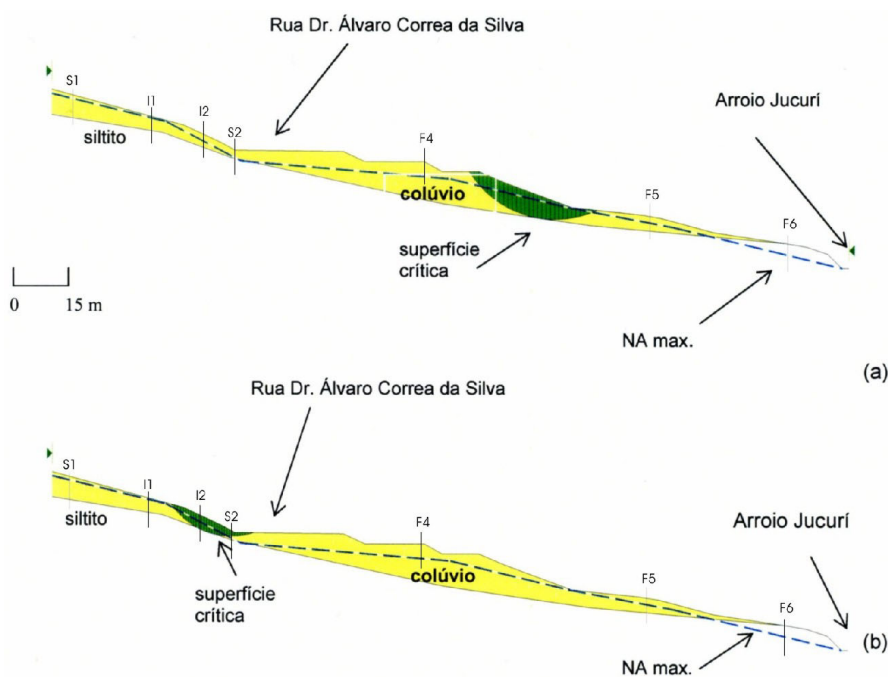


FIGURA 15. Superfícies de ruptura críticas na seção N-S, com os níveis piezométricos máximos medidos em campo e localização das sondagens e instrumentação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O local estudado já é conhecido por possuir algumas moradias danificadas, mas pouco mais se conhecia sobre o motivo. A área é formada por encostas relativamente suaves, compostas por colúvios, aterros e cortes em siltitos vermelhos. O levantamento de danos (perdas) nas moradias localizadas nesta encosta revelou que a severidade situou-se ente negligenciável a severa (segundo classificação de Alexander, 1986) dependendo da posição em relação à encosta.

Foram feitas sondagens na área, incluindo retiradas de amostras de solos. A espessura do solo variou entre 3 e 10 m. Ensaios realizados, neste solo, apresentaram alguma variabilidade e isto afeta os parâmetros de resistência ao cisalhamento.

O monitoramento da encosta deu-se com piezômetros, inclinômetros e pinos de deslocamento. O uso de piezômetros automáticos e pluviômetros (leituras em intervalo de 1h) ressaltaram que a poro-pressão teve uma resposta rápida após um valor especificado de chuvas. O piezômetro automático apresentou picos de 1 m (10kPa) para chuvas intensas diárias e alguma resposta para chuvas acumuladas de 3 dias. As leituras manuais dos outros piezômetros não apresentaram tais picos (pois não eram lidos em tempos apropriados). Conforme se constatou, as chuvas que causam picos de poro-pressões foram acima de 50 mm/dia durante períodos úmidos.

Acrescente-se, nestas ponderações, que o monitoramento cobriu um período de meses chuvosos mais intensos que a média dos últimos 16 anos, situação que,

causou grandes deslocamentos da encosta e possibilitou medidas significativas de movimentos do solo colúvionar. O período crítico de monitoramento (medidas de maior magnitude nos tubos dos inclinômetros e deslocamentos superficiais) foi em setembro e em outubro de 2002, época marcada por precipitações mais elevadas. Na análise dos inclinômetros, verificou-se que a ruptura foi bem definida no contato entre os materiais e a ocorrência de zona de distorção acima dos 3m de profundidade. Ambos apresentaram aceleração dos movimentos neste período.

Os picos de poro-pressão medidos mostraram uma boa correlação com os movimentos medidos na encosta obtidos pelos inclinômetros e pinos. Registre-se que os movimentos parecem ter acontecido de maneira retrogressiva seguindo uma sequência temporal.

Análises de estabilidades realizadas em seções típicas apresentaram fatores de segurança próximo de 1,0 em várias superfícies críticas, as quais estão limitadas em extensão. Tal dado é interessante de se observar, posto que a composição destas superfícies individuais parece representar bem o movimento observado em todo à encosta. Em geral, os movimentos são lentos (40 cm em 5 anos é uma boa estimativa), mas com aceleração durante os períodos de elevação (picos) de poro-pressão.

Trabalhos posteriores, ainda em andamento, têm demonstrado que outras áreas na cidade também são afetadas por movimentos de magnitudes similares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Prefeitura Municipal de Santa Cruz do Sul pelo apoio na investigação da área e aos Programas de Pós-Graduação de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da Universidade Federal de Santa Maria pelo apoio na instrumentação e monitoramento da encosta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de liquidez – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 6459. Rio de Janeiro, 1984.
2. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.
3. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Determinação do limite de plasticidade – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 7180. Rio de Janeiro, 1984.
4. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.
5. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Limites de Consistência – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.
6. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Sondagem a trado** – Procedimento: NBR 9603. Rio de Janeiro, 1986.
7. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas e Solos – Terminologia**. Procedimento: NBR 6502. Rio de Janeiro, 1995.

8. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio** – Procedimento: NBR 6484. Rio de Janeiro, 2001.
9. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Estabilidade de encostas** – Procedimento: NBR 11682. Rio de Janeiro, 2009.
10. BRESSANI, L.A.; PINHEIRO, R.J.B.; BICA, A.V.D.; EISENBERGER, C.N.; SOARES, J.M.D. Movements of a large urban slope in town of Santa Cruz do Sul (RGS), Brazil. In: 10 th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES AND ENGINEED SLOPES, 2008, Xi'an, China. **Proceedings...** Xi'an: Chinese Institution of Soil Mechanics, 2008, p. 1-8.
11. DUNNICLIF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance**. New York: John Wiley & Sons Inc., 577 p., 1988.
12. EISENBERGER, C.N. **Estudo do comportamento de um talude coluvionar urbano em Santa Cruz do Sul-RS**. Porto Alegre, 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, UFRGS.
13. CHIOCCHIO, C.; IOVINE, G.; PARISE, M. A proposal for surveying and classifying landslide damage to buildings in urban areas. In: ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT, 1997, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam, 1997, p. 553-558.
14. GCO SLOPE MANUAL. **Geotechnical Manual Slope**. 2nd, Hong Kong: Geot. Control Office, 1984.
15. GREHS, S.A. Mapeamento geológico preliminar de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao planejamento integrado. **Acta Geológica Leopoldensia**, v. 1, p. 121-152, 1976.
16. GREHS, S.A. **Mapeamento geológico estrutural da zona urbana de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao planejamento integrado**. Porto Alegre: 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, UFRGS.
17. IBGE. **Estimativa de população**. Disponível em: www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010. Acessado em: 10mar2011.
18. NORONHA, F.L.; BRESSANI, L.A.; MIZUSAKI, A.M.P. Mapeamento geotécnico da área urbana de Santa Cruz do Sul (RS, Brasil). In: SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL / GEORS'2009, Pelotas. **Anais...** Pelotas, 2009, 12 p.
19. PINHEIRO, R.J.B.; SOARES, J.M.D.; BICA, A.V.D.; BRESSANI, L.A.; EISENBERGER, C.N. Investigação geotécnica de uma encosta na área urbana de Santa Cruz do Sul. In: COBRAMSEG, 12, 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2002, v. 2, p. 1247-1257.
20. PINHEIRO, R.J.B.; SOARES, J.M.D.; EISENBERGER, C.N.; BICA, A.V.D.; BRESSANI, L.A. Patologia de edificações devido à movimentação de encostas na cidade de Santa Cruz do Sul. **Tecno-Lógica**, v. 10, p. 1-15, 2006.
21. SCHNEIDER, P. **Patologias de edificações devido à movimentação de encostas na cidade de Santa Cruz do Sul – RS**. Santa Maria, 2010. 83 p. Trabalho (Conclusão de Curso de Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria.
22. THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios – causas, prevenção e recuperação**. São Paulo, IPT/EPUSP/PINI, 194 p., 1989.
23. WENZEL, J.A. **Mapeamento geológico estrutural da zona urbana de Santa Cruz do Sul visando obter informação básica ao planejamento integrado**. Santa Cruz: UNISC, 20 p., 1996.

*Manuscrito Recebido em: 11 de abril de 2011
Revisado e Aceito em: 6 de setembro de 2011*