

Adriana Ahrendt

MOVIMENTOS DE MASSA GRAVITACIONAIS - PROPOSTA
DE UM SISTEMA DE PREVISÃO: APLICAÇÃO NA ÁREA
URBANA DE CAMPOS DO JORDÃO – SP.

Tese apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do Título de
Doutor em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos
2005

***Reconhecida, a geologia revela possibilidades;
não reconhecida, determina empenhos.***
(Edézio T. de Carvalho)

***À memória de meus amados pais,
Udo e Claudina, por toda a vivência e
ensinamentos proporcionados.***

AGRADECIMENTOS

Inúmeras foram as pessoas que, nos últimos seis anos, contribuíram para o desenvolvimento do trabalho ora apresentado. Dentre elas, gostaria de agradecer:

ao professor e amigo Lázaro Valentin Zuquette, pela orientação, amizade e ensinamentos oferecidos durante estes anos;

ao Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP por ter possibilitado a realização deste doutorado;

ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelas bolsas de estudos e auxílios financeiros concedidos, no Brasil e no exterior;

à Prefeitura Municipal de Campos do Jordão, à SABESP e à EMUHAB pelas informações e apoio logístico prestado durante os trabalhos de campo;

ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE pelos dados de pluviosidade cedidos;

ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT pelas informações fornecidas;

ao Departamento de Ciências da Terra e do Oceano da Universidade de British Columbia em Vancouver/CA, por ter possibilitado a realização do Doutorado *Sanduiche*, em especial ao Prof. Dr. Oldrich Hungr, pela orientação e ajuda prestada nesta fase dos trabalhos;

ao Dr. Richard Iverson e a Jonathan Godt do *United States Geological Survey* – USGS, pelas explicações, discussões e atenção oferecidas;

aos Professores Ward Wilson e Jonathan Fannin da Universidade de British Columbia, pelas informações e discussões proporcionadas;

aos colegas Scott e Jordan por terem proporcionado as visitas de campo realizadas no Canadá e também por todo apoio oferecido;

à todos os funcionários e técnicos do Departamento de Geotecnia, em especial ao Sr. Antônio, Oscar e Zé Luiz, pelo apoio de campo e laboratório e à Maristela, Neiva e Álvaro pelo apoio na secretaria;

à todos os colegas, professores e amigos do Departamento de Geotecnia, pela amizade, companheirismo e ensinamentos oferecidos durante todos esses anos, em especial a Janaína pelo auxílio de campo e discussões, e às amigas Ana Paula, Danieli e Sandrinha, por terem estado tão presentes em todas as fases deste trabalho;

à minha família, em especial, Klaus, Cris, Christopher, Nicholas, D. Margaret, Sr. Edmundo, Bárbara, André e Lucas pelo imenso amor, carinho e apoio oferecidos durante todos esses anos;

e, em especial, ao meu esposo e companheiro, Edmundo Talamini Neto, pelo amor, carinho, amizade e incentivo, presentes em cada momento, e que tornou possível a realização deste trabalho.

RESUMO

AHRENDT, A. (2005) *Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP*. 360 p. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O presente estudo consiste no desenvolvimento de um sistema de previsão de escorregamentos, baseado na quantificação da influencia das chuvas transientes na estabilidade de encostas, por intermédio da identificação dos mecanismos de ruptura e dos processos físicos envolvidos na infiltração e distribuição da água no solo. O estudo foi realizado em parte da área urbana da cidade de Campos do Jordão-SP, estado de São Paulo, onde tem ocorrido de movimentos de massa gravitacionais é bastante comum. A metodologia empregada baseia-se no conhecimento das características geológico-geotécnicas da área, acompanhada de trabalhos de campo e laboratoriais e da análise da relação entre a chuva e ocorrência dos movimentos de massa gravitacionais. Em uma primeira fase foram elaborados os documentos cartográficos básicos, como o mapa topográfico e carta de declividade, todos na escala 1:2.000. O trabalho de campo consistiu na identificação detalhada dos materiais inconsolidados e rochas, bem como na caracterização das feições de movimentos de massa gravitacionais já existentes na área, e elaboração do mapa de localização das feições. Paralelamente, foram obtidas amostras deformadas e indeformadas e realizados ensaios em laboratório. Este procedimento permitiu identificar oito diferentes classes de materiais inconsolidados distribuídos em dez unidades e, além disso, caracterizar os movimentos de massa gravitacionais encontrados como sendo escorregamentos do tipo translacional seguido de escoamento, com superfície de ruptura entre 0,5 e 2m de profundidade. Em uma segunda fase, foi realizada a caracterização da condutividade e difusividade hidráulica e velocidade de infiltração das classes de materiais inconsolidados, a partir de ensaios de infiltração *in situ* e análises matemáticas. Das duas primeiras fases do trabalho foi possível concluir que o mecanismo de ruptura consiste na diminuição continua da resistência ao cisalhamento dos materiais geológicos, através da geração de cargas hidráulicas oriundas da infiltração da água no solo. A terceira fase consistiu na aplicação e validação do sistema de previsão de escorregamentos proposto. Tal sistema baseia-se em uma solução analítica da equação de Richard's associada ao modelo de talude infinito. A aplicação do sistema permite calcular, para cenários pré-estabelecidos, a variação da carga hidráulica, antes, durante e após a ocorrência de seqüências de chuvas complexas, bem como a variação do fator de segurança da encosta ao longo do tempo e em profundidade. Para validação do sistema proposto

foram utilizados dados reais de escorregamentos e de chuvas ocorridas entre dezembro de 1999 e janeiro de 2000. Os resultados obtidos mostraram uma boa correlação com a real ocorrência dos escorregamentos, concluindo-se que a utilização do sistema de previsão proposto é viável, e que a sua aplicação pode ser realizada, também, em outras áreas, desde que obedecidas as suas premissas básicas, como tipo de mecanismo de ruptura e obtenção de parâmetros geológicos, geotécnicos e hidráulicos confiáveis.

Palavras-chaves: previsão, precipitação, infiltração, escorregamentos translacionais, Campos do Jordão.

ABSTRACT

AHRENDT, A. (2005). *Gravitational mass movements – proposal of a forecast system: application at the urban area of Campos do Jordão City – SP - Brazil*. 360 p. Ph.D. Thesis. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

The present study focus on the development of a landslides forecast system, based on the quantification of the effect of transient rainfall on slope stability through the identification of gravitational mass movements failure mechanisms and the physical processes involved in water infiltration and distribution into soil. This study was placed in part of the urban area of Campos de Jordão city, São Paulo State, Brazil, where gravitational mass movements are very common. The methodological procedures were based on the recognition of the geological and geotechnical characteristics of the area, together with field and laboratory work, as well as on the analysis of the relationship between rainfall data and gravitational mass movements. In a first stage the elaboration of the basic cartographic documents, such as topographical map and slope chart, at 1:2.000 scale, was carried out. The field work included a detailed identification of the rocks and unconsolidated materials, registering, describing and location of landslide features, as well as the elaboration of a landslides location map. Besides, laboratory tests were performed with disturbed and undisturbed samples. It allowed identifying of eight different unconsolidated material classes distributed on ten units, and also observing that translational landslides followed by flow-like debris movement, with failure surface depths varying from 0.5 to 2m, were the most common type of gravitational mass movements. In a second stage the hydraulic conductivity and diffusivity characterization of the unconsolidated materials has been done, through field infiltration tests and mathematical analysis. From de two first stages it was possible to conclude that failure mechanisms is related to the continuous decrease of soil shear strength due to pressure head increase from water infiltration into soil. The third stage focused the application of the landslides forecast system. This system is based on an analytical solution of Richard's equation accompanied by an infinite slope stability model. Its application allows evaluating, for specific scenarios, the variation of pressure head response within the soil, before, during and after transient rainfall, and the factor of safety variation with time and depth at any moment. Rainfall data from December (1999) and January (2000), which triggered many landslides, were the basis of the model validation. The results of the forecast system application showed a good correlation with real landslide occurrence, and it was possible to conclude that the forecast system proposed is feasible and that it can be applied to different places and

over broad regions, since some conditions, such as failure mechanisms and utilization of reliable geological, geotechnical and hydrologic data are obeyed.

Key words: forecast, rainfall, infiltration, translational landslides, Campos do Jordão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Regiões sujeitas a um ou mais tipos de movimentos de massa gravitacionais no estado de São Paulo (modificado de ZUQUETTE et al., 1996)..2	
Figura 2.1: Esquema ilustrativo de movimento de massa do tipo queda e tombamento, segundo a classificação de Hutchinson (1988).12	12
Figura 2.2: Ilustração de escorregamentos rotacionais em diferentes tipos de materiais (adaptado de VARNES, 1958)13	13
Figura 2.3: Esquema ilustrativo de alguns tipos de escorregamentos translacionais. (a) em detritos e (b) rochas (adaptado de HUTCHINSON, 1988)15	15
Figura 2.4: Desenho ilustrativo das várias formas de movimentação e distribuição da água dentro de uma encosta.....16	16
Figura 2.5: Mecanismo de ruptura por saturação pela base (ENOKI et al., 1999).....17	17
Figura 2.6: Mecanismo de ruptura por saturação pelo topo.....18	18
Figura 2.7: Representação esquemática da geometria de alguns tipos de escoamento20	20
Figura 2.8: Diferentes estágios de movimento de encostas.....24	24
Figura 2.9: Sistema simplificado de fluxo de água regional em materiais uniformemente permeáveis (adaptado de PATTON & HENDRON, 1974 apud LACERDA et al., 1997).....37	37
Figura 2.10: Representação esquemática das linhas de fluxo de um talude. a) fluxo de água considerado paralelamente ao nível de água subterrânea; b) fluxo típico em taludes naturais. (adaptado de HUNT, 1986)37	37
Figura 2.11: Modelo ilustrativo das forças atuantes sobre talude infinito e que são consideradas nos cálculos (adaptado de MOSTYN & SMALL, 1987).....39	39
Figura 2.12: Modelos de ruptura em solos com granulometria heterogênea. (Modificado de WEST et al., 1991).....42	42
Figura 2.13: exemplo de mapa resultante da aplicação do modelo SHALSTAB. A legenda indicia as classes de instabilidade obtidas a partir do modelo. (adaptado de Fernandes et al., 2001)50	50
Figura 2.14: Esquema ilustrativo do modelo topográfico considerado pelo modelo DSLAM. (WU e SIDLE, 1995)51	51
Figura 2.15: Mapas de FS resultantes da aplicação do modelo dSLAM. A- Distribuição antes da chuva e B- Distribuição após a chuva (WU e SIDLE, 1995).....53	53
Figura 2.16: Gráfico comparativo entre três envoltórias obtidas a partir de correlações entre chuvas e escorregamentos (KEEFER et al., 1987).55	55
Figura 2.17: Envoltória para escorregamentos induzidos obtida por TATIZANA et al. (1987)para 4 dias de chuva acumulada.56	56

Figura 2.18: Modelo de distribuição da água no solo em relação à profundidade (BODMAN e COLEMAN, apud EPA, 1998).....	60
Figura 2.19: Comportamento da frente de saturação com o tempo para três fases. (Adaptado de EPA, 1998)	61
Figura 2.20: Perfis de umidade resultantes de uma seqüência de evento. (a) sete dias após o 1º evento chuvoso, (b) oito dias após o 1º e um dia após o 2º ; (c) 12 dias após o 1º e cinco dias após o 2º ;(d) 12 dias após o 1º .(adptado de MYAZAKI, 1993).....	62
Figura 2.21.: Comportamento de infiltração da água no solo para: a) Solo uniforme, b) Camada porosa na superfície e c) Camada argilosa ou crosta na superfície. (Adaptado de ASCE, 1996).....	68
Figura 2.22: Perfis de umidade obtidos para duas situações de umidade inicial diferentes. a) umidade inicial de 43,9% e b) umidade inicial de 23,5%. (adaptado de FREYBERG et al., 1980).....	70
Figura 2.23: Perfis de umidade para diferentes situações de declividade. (adaptado de Miyazaki, 1993).....	71
Figura 2.24: Modelo esquemático de uma curva de retenção (FREDLUND et al., 1994)	74
Figura 2.25: Modelo esquemático do equipamento utilizado no ensaio de infiltração de duplo cilindro	79
Figura 2.26: Solução gráfica do método de transformação de Boltzmann.....	84
Figura 2.27: Exemplo de cálculo de $d\phi_m/d\theta$ a partir da curva de retenção.....	85
Figura 2.28: esquema ilustrativo da câmara de pressão.	86
Figura 2.29: Funil de placa porosa. a- saturação do solo, b- aplicação da tensão. (Libardi, 1995).....	86
Figura 2.30: Representação dos tipos de fluxo entre a amostra e o papel de filtro. (modificado de MARINHO, 1995).....	87
Figura 2.31 : Modelo esquemático de tensiômetro (FREDLUND, 1989).....	88
Figura 3.1: Fluxograma de etapas desenvolvidas no trabalho.....	91
Figura 3.2: Articulação das folhas topográficas utilizadas na composição do mapa topográfico da área de estudo (Fonte SABESP).	93
Figura 3.3: Equipamento utilizado para ensaio de infiltração a carga constante. (a) Reservatório graduado para medida do volume conectado ao infiltrômetro e (b) Detalhe do infiltrômetro de cilindro duplo	101
Figura 3.4: Disposição dos furos de coleta de amostra (a) e cobertura de lona para diminuição da evapotranspiração (b).....	103

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

