LUIS EDMUNDO PRADO DE CAMPOS

INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NA ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS
EM SOLOS RESIDUAIS

TESE APRESENTADA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA PUC/RJ COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA CIVIL: GEOTECNIA.

ORIENTADORES:

SÉRGIO FONTOURA

LEANDRO COSTA FILHO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO

RIO DE JANEIRO, FEVEREIRO DE 1984.

A meus pais

AGRADECIMENTOS

- A orientação dos Professores Sergio Fontoura e Leandro Costa Filho.
- Ao Professor Morgenstern, Universidade de Alberta - Canadá, pela contribuição na fase inicial deste trabalho, quando em sua vinda ao Rio de Janeiro.
- Ao Professor Fredlund, Universidade de Saskatchewan - Canadá, pela atenção e artigos recebidos.
- Ao Agrônomo José Lopes pela realização dos ensaios de sucção no Laboratório de Física de Solos da EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Ao Professor Franklin Antunes pelo constante apoio e principalmente pelo exemplo de pessoa.
- Aos colegas Carlos Latorre, Dania Schwartz, Edickson Paes, Fernando Pasquel, Fernando Schnaid, Jorge Oliveira, Moacir Souza, Regina Mendes, Roberto Lorentz e Wilfredo Rodrigues, cuja amizade e apoio constituíram uma vivência inestimável.
- A colega e amiga Maria de Fatima Falcão, pelo incentivo e contribuições prestadas neste trabalho.
- A todos os colegas da pós-graduação pela amizade e convivência durante este período.
- Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil desta universidade pela atenção recebida.

- Aos colegas Cid Gesteira, Erundino Presa, Geraldo Sobral, Hernani Sobral, Luiz Anibal e Moacyr Schwab, da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, pelo constante incentivo.
- Aos meus irmãos pelo constante apoio e incentivo.

RESUMO

A avaliação da estabilidade de taludes naturais em solos residuais envolve, em muitos casos, um considerável grau de incerteza devido a dificuldade em estimar ou conhecer as pressões neutras atuantes no talude. Muitas das incertezas consiste na determinação dos parâmetros de resistência para os solos envolvidos.

Este trabalho consiste na estimativa das pressões neutras através de retro-análises de casos históricos brasileiros. Para isto, estudou-se o mecanismo de instabilização que causa a rotura do talude apenas pela perda total ou parcial da sucção, causada pela infiltração da água de chuva.

Apresenta-se um breve relato sobre as metodologias de ensaios, bem como parâmetros de resistência ao cisalhamento em solos residuais. É feito um estudo sobre a sucção em solos, dando ênfase a relação sucção - umidade.

Para realização das retro-análises foram escolhidos 7 casos históricos, devido a existência de informações sobre superfícies de rotura e parâmetros de resistência de boa qualidade. As retro-análises foram realizadas utilizando-se a envoltória de resistência proposta por Fredlund et alii (1978) para solos parcialmente saturados e a envoltória convencional para solos saturados. O método de Bishop simplificado é empregado

para superfície de deslizamento circular, o método de Janbu simplificado para superfície não circular e o método teórico de talude infinito para superfície de rotura paralela a superfície do terreno.

Em 4 dos casos históricos, encontrou-se a pressão neutra média mobilizada negativa, mostrando que a instabilidade pode estar associada apenas a redução da sucção. Em outros 2 casos, encontrou-se a pressão neutra média ligeiramente positiva e nos 3 últimos casos analisados, positiva.

No estudo, é realizada uma investigação do efeito da distribuição da pressão neutra com a profundidade na análise de estabilidade. Os resultados não alteram a principal conclusão do estudo, isto é, a rotura nestes casos históricos pode estar associada a redução da sucção ou a baixos valores da pressão neutra.

ABSIRACT

The evaluation of stability of natural slopes in residual soils involves in many cases a considerable degree of uncertainty due to the difficulty of estimating or knowing the pore pressure operating in the slope. Much less uncertainty however exists in determining the effective strength parameters for the soils involved.

This work deals with the evaluation of pore pressssures through back-analysis of brazilian case histories. In order to do that it was assumed that slope failures were due to the total or partial loss of suction that are caused by the infiltration of rain water.

A report on the tests conducted in the laboratory is presented as weel as a survey on shear strength parameters of residual soils. A study on suction in soils is also presented with emphasis in the relationship moisture-suction.

Seven case histories were chosen in order to carry out the back-analysis. In these cases there was available and reliable information on the geometry of the failure surface and shear strength parameters.

The strength envelope proposed by Fredlund et all (1978) for partially saturated soils and the conventional strength envelope for saturated soils were used in the analysis. The simplified Bishop's method was used for circular failure surfaces

while Janbu's simplified method was used for non-circular surfaces and the theoretical infinite slope method was used for failure surfaces parallel to the slope surface.

In four of the case histories analysed, negative mobilized pore pressures were found showing that the instability could be associated only to the reduction in suction. In two other cases the average pore pressure were slightly positive while in the last three cases, positive.

A study has been carried out to investigate the possible effect of pore pressure distribution with depth on the stability analysis. The results did not alter the main conclusion of the study, i. e., at failure in these case histories pore suctions or low pore water pressures were generally operating.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE FOTOS.....	xvi
 1 - INTRODUÇÃO.....	 1
1.1 - Generalidades.....	1
1.2 - Escopo do trabalho.....	3
 2 - MECANISMO DE INSTABILIZAÇÃO.....	 5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Mecanismo de instabilização.....	8
2.3 - Determinação da chuva crítica.....	11
2.4 - Influência da vegetação na estabilidade das encosta.....	14
 3 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS RESIDUAIS.....	 17
3.1 - Introdução.....	17
3.2 - Resistência ao cisalhamento.....	18
3.3 - Metodologia de ensaios de resistência.....	22
3.4 - Envoltória e parâmetros de resistência.....	24
3.5 - Comentários finais.....	28
 4 - SUCCÃO EM SOLOS RESIDUAIS.....	 41
4.1 - Introdução.....	41

4.2 - Considerações gerais sobre sucção.....	42
4.3 - Relação teor de umidade - sucção.....	46
4.3.1 - Fatores que influenciam a curva característica .	48
4.3.2 - Curvas características de diversos solos.....	52
4.4 - Ensaio para determinação da sucção.....	53
4.4.1 - Medidas de sucção no laboratório.....	55
4.4.2 - Medidas de sucção no campo.....	56
4.5 - Ensaio de sucção em um solo residual de gnaíse....	59
4.5.1 - Aspectos geológicos e geotécnicos do solo.....	59
4.5.2 - Amostragem e moldagem das amostras.....	61
4.5.3 - Aparelhagem utilizada.....	62
4.5.4 - Procedimento do ensaio.....	64
4.5.5 - Resultados e discussão.....	65
5 - RETRO-ANÁLISES DE ESCORREGAMENTOS EM SOLOS RESIDUAIS....	89
5.1 - Generalidades.....	89
5.2 - Esquema das retro-análises.....	89
5.3 - Escorregamento do Catingueiro.....	91
5.3.1 - Descrição geral.....	99
5.3.2 - Retro-análise e discussão.....	99
5.4 - Escorregamento da Estrada do Jequiá.....	102
5.4.1 - Descrição geral.....	105
5.4.2 - Retro-análise e discussão.....	105
5.5 - Escorregamento da Emboque do Túnel TA-6.....	106
5.5.1 - Descrição geral.....	107
5.5.2 - Retro-análise e discussão.....	107
5.6 - Escorregamento do Julião.....	110
5.6.1 - Descrição geral.....	110

5.6.2 - Retro-análise e discussão.....	111
5.7 - Escorregamento do Viratáboa.....	113
5.7.1 - Descrição geral.....	113
5.7.2 - Retro-análise e discussão.....	114
5.8 - Escorregamento de Monte Serrat.....	118
5.8.1 Descrição geral.....	118
5.8.2 Retro-análise e discussão.....	120
5.9 Escorregamento da Caneleira.....	121
5.9.1 Descrição geral.....	121
5.9.2 Retro-análise e discussão.....	123
5.10 Resumo da retro-análises.....	124
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	144
6.1 Conclusões.....	144
6.2 Sugestões para futuras pesquisas.....	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
BIBIOLOGRAFIA.....	157
ANEXO I - APARELHO DE PLACA DE PRESSÃO MODIFICADO.....	163
ANEXO II - LISTAGEM DOS PROGRAMAS: BISHOP E JANBU.....	166

LISTA DE SÍMBOLOS

a	: coeficiente da equação que correlaciona pressão neutra com a profundidade.
b	: coeficiente da equação que correlaciona pressão neutra com a profundidade.
B	: largura da fatia.
C	: coesão total.
C'	: coesão efetiva.
C _{nec}	: coesão necessária (para $F = 1$ e $U_w = 0$).
e	: índice de vazios.
F	: fator de segurança.
h	: profundidade, medida a partir da superfície do terreno.
H	: altura da fatia.
i	: inclinação da encosta.
l	: comprimento da base da fatia.
R _u	: coeficiente de pressão neutra.
S _r	: grau de saturação.
S _{rnat}	: grau de saturação na umidade natural.
U _a	: pressão neutra do ar.
(U _a - U _w)	: sucção.
U _{máximo}	: pressão neutra máxima da água.
U _{médio}	: pressão neutra média da água.
U _w	: pressão neutra da água.

w	: teor de umidade.
w_{nat}	: teor de umidade natural.
α	: ângulo entre a base da fatia e a horizontal.
γ	: peso específico do solo.
γ_s	: peso específico do solo seco.
θ	: ângulo de atrito total.
θ'	: ângulo de atrito efetivo.
θ_b	: ângulo que incrementa a resistência ao cisalhamento com a sucção.
ψ	: potencial total.
ψ_g	: potencial gravitacional.
ψ_m	: potencial mátrico.
ψ_o	: potencial osmótico.
ψ_a	: potencial neumático.
ψ_p	: potencial de consolidação.
x	: parâmetro de sucção de Bishop

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zonas do perfil de infiltração.....	16
Figura 2.2 - Balanço hídrico em encostas florestadas.....	16
Figura 3.1 - Aparelho para ensaio de cisalhamento direto com sucção controlada.....	38
Figura 3.2 - Célula triaxial modificada para ensaios em solos não saturados.....	38
Figura 3.3 - Representação gráfica da equação de resistência para solos não saturados.....	39
Figura 3.4 - Envoltória de resistência tridimensional usando variáveis de tensão ($\sigma - U_a$) e ($U_a - U_w$)....	39
Figura 3.5 - Envoltória de resistência de um solo não saturado olhando paralelo ao eixo ($U_a - U_w$)..	40
Figura 3.6 - Envoltória de resistência para amostras saturadas de granito completamente decomposto..	40
Figura 4.1 - Água submetida a capilaridade e adsorção em um solo não saturado, produzindo a sucção mátrica.	77
Figura 4.2 - Esquema de uma seção de solo não saturado.....	77
Figura 4.3 - Modelo do comportamento da relação umidade - sucção.....	78
Figura 4.4 - Fenômeno da histerese na curva de sucção.....	78
Figura 4.5 - Simulação dos poros do solo para explicação da histerese da relação umidade - sucção.....	79

Figura 4.6 - Influência da composição granulométrica na relação umidade - sucção.....	79
Figura 4.7 - Influência da mineralogia na relação umidade - sucção.....	80
Figura 4.8 - Relação entre a sucção e a geometria dos poros.	80
Figura 4.9 - Curvas características de diversos solos encontrados na literatura internacional.....	81
Figura 4.10- Curvas características de alguns solos superficiais brasileiro.....	82
Figura 4.11- Curvas características de um solo residual de gnaissse.....	83
Figura 4.12- Influência da vegetação na distribuição de sucção no perfil do solo.....	84
Figura 4.13- Seção transversal, distribuição granulométrica e medidas de sucção no local 1.....	85
Figura 4.14- Seção transversal, distribuição granulométrica e medidas de sucção no local 2.....	86
Figura 4.15- Seção transversal, distribuição granulométrica e medidas de sucção no local 3.....	87
Figura 4.16- Esquema indicando o papel da membrana semipermeável ou pedra cerâmica.....	88
Figura 5.1 - Esquema da distribuição da sucção versus profundidade.....	136
Figura 5.2 - Forças que atuam numa fatia em um talude infinito.....	136
Figura 5.3 - Relação entre a coesão efetiva e a pressão neutra.....	137

Figura 5.4 - Seção transversal do escorregamento do Catin- gueiro.....	138
Figura 5.5 - Seção transversal do escorregamento da Estrada do Jequiá.....	139
Figura 5.6 - Seção transversal do escorregamento do Julião..	140
Figura 5.7 - Seção transversal do escorregamento do Viratá- boa.....	141
Figura 5.8 - Seção transversal do escorregamento do Monte Serrat.....	142
Figura 5.9 - Seção transversal do escorregamento da Canelei- ra.....	143
Figura A.1 - Aparelho de placa de pressão modificado.....	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros de resistência de alguns solos residuais jovens brasileiros.....	35
Tabela 3.2 - Parâmetros de resistência residual de alguns solos residuais jovens brasileiros.....	37
Tabela 3.3 - Valores de σ_b para solos residuais de Hong Hong	37
Tabela 4.1 - Técnicas de controle de sucção.....	67
Tabela 4.2 - Técnicas de medidas de sucção.....	68
Tabela 4.3 - Característica dos solos apresentados na figura 4.11.....	69
Tabela 4.4 - Análise mineralógica para a profundidade de 0,80 metros.....	70
Tabela 4.5 - Dados das amostras ensaiadas.....	71
Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios realizados.....	72
Tabela 5.1 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Catingueiro (após corte).....	125
Tabela 5.2 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Catingueiro (1973).....	126

Tabela 5.3 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento da Estrada do Jequiá.....	127
Tabela 5.4 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Julião.....	128
Tabela 5.5 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Viratáboa (após corte).....	129
Tabela 5.6 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Viratáboa (1973).....	130
Tabela 5.7 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Monte Serrat (1928).....	131
Tabela 5.8 - Valores do coeficiente "a", da pressão neutra média e máxima para diversas variações da pressão neutra com a profundidade para o escorregamento do Monte Serrat (1956).....	132
Tabela 5.9 - Resumo das análises dos escorregamentos estudadas neste trabalho.....	133

LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Aparelho de membrana de pressão.....	73
Foto 2 - Aparelho de placa e membrana de pressão.....	74
Foto 3 - Aparelho triaxial utilizado para ensaio de sucção..	75
Foto 4 - Ensaio de sucção.....	76