

ESTABILIDADE DE TALUDES DE SOLOS RESIDUAIS  
DE GRANITO E DE GNAISSE

José Eduardo Moreira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JA  
NEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA (M.Sc.)

Aprovada por:

Willy A. Baro  
Presidente

Jays de Smedes

Fernando Bannister

Fernando Olavo Faria

RIO DE JANEIRO  
ESTADO DA GUANABARA - BRASIL  
JANEIRO DE 1974

A memória de minha avó Nívea  
A meus pais  
A minha esposa

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Fernando E. Barata, pelos ensinamentos básicos de Mecânica dos Solos e pelo constante estímulo que nos tem transmitido desde então.

Ao Professor Jaques de Medina, pela dedicação ao setor de Mecânica dos Solos da COPPE.

Ao Professor Willy A. Lacerda, pela orientação neste trabalho e pelo espírito de amizade e coleguismo dentro e fora do âmbito escolar.

A Engenheira Anna Margarida Maria da C. Couto e Fonseca, diretora da Divisão de Estudos Especiais do Instituto de Geotécnica - Sursan -, pela incansável ajuda no fornecimento de dados utilizados na segunda parte deste trabalho.

Aos colegas Eduardo M. Massa, Homero V. Menezes Cortes e Narciso A. F. Lopes, cujas discussões técnicas, muitas vezes ásperas, tem contribuido para o nosso aprimoramento nos conceitos e na prática da Mecânica dos Solos.

Aos eficientes colaboradores, os laboratoristas Alvaro D. Viana e Antonio Jorge D. Viana, e o desenhista Plinio Martins de Oliveira, pela ajuda na realização dos ensaios e desenhos.

Ao Conselho Nacional de Pesquisas, pelo apoio financeiro prestado.

RESUMO

Na primeira parte é apresentado uma metodologia para análise de taludes de solos residuais de granito e gnaisse, dando ênfase às heterogeneidades - quanto à estratigrafia, à resistência ao cisalhamento, à permeabilidade e à infiltração - que governam as superfícies potenciais de deslizamento. O ponto básico é a compreensão do perfil de intemperização e a evolução geológica do talude. A hidrologia subterrânea, com e sem caminhos preferenciais de percolação e infiltração, e os cuidados especiais nas investigações geológico-geotécnicas de taludes são mencionados. Métodos de projetos a partir de um enfoque baseado na teoria da decisão estatística são apresentados.

Na segunda parte é apresentado o deslizamento de um talus. A resistência ao cisalhamento mobilizada "in-situ" comparada com a obtida em laboratório confirma a necessidade de se conhecer o mecanismo próprio do deslizamento. Pressões neutras elevadas desenvolveram no talude, devido a configuração do terreno possibilitando a formação de um lençol artesiano e devido infiltração preferencial no contato talus-maciço rochoso.

ABSTRACT

Part One is concerned with a methodology for the study of granitic - gnaissic residual slopes with an emphasis on its heterogeneities - with respect to stratigraphy, shear strength, permeability, infiltration - which ultimately govern the potential sliding surfaces. The basic point is the understanding of the weathering profile and the geological history of the slope. The subsurface hidrology is discussed in regard to the geotechnical and geological investigations. Design methods based on the statistical decision theory are presented.

In Part Two a case history of a landslide on talus material is presented. The "in situ" shear strength, compared to that obtained in laboratory, confirms the need of a thorough knowledge of the sliding mechanism. Owing to the special topographic configuration, high pore pressure developed, by artesianism, owing to the preferred infiltration along the rock - talus contact.

I N D I C EPRIMEIRA PARTEESTABILIDADE DE TALUDES DE SOLOS RESIDUAIS DE GRANITO E GNAISSE

Pág.

CAP. I - <u>ASPECTOS GERAIS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS</u> .....	2
CAP. II - <u>SOLOS RESIDUAIS; PERFIL DE INTEMPERIZAÇÃO</u>	
2.1 - INTRODUÇÃO: SOLOS SEDIMENTARES E SOLOS RESIDUAIS.	5
2.2 - PERFIL COMPLETO DE INTEMPERIZAÇÃO .....	7
2.3 - CONCLUSÕES PRELIMINARES REFERENTES AO PERFIL DE INTEMPERIZAÇÃO.....	9
2.4 - TÁLUS: FORMAÇÃO E IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS.....	11
CAP. III - <u>TIPOS DE DESLIZAMENTOS</u>	
3.1 - INTRODUÇÃO .....	15
3.2 - ZONA DE SOLO RESIDUAL MADURO .....	16
3.3 - ZONA DE SOLO RESIDUAL JOVEM .....	16
3.4 - ZONA DE ROCHA MUITO ALTERADA .....	19
3.5 - ZONA DE ROCHA POUCO ALTERADA E SÁ .....	19
CAP. IV - <u>INFLUÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES NA ESTABILIDADE DE TALUDES</u>	
4.1 - INTRODUÇÃO .....	21

4.2 - RELAÇÕES ENTRE PRECIPITAÇÃO E GRAU DE SATURAÇÃO EM TERRENOS HOMOGÊNEOS QUANTO A INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO .....	22
4.3 - HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA EM DEPÓSITOS ERRÁTICOS QUANTO A INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO .....	23
4.4 - INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DA PERCOLAÇÃO NA ESTABILI- DADE DOS TALUDES .....	27
<b>CAP. V - <u>EXPLORAÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS</u></b>	
5.1 - INTRODUÇÃO .....	34
5.2 - SONDAGENS	
5.2.1 - Sondagens de Reconhecimento.....	37
5.2.2 - Sondagens Especiais e Poços de Investigação .....	39
5.3 - OBSERVAÇÕES DA HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA .....	40
5.4 - ENSAIOS ESPECIAIS DE LABORATÓRIO	
5.4.1 - Ensaios de Resistência ao Cisalhamento.	43
5.4.2 - Ensaios de Permeabilidade .....	47
5.5 - INCLINÔMETROS .....	47
<b>CAP. VI - <u>CONCLUSÕES</u></b>	
6.1 - QUANTO AO SOLO E TIPO DE RUTURA .....	50
6.2 - QUANTO A INTERPRETAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA ..	51
6.3 - QUANTO A MÉTODO DE PROJETO .....	53
 <b><u>SEGUNDA PARTE</u></b>	
 <b><u>ANÁLISE DE DESLIZAMENTO DE UM TÁLUS</u></b>	
1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO DESLIZAMENTO: LOCALIZA- ÇÃO; GEOLOGIA E HISTÓRICO .....	57

2 -	CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA ÁREA DO DESLIZAMENTO	
2.1 -	<u>Perfil Geotécnico</u> .....	58
2.2 -	<u>Propriedades Geotécnicas dos Solos</u> .....	61
2.2.1 -	Introdução .....	61
2.2.2 -	Propriedades Geotécnicas do Tálus....	63
2.2.3 -	Propriedades Geotécnicas do Solo Residual .....	64
2.3 -	<u>Hidrologia Sub-superficial</u> .....	68
3 -	ANÁLISE DO DESLIZAMENTO .....	72
4 -	CONCLUSÕES .....	77

ANEXOS

A -	SUGESTÕES PARA PESQUISA .....	78
B -	BIBLIOGRAFIA .....	80

1ª PARTE

ESTABILIDADE DE TALUDES DE SOLOS RESIDUAIS DE GRANITO E GNAISSE

## 1. ASPECTOS GERAIS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES NATURAIS

"... I then remembered the advice which Terzaghi gave me, namely, to be extremely wary of drawing conclusions on the basis of experience from a limited area and always to consider the complete spectrum of geologically possible conditions before making any generalization."

L. Bjerrum

A análise de estabilidade de taludes consiste na comparação, ao longo de superfícies potenciais de deslizamento, dos esforços resistentes com os esforços cisalhantes.

Os esforços resistentes, ou seja, a resistência ao cisalhamento dos solos, é obtida pela equação de Mohr-Coulomb. Nos taludes estáveis, ao longo de qualquer superfície possível de ruptura, somente uma parcela desta resistência é mobilizada:

$$\sum_{j \in R} \tau_j l_j = \sum_{j \in R} \left[ \frac{c_j}{F} + (\sigma_{nj} - u_j) \frac{\tan \phi_j}{F} \right] l_j$$

em que:

$\tau_j$  = tensão cisalhante ao longo da superfície potencial de ruptura

$c_j$  = coesão

$\phi_j$  = ângulo de atrito

$\left\{ \begin{array}{l} \text{em termo de pressões efetivas} \\ \text{em termo de pressões efetivas} \end{array} \right.$

$\sigma_{nj}$  = tensão normal ao longo da superfície potencial de rutura

$F$  = fator de segurança à rutura do talude

$\sum_{jri}$  = somatório em relação a  $j$ , ao longo da superfície potencial de rutura  $r_i$

Os parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , e, em alguns casos  $u$ , são obtidos em laboratório. A variável  $u$  nos casos de análise a longo termo é obtida através do traçado da rede de fluxo do talude. As variáveis  $\gamma$  e  $\sigma_n$ , podem ser obtidas através dos inúmeros métodos existentes para a análise de estabilidade. (3; 25; 7; etc...)

Esta simplicidade na análise de estabilidade de taludes, exposta acima, é entretanto aparente em se tratando de taludes naturais, visto que:

I - Poucos taludes são homogêneos, sendo difícil, mesmo com uma extensa investigação geotécnica, conhecer as reais condições do subsolo, principalmente com referência às zonas de fraqueza e aos caminhos preferenciais de infiltração e percolação.

II - Inúmeras análises de ruturas ocorridas em taludes, tem indicado que, para alguns solos, a resistência ao cisalhamento obtida em laboratório é bem distinta da mobilizada no campo (39). O tamanho não representativo da amostra ensaiada (16); o tempo de rutura do ensaio em laboratório (4) - comportamento reológico do solo-, e a não consideração do mecanismo próprio do deslizamento - rutura progressiva, por exemplo (38,5)-, são algumas das causas destas discrepâncias entre resistência ao cisalhamento de campo e de laboratório.

Tem-se a considerar também, quanto aos parâmetros

de resistência, a variação de c' e u com o tempo, devido às precipitações pluviométricas. Esta avaliação nem sempre é possível ser obtida quantitativamente.

III - A história do talude, nem sempre fácil ou mesmo possível de ser conhecida, deve ser considerada na análise de estabilidade, pois a resistência do cisalhamento realmente mobilizada no campo depende de deslocamentos ocorridos no talude (13).

Segundo Peck (27) "... if old slide abound, it is quite likely that even minor construction operation will lead to sliding".

Neste trabalho, devido a extensão e complexidade do tema, não abordamos todos os tipos geológicos de taludes. Nos restringimos apenas aos taludes naturais de solos residuais de granito e gneisse e aos depósitos de tálus, em clima tropical.

2. SOLOS RESIDUAIS; PERFIL DE INTEMPERIZAÇÃO

" O estudo dos solos residuais requer uma atitude muito mais geológica do que normalmente se exige em Mecânica dos Solos"

M. Vargas

## 2.1 INTRODUÇÃO: SOLOS SEDIMENTARES E SOLOS RESIDUAIS

Sob o ponto de vista geológico de formação, os solos encontrados na natureza podem ser reunidos em dois grupos / principais: solos residuais e solos sedimentares.

Devido aos distintos processos geológicos na formação destes solos, as propriedades geotécnicas dos mesmos são bem diferentes, mesmo possuindo textura e composição mineralógica semelhantes. Isto devido, principalmente, à existência de estrutura e macroestrutura diferentes, responsáveis principais pelo seu comportamento geotécnico.

Nos solos sedimentares, as variáveis principais relativas às propriedades de engenharia são: agente de transporte , ambiente de deposição, máxima sobrecarga geológica, transforma -

ções físicas, químicas e físico-químicas após a sua deposição. É interessante observar que os agentes de transporte e de deposição agem como um classificador natural das partículas dos solos, e, que, este processo de formação leva a pequenas variações no sentido horizontal e variações no sentido vertical, predominantemente devido à diferença de sobrecarga. Deste modo, para um mesmo depósito, a variável profundidade é um parâmetro relevante à caracterização geotécnica de uma amostra de solo.

Nos solos residuais, a variação errática do grau de intemperismo, devido a profundidade e a estrutura da rocha de origem - diaclases, fissuras, diques etc... - conduz a variações nas propriedades geotécnicas do solo, a pequenas distâncias, tanto na direção horizontal como na vertical.

Num dado local, ao longo do perfil do solo, pode-se distinguir zonas com diferentes graus de intemperização, portanto com diferentes propriedades, as quais são responsáveis pelo comportamento geotécnico da massa do solo. Verifica-se portanto, que a simples variável profundidade é insuficiente para a caracterização de uma amostra de solo de um terreno residual (31). É necessário especificar a zona a que a mesma pertence, além de se conhecer o próprio depósito: sequência e propriedades de cada camada estratigráfica (horizonte de intemperização).

Como ilustração podemos citar que o índice de vazios, um dos parâmetros classificatórios dos solos, nos solos sedimentares é função da sobrecarga atuante (e/ou máxima atuante) e nos solos residuais é função do grau de intemperismo.

A compreensão do perfil de um solo residual é o pon-

to básico no estudo da estabilidade destes taludes, desde a fase preliminar das investigações geotécnicas à análise da estabilidade e à análise da eficiência dos métodos de estabilização adotados.

Portanto, começaremos pela descrição de um perfil completo de intemperização de um terreno residual de granito e gnaisse.\*

## 2.2                   PERFIL COMPLETO DE INTEMPERIZAÇÃO

O perfil completo de intemperização de um granito ou gnaisse apresenta de um modo geral tres zonas principais: solo residual (zona I), rocha alterada (zona II) e rocha sã. (46, 2, 9)

I - Solo Residual - Na zona de solo residual distinguem-se duas zonas. Uma camada superior, solo residual maduro (zona IA), mais antiga e em elevado estado de intemperização, com o solo um tanto "personificado" não apresentando vestígios da rocha de origem. É constituída por um material argiloso (argila siltosa, silte argiloso), de permeabilidade baixa e algumas vezes possuindo coesão verdadeira entre os grãos, devido à cimentação natural, ocasionada pelos produtos de intemperização dos feldspatos e mica.

\* Daqui por diante sempre que mencionarmos solos residuais, estaremos implicitamente nos referindo a solos residuais de granito ou gnaisse, em clima tropical.

Esta zona se desenvolve em climas caracterizados por alternâncias de estações secas e úmidas. Segundo Vargas (50) "é uma camada de solo muito homogênea de 3 a 10 metros de espessura, em média, não saturado, com estrutura instável, isto é, capaz de entrar em colapso quando saturado".

Abaixo desta camada, há uma zona de solo, com grau de intemperização menor, mantendo ainda as estruturas - diâclases, plano de xistosidade etc... - da rocha de origem, denominada solo residual jovem (zona IB). Esta camada é constituída por material mais grosseiro (areia siltosa, silte arenoso etc), de permeabilidade superior à da camada acima. Estas estruturas herdadas da rocha de origem levam a massa de solo a um comportamento anisotrópico / quanto a resistência ao cisalhamento e a permeabilidade.

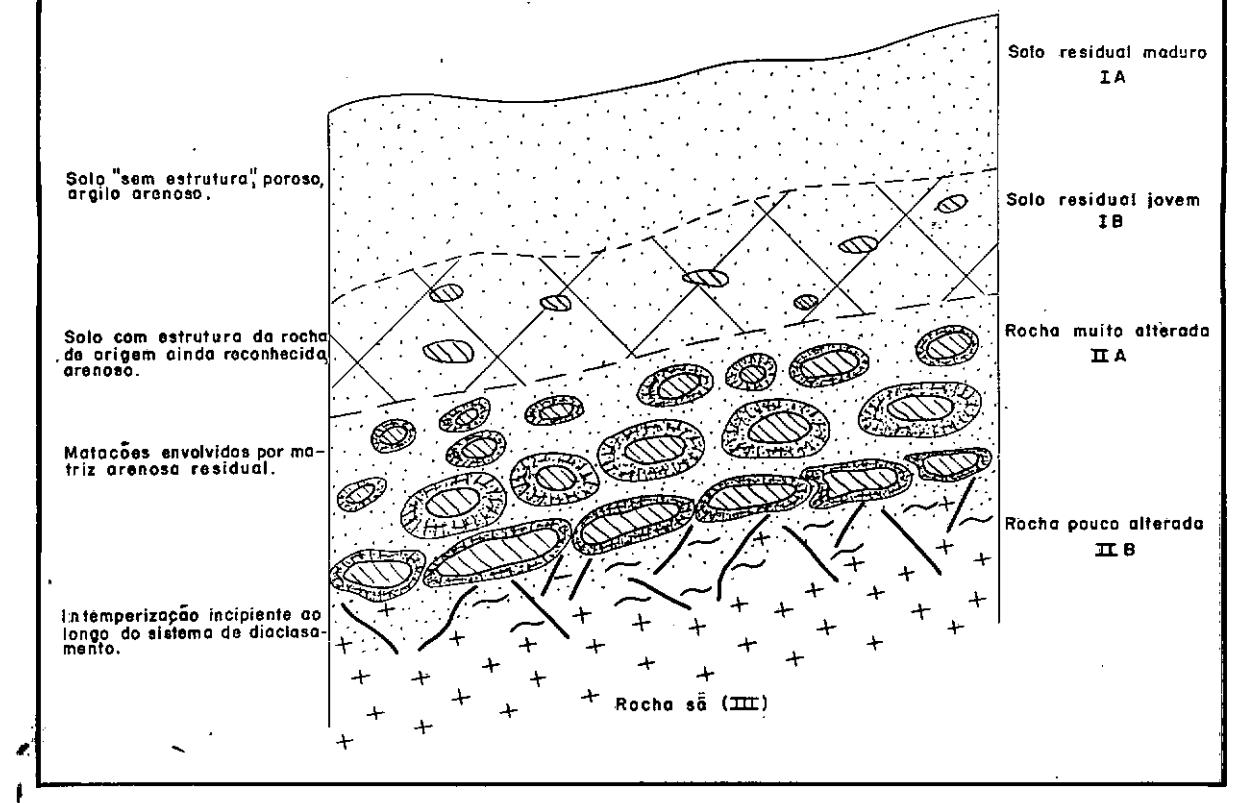
II - Rocha Alterada - Na zona de rocha alterada, podemos subdividir, embora com limites não bem definidos, em uma zona superior de rocha muito alterada e outra inferior de rocha pouco alterada.

A zona de rocha muito alterada caracteriza-se pela existência de blocos e matações, envolvidos por material granular (areia média e grossa, predominantemente). A formação desta configuração é devido ao intemperismo começar a se desenvolver mais rapidamente ao longo do sistema de diaclasamento da rocha (46, 36, 18, 20).

A zona de rocha pouco alterada, logo abaixo, distingui-se da rocha só pelo início de intemperização dos feldspatos e micas, apenas ao longo das diâclases.

Na figura abaixo é apresentado um esquema típico, completo, do perfil de intemperização de um terreno residual. Encontra-se, com frequência, perfis de intemperização com a ausência de uma ou mais camadas.

Fig. 1 - Perfil completo de Intemperização



## 2.3

### CONCLUSÕES PRELIMINARES REFERENTES AO PERfil DE INTEMPERISMO

Da descrição qualitativa do perfil de solo residual acima apresentada, é possível tirarmos, desde já, algumas conclusões preliminares referentes a estabilidade de taludes destes solos:

I - A sequência de camadas de baixa permeabilidade (IA), e de média a alta permeabilidade (IB) (20, 9) possibilita o desenvolvimento de um lençol artesiano na zona de solo residual jovem, sendo este um aspecto importante na instabilidade dos taludes residuais.

Um exemplo de deslizamento nestas condições é apresentado por Terzaghi e Peck (43), o qual resumiremos a seguir:

Na figura 2 é esquematizado um maciço de gnaisse que separa um reservatório, à esquerda, de um vale profundo, à direita. O perfil geotécnico do terreno é constituído por uma camada argilosa, sobrejacente a um gnaisse decomposto (IB), menos argiloso, que por sua vez apoia-se em rocha pouco alterada.

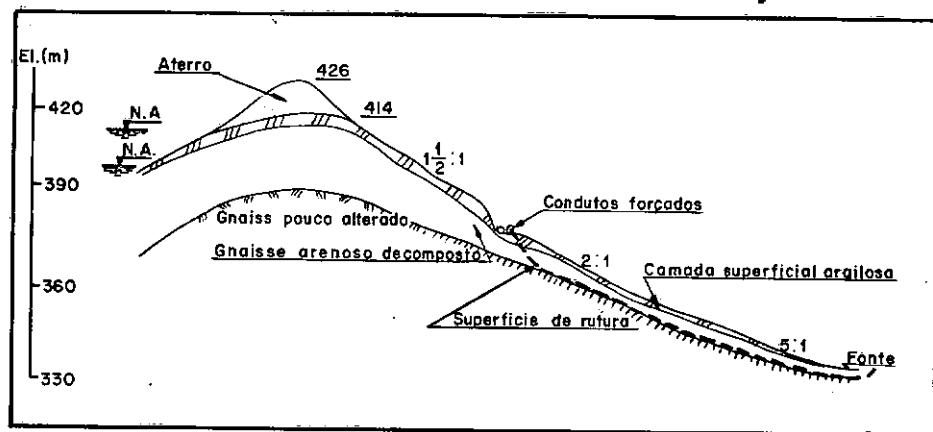


Fig. 2

EXEMPLO INDICANDO DESLIZAMENTO PROVOCADO POR AUMENTO DE PRESSÃO NEUTRA NA CAMADA DE SOLO RESIDUAL JOVEM.

Quando o N. A. do reservatório atingiu a elevação 420 m, os condutos forçados, indicados na figura, cederam, e surgiu uma pequena fonte na elevação 370 m, a uma distância de 270 metros da crista do maciço.

A elevação do N. A. para 450 m provocou um desliza-

mento do talude, entre os condutos forçados e a fonte à 370 m, ao longo da superfície superior de rocha pouco alterada.

É interessante observar que a parte superior do talude, mais íngreme, ficou estável, o que comprova ser, o excesso de pressão hidrostática da zona permeável na região do pé do talude, a causa do deslizamento.

II - O fator principal da estabilidade de um corte em solo residual é a posição do seu pé em relação aos horizontes de intemperização. De fato, caso o corte atinja a camada de rocha muito alterada (IIA), ou mesmo a de solo residual jovem (IB), estas funcionarão como um eficiente sistema de drenagem subterrâneo natural, devido a elevada permeabilidade das mesmas. Cumpre mencionar entretanto, que tal melhoria de estabilidade só se refere a "estabilidade a longo prazo".

III - As análises de estabilidade devem ser conduzi das de modo diferente, conforme a zona (horizonte de intemperização) a que pertencem as superfícies potenciais de deslizamentos.

2.4

TÁLUS: FORMAÇÃO E IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS

Tálus é um termo genérico definidor de qualquer depósito natural situado nos sopés das encostas, formado por materiais provenientes de escorregamentos e erosão na mesma.

Como podemos verificar pela definição acima, as características dos depósitos de talus são bastante distintas. Pode-se agrupá-los, numa primeira classificação, em função de suas variáveis de formação: a) tipo de rocha da encosta que o originou; b) topografia (íngreme ou suave) e dimensão da mesma; c) tipo predominante do material do talus (proveniente de deslizamento de solo, de rocha, ou de material erodido); d) clima. Em seguida, prosseguindo a classificação, deve-se considerar a dimensão do talus e sua posição relativa à encosta.

Vejamos o porquê da importância da dimensão do talus e da sua posição relativa à encosta, no seu potencial de instabilidade:

Devido a movimentos na massa do talus, surgem fendas na parte superior do mesmo, mais precisamente no contato talus - rocha, constituindo este local um caminho preferencial de infiltração. Segundo Barata, F.E. (2) tem-se: "...As the deposit increase permanently in the time, it tends to become unstable mainly during the rainy periods, when it receives water in two ways: a) directly and uniformly all over surface of the slope; b) by larger and concentrated afflux into the contact with the scarp, the afflux being so much larger as the contributory area of the scarp is spread". Em síntese, a instabilidade potencial do talus está restrita à zona do mesmo, sujeita a grande variação de pressão neutra, nos períodos de elevada precipitação, provocada pela infiltração preferencial no contato talus - encosta rochosa, da água acumulada na parte superior da encosta. Esta zona de instabilidade corresponde a todo o depósito de talus, no caso deste ser

de dimensões relativamente pequenas, e somente à região próxima a escarpa, no caso de depósito de grande dimensão.

Quanto às características geotécnicas do tálus, temos ainda a considerar:

a) A sequência de camadas de média e alta permeabilidade, de solo residual jovem (IB), subjacente ao depósito de tálus, de baixa a média permeabilidade, pode conduzir a um caso de lençol d'água artesiano (vide figura 3)

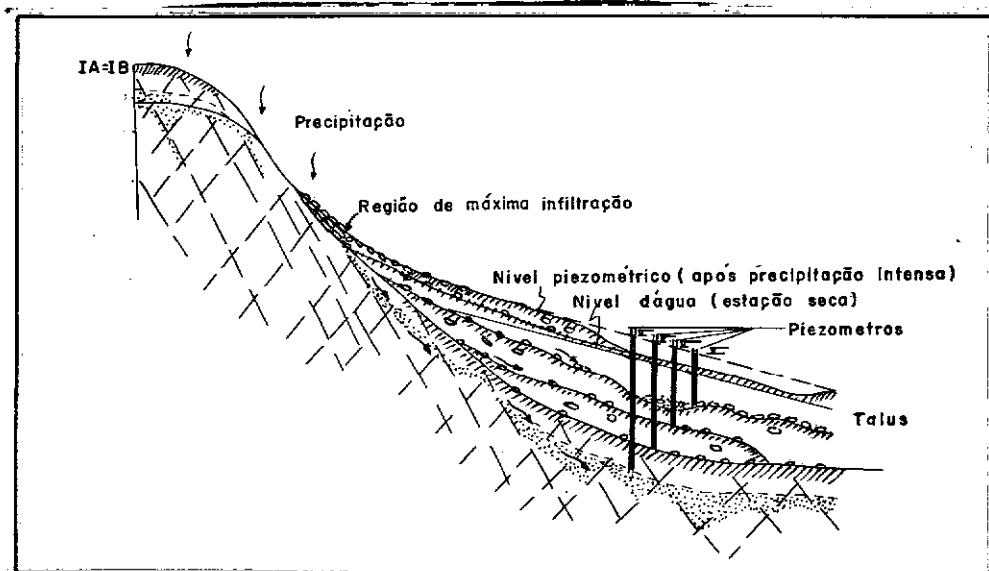


Fig. 3 - Depósito de tálus sobrejacente a um Solo Residual; (bibl.9)

b) A zona de contato tálus-solo residual constitui superfície de fraqueza quanto à resistência ao cisalhamento, podendo constituir em zona preferencial de escorregamento.

A distinção entre tálus e solo residual pode ser auxiliada pelas seguintes observações:

- a) Em planta topográfica os depósitos de tálus apresentam curvas de nível muito irregular;
- b) Os blocos situados na massa de tálus apresentam

direção de fraturamento e xistosidade dispersa, enquanto que, os blocos de solos residuais, apresentam constância daquelas direções;

c) A transição de um bloco de rocha para a matriz do talus (em geral argilosa) é muito brusca. Nos solos residuais existe esta transição, governada pelo intemperismo da rocha original;

d) A matriz do talus não apresenta estrutura, sendo bastante errática.

3. TIPOS DE DESLIZAMENTOS

"Every landslide or slope failure  
is the large-scale experiment..."

K. Terzaghi

## 3.1

## INTRODUÇÃO

Como vimos anteriormente, um terreno residual possui zonas com diferentes graus de intemperização. Em vista disto é de se esperar que o mecanismo e tipo de rutura destes taludes dependam da zona de intemperização em que se encontra a superfície de deslizamento. De fato, a análise de deslizamentos ocorridos nestes terrenos comprova tal suposição.

Devido a este fato, abordaremos este item - "Tipos de Deslizamentos" - considerando individualmente cada zona de intemperização.

## 3.2

## ZONA DE SOLO RESIDUAL MADURO

Nesta zona, constituída por material relativamente homogêneo, as superfícies potenciais de deslizamento são controladas pelas tensões cisalhantes devido ao peso próprio do maciço. As superfícies de rutura são, em geral, circulares.

Nos taludes em que o N.A. situa-se abaixo desta zona, deve-se considerar, na análise de estabilidade, a variação da coesão com o grau de saturação; variação esta, devido às precipitações pluviométricas. Cumpre pesquisas correlacionando a variação do grau de saturação e sua distribuição no talude com as precipitações (28, 29, 19).

Na prática, esta "indeterminação" é levantada saturando-se a amostra do solo, em laboratório, antes da realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento. Este procedimento pode conduzir, entretanto, a resultados muito conservativos.

## 3.3

## ZONA DE SOLO RESIDUAL JOVEM

Nesta zona podemos ter um solo "uniformemente heterogêneo" (ou "estatisticamente homogêneo") - neste caso, as propriedades médias da massa é que governam o seu comportamento -, ou a ocorrência de superfícies de fraqueza na massa, correspondente a antigas diaclases, falhas, plano de xistosidade etc... Nesta situação, segundo Sowers (41) tem-se "...Failure actually takes place along some little relict structure".

Queiroz, L.A. (30) analisa o escorregamento ocorrido durante a execução de um corte previsto para 80.0 metros de altura, em solo residual constituído por uma camada superior, de 10.0m, de solo argiloso (IA) sobrejacente a uma de solo residual jovem (IB) até o fim do corte. Nesta zona (IB), o material possuia compassidade tal que tornava, a partir de uma certa profundidade, impenetrável ao ~~amostrador~~ padrão. Entretanto, sondagens rotativas convencionais nestes locais apresentaram recuperação nula.

Apesar do fator de segurança à rutura do talude, obtido através da análise de estabilidade terrosido maior do que 1.0, ocorreu o deslizamento do corte quando este estava quase completo.

Referindo-se à superfície de rutura, o autor comenta: "These slides started with the development of movement and cracks along very neatly defined shear planes. These planes were found to be generally coincident with the jointing system of the parent rock. No sounding could have disclosed the occurrence of such planes in the soil mass. Furthermore the occurrence of a very thin layer of more clayey and blackish soil along those planes was found.".

John et al (17) analisa a origem e propriedade destas lentes escuras mencionadas acima por Queiroz, encontradas algumas vezes na massa de solo residual jovem. Segundo os referidos autores, estas lentes são o resultado do material de preenchimento de antigas diaclases da rocha de origem, devido a atividade da água subterrânea; a coloração escura sendo proveniente da precipitação de compostos de ferro e magnésio.

Ensaios de resistência ao cisalhamento adensado rá-

rido, no solo residual "virgem" e ao longo das lentes escuras, indicaram as seguintes envoltórias de Mohr:

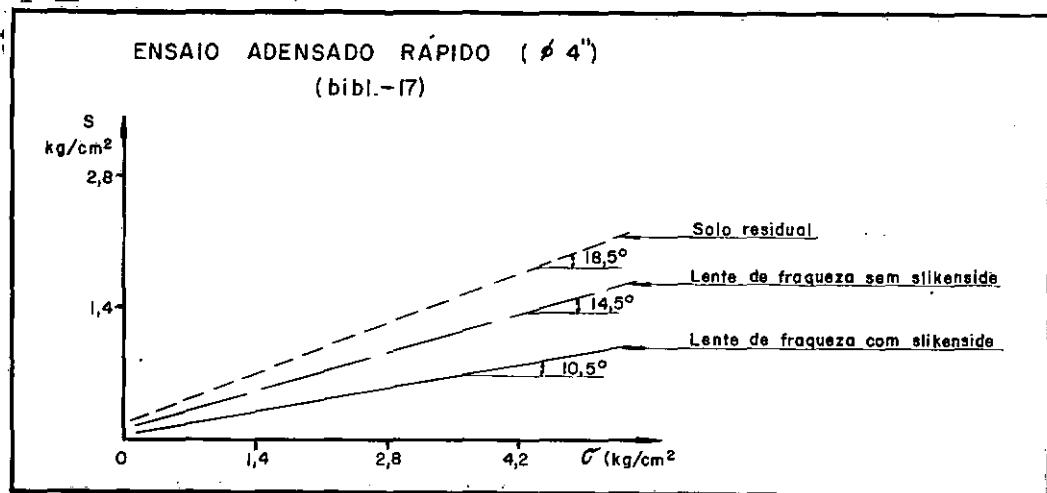


Fig. 4 - Comparação das envoltórias de rutura no solo residual e ao longo de lente de fraqueza c/ e sem silikensides.

Estes autores citam no referido trabalho, vários deslizamentos em solos residuais de granito e gnaisse ao longo destas superfícies de fraqueza, embora o fator de segurança à rutura do talude, admitido homogêneo, fosse bem maior que 1.0.

Um outro tipo frequente do mecanismo de deslizamento nesta zona de solo residual, ocorre quando o perfil do terreno é constituído por uma camada de solo residual jovem, pouco espessa, sobrejacente a rocha matriz muito pouco alterada. Nestes casos, o deslizamento se processa a uma grande velocidade, mais comumente ao longo da própria superfície de rocha (48).

3.4

ZONA DE ROCHA MUITO ALTERADA

O modelo simplificado da parte superior desta zona é um agrupamento de blocos e matacões envolvidos por solo parcialmente decomposto. A dificuldade da análise de estabilidade consiste em se conhecer as propriedades da totalidade da massa. Qual a resistência ao cisalhamento a considerar? Apenas a do solo matriz ou a deste mais a influência dos matacões? Segundo Vargas - (51) tem-se: "...essa influência só pode ser determinada por observações na natureza - medindo e observando recalques e escorregamentos de taludes. É traçando superfícies de escorregimento e determinando as características prováveis do solo que podemos determinar as características e influência dos blocos. Tenho a impressão, nos casos estudados, de que as características mecânicas da totalidade da massa são governadas pelas propriedades do solo intermediário, como se os blocos não existissem. Rompe-se o solo segundo a parte mais fraca, sem que os blocos, matacões, pedras-de-mão e pedregulhos, tenham influência. É o que indica uma série de escorregamentos observados em Santos.".

3.5

ZONA DE ROCHA POUCO ALTERADA E SÃ

A análise de estabilidade nesta zona já pertence ao domínio da Mecânica das Rochas. O grande progresso no conhecimento do mecanismo destes deslizamentos deve-se às análises de ruturas ocorridas - Barragem de Malpasset (52), por exemplo, e

aos projetos de barragens em arco, cada vez maiores e em locais com fundações menos favoráveis.

A comissão que analisou a rutura da barragem de Malpasset cita: "...The most probable cause of the disaster may have been a weak plane or fault upstream nearly parallel for some distance and a little below the foundation of the arch in the upper part of the left bank...".

Com referência aos tipos de rutura nos maciços rochosos, L. Serafim e Ridruejo (37) mencionam: ...

"... It is unanimously recognized that the rupture of rock masses always occurs along the planes of least resistance...".

Em vista disto, a análise de estabilidade deve preceder de um mapeamento completo das fraturas, falhas, planos de estratificação e sistema de diaclasamento do maciço rochoso. Em seguida, deve-se proceder à obtenção de "tetraedos" rochosos, cujas faces constituem um dos planos de fraqueza mencionados acima, e a uma posterior análise estática de cada um destes "tetraedos".

4. INFLUÊNCIA DAS PRECIPITAÇÕES NA ESTABILIDADE DE TALUDES

## 4.1

## INTRODUÇÃO

O efeito das precipitações na estabilidade dos taludes naturais se manifesta na diminuição das tensões resistentes - aumento da pressão neutra e/ou diminuição da coesão -, como também no aumento das tensões cisalhantes no interior do maciço, tendo portanto, tal variável, uma ação dupla na instabilidade dos maciços terrosos.

Passaremos, a seguir, à análise desta variável, considerando separadamente condições homogêneas de infiltração com influência da precipitação apenas no grau de saturação da zona a cima do N. A., e posteriormente à influência das precipitações onde predominam caminhos preferenciais de infiltração e de percolação.

ção, criando um aumento de poro-pressão no maciço.

#### 4.2 RELAÇÕES ENTRE PRECIPITAÇÃO E GRAU DE SATURAÇÃO EM TERRE - NOS HOMOGÊNEOS QUANTO A INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO

A distribuição do grau de saturação do solo que se encontra permanentemente acima do lençol freático varia com o tempo. Vejamos como se processa esta variação.

No final da estação seca (outubro-novembro) o solo daquela zona encontra-se parcialmente saturado. O grau de saturação situa-se entre 30 a 50%, em geral. Nestas condições o solo possui uma elevada resistência ao cisalhamento devido a pressões negativas nos poros.

Por ocasião das primeiras chuvas do período pluvioso, há infiltração d'água no solo e como a taxa de infiltração não é ilimitada, apenas uma zona do solo é afetada por estas precipitações. No final destas chuvas uma parcela da água infiltrada irá evaporar, mas a maioria será redistribuída pela massa do solo até que haja uma condição de uniformidade do grau de saturação. Durante as próximas chuvas haverá mais infiltração com consequente evaporação e redistribuição do grau de saturação.

Analizando quantitativamente este modelo para solos com infiltração e percolação homogêneas, P. Lumb (19) chegou as seguintes conclusões:

I - "Comparing soil at the beginning of the season and at the end of the wet season, it is easy to see that although

the potential infiltration rate will be less at the end of the wet season, the rate of advance of the "wetting front" will be greater. Consequently a rainstorm of given intensity and duration will have more serious effects the later in the season that it occurs".

II - A "frente de saturação" só progride consideravelmente quando a intensidade das precipitações for maior ou igual à taxa do potencial de infiltração do solo.

III - A quantidade d'água infiltrada nunca é suficiente para saturar um espesso manto de solo; o efeito das precipitações está restrito apenas aos 6.0 primeiros metros de solo.

IV - Como a coesão destes solos é função do grau de saturação, o fator de segurança na região superior do talude varia com a época do ano, diminuindo na estação pluviosa, podendo eventualmente atingir o valor limite 1.0.

#### 4.3

#### HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA EM DEPÓSITO ERRÁTICO QUANTO A INFILTRAÇÃO E PERCOLAÇÃO

Na maioria dos solos residuais de granito e gnaisse e de tálus, encontrados no Brasil, a hidrologia subterrânea é comandada por caminhos preferenciais de infiltração e de percolação. Assim sendo, as precipitações pluviométricas não interferem apenas na parte superior do maciço terroso, mas até às zonas mais profun-

das, fazendo variar consideravelmente a pressão neutra no maciço. Isto é o que se conclui através de várias observações, como veremos:

Franciss, F.O. (12), observando a simultaneidade entre os escorregamentos ocorridos em solos residuais e talus na cidade do Rio de Janeiro, e os períodos de grandes precipitações, apresenta conclusões extremamente interessantes:

Partindo da equação de fluxo d'água em solo homogêneo não saturado, o autor obtém o limite superior da infiltração. Para tanto, considera desprezível o potencial de evapo-transpiração e considera a infiltração igual a:  $i_{\text{máx.}} = k \cdot j$ , em que:  $i_{\text{máx.}}$  = máxima quantidade de água escoada por unidade de área e por unidade de tempo;  $k$  - coeficiente de permeabilidade do meio percolado;  $j$  = gradiente gravitacional unitário.

Para solos com coeficiente de permeabilidade inferior a  $10^{-5}$  cm/s, obteve os seguintes valores extremos: variação do N. A. - alguns decímetros; tempo de retardo (tempo entre o início da variação do N. A. e o início da precipitação), aproximadamente 30 dias para N. A. à profundidade de 5.0 metros. Estas conclusões concordam com os cálculos e observações feitas por P. Lumb, citadas anteriormente. É importante lembrar que estes cálculos foram baseados em solos de porosidade homogênea.

A partir dos valores acima F.O. Franciss comenta: "... não é viável supor a ocorrência de um incremento acentuado de poro pressões em decorrência de uma flutuação excepcional da superfície freática como causa primordial dos escorregamentos verificados simultaneamente durante a fase mais intensa das precipitações".

tações pluviais."

Mais adiante no seu trabalho citado, o autor apresenta as seguintes conclusões:

"... Existência de estruturas secundárias bem definidas eventualmente assinaladas por uma porosidade "maior" muito superior à porosidade "menor" do solo restante, favorecendo uma infiltração preferencial excepcional em comparação com a infiltração difusa compatível com a estrutura primária do meio percolado."

"Nestes termos, a menos os deslocamentos superficiais provocados pela erosão pluvial, uma das causas eventualmente responsáveis pelos escorregamentos verificados simultaneamente com os períodos de precipitações mais intensas, quando a alimentação preferencial ao longo das estruturas secundárias excede sua depleção, favorecendo sua saturação, seria o desenvolvimento momentâneo de poro-pressões elevadas no interior da zona de fluxo, causado pelo aumento de carga hidráulica provocada pela saturação da porosidade "maior" acima da superfície freática original. Com efeito, as isóbaras anteriormente existentes na zona de fluxo, sofrerão modificações apreciáveis de valor e posição, atingindo ocasionalmente magnitudes suficientes para causar seu desequilíbrio, conforme indica o esquema a seguir:"

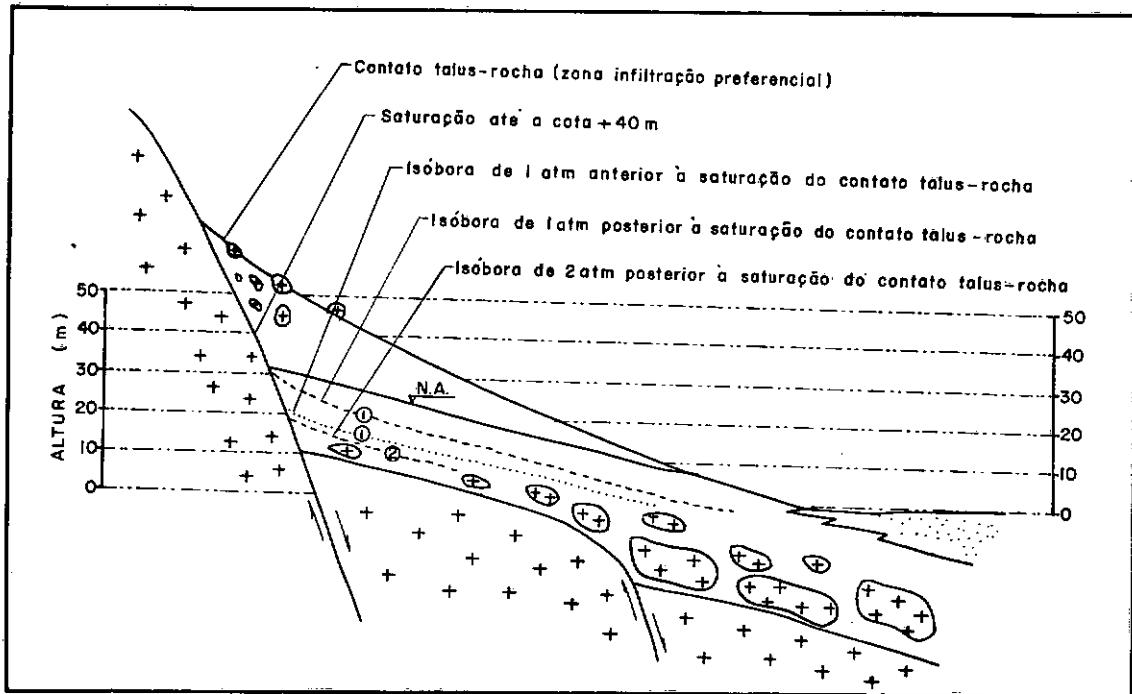


Fig. 5- (bibl.12)

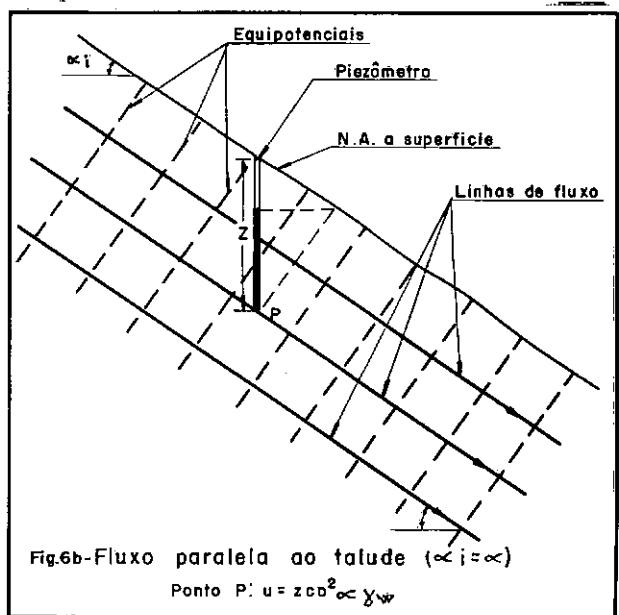
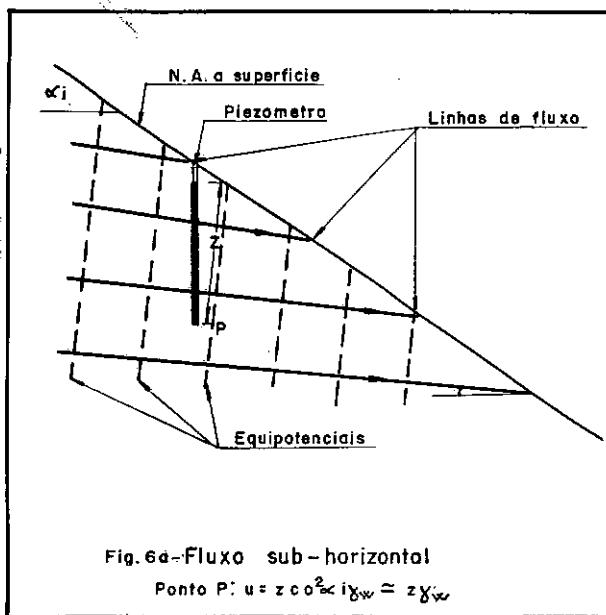
Com relação aos caminhos preferenciais de percolação e à aleatoriedade da hidrologia subterrânea nos tálus, as observações citadas por Teixeira e Kanji (42) em trabalho de estabilização de encosta de talus-xisto, por drenos horizontais, são bastante elucidativas: "... A localização dos drenos, bem como a sua concentração em determinadas áreas da encosta, eram programados no campo conforme resultado das medições das vazões nos drenos. É de se notar que durante a perfuração dos drenos, em muitos casos, eram alcançadas zonas aquíferas extremamente férteis, resultando vazões de  $20 \text{ m}^3/\text{hora}$ , com a saída d'água na boca do dreno sob forte pressão. Essa vazão durava algumas horas e, posteriormente, havia uma diminuição gradativa da vazão até o estabelecimento de um certo regime de vazão, que foi observado ser variável em função da intensidade das chuvas."

"Uma análise comparativa das vazões individuais dos drenos mostrou que a hidrologia subterrânea é extremamente errática, sendo frequente os casos em que dois drenos quase paralelos e afastados entre si de cerca de poucos metros, um deles apresentou vazão de vários metros cúbicos por hora e o outro mostrou-se quase seco."

Além do que foi dito acima com referência às características erráticas de infiltração e de percolação nos depósitos de tálus e solos residuais, dificultando um reconhecimento preciso da hidrologia subterrânea, temos ainda a considerar, como característica desfavorável destes taludes, a possibilidade de formação de lençóis aquíferos confinados, conforme mencionamos no item 2.4.

#### 4.4 INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DA PERCOLAÇÃO NA ESTABILIDADE DOS TALUDES

A influência da direção da percolação na pressão neutra, e consequentemente na estabilidade dos taludes, pode ser analisada a partir de duas situações simples apresentadas abaixo: talude infinito, homogêneo e N.A. à superfície.



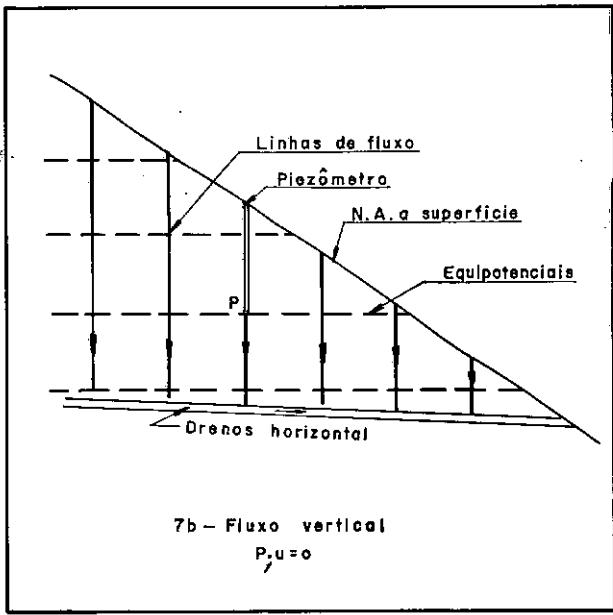
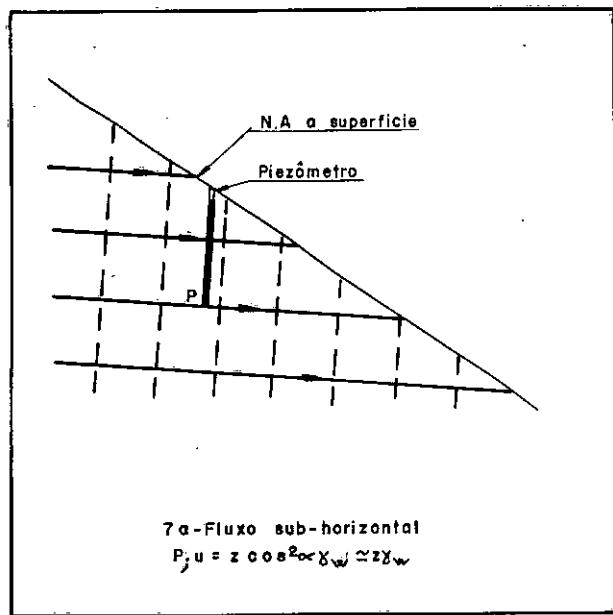
Dos esquemas anteriores, podemos concluir que o simples conhecimento do N.A. não é suficiente para obtenção da distribuição da pressão neutra no maciço.

Através destes esquemas obtemos também meios para uma melhor interpretação do mecanismo de estabilização de taludes por drenos profundos e túneis.

De fato, a introdução destes dispositivos de drenagem tem uma ação dupla na diminuição da pressão neutra: variação da profundidade do N.A. e variação da direção das linhas de fluxo.

As situações extremas seriam:

## Linhos de fluxo antes e após instalação do sistema de drenagem profunda



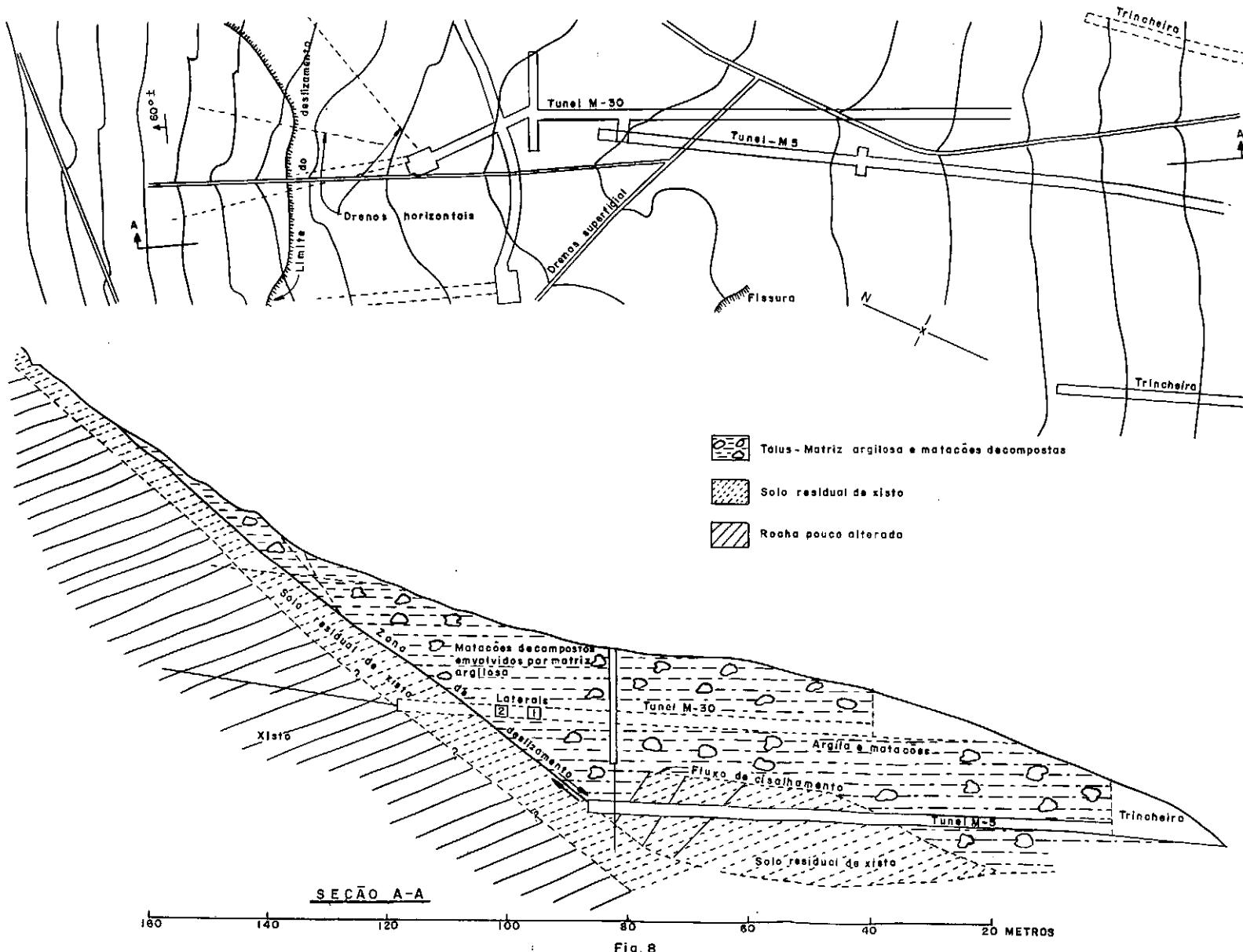
Teoricamente, se o solo está completamente saturado, uma mudança instantânea nas condições hidráulicas de contorno refletirá imediatamente nos valores da pressão neutra, não necessitando propriamente de fluxo d'água a estas novas condições de contorno; isto é, a distribuição da pressão neutra irá variar instantaneamente a uma nova configuração da "rede de fluxo" governada por estas novas condições hidráulicas de contorno.

Na realidade, existe um "time-lag" para que a água do maciço se ajuste a estas novas condições. Entretanto, em termo de melhoria de estabilidade - diminuição de pressão neutra -, este ajuste se processa em tempo mais rápido que o referente a diminuição do nível d'água.

Vejamos, como exemplo do que foi mencionado acima, a análise de estabilização de um tálus por drenagem profunda, es-

tudado por Terzaghi (44, 11), em 1946, em Cubatão.

Nas figuras que se seguem é apresentado em planta e em seção longitudinal o perfil da área instável, bem como os respectivos dispositivos de drenagem profunda utilizados.



A eficácia do sistema de estabilização empregado (drenos horizontais, túneis e trincheiras) pode ser verificado pelo gráfico a seguir:

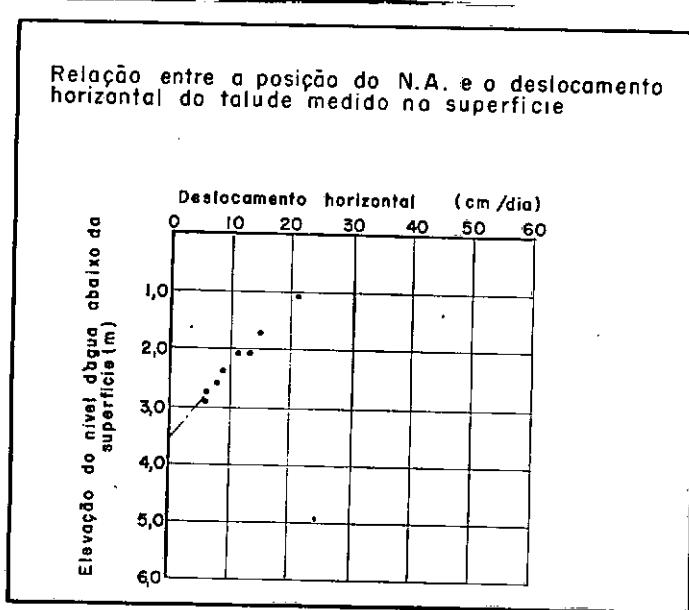


Fig. 9 - (bibl.44)

Embora em seu relatório Terzaghi não mencionasse explicitamente a influência da variação da pressão neutra devido às novas condições hidráulicas de contorno, a nosso ver esta parcela foi relevante na estabilização do terreno, segundo as próprias observações e conclusões de Terzaghi (44): "... Although the moving mass had a depth up to 130 feet, the diagrams showed that the lowering of the water table by not more 15 feet would suffice to stop the movement. Drainage was accomplished by means of toe trenches, drainage galleries, and horizontal drill holes extending from the headings into water-bearing zones of the jointed rock. The movements ceased while the drainage was still in an initial state..."

Um outro exemplo que nos leva à comprovação prática da importância da variação de direção da percolação como um fator também estabilizante, quando se utiliza estabilização por drenagem profunda, pode ser verificado através as observações de C.Nunes (blil.8): "É comum realizar-se uma drenagem, por meio de drenos horizontais profundos, por exemplo, e depois constatar que, embora o talude tenha passado a se comportar bem a drenagem teria aparentemente fracassado, pois não se observa a saída d'água. O referido autor continua: "...na realidade, o que ocorre em muitos casos é que a água drenada é em quantidades tão pequenas que a evaporação impede seu fluxo".

A nosso ver, esta melhoria de estabilidade deve-se principalmente à variação nas direções da percolação, com consequente diminuição da pressão neutra.

5. EXPLORAÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS

## 5.1

## INTRODUÇÃO

Para análise de estabilidade de um talude de solo residual ou tálus é necessário uma detalhada investigação geológica e geotécnica.

A investigação geológica precede os trabalhos geotécnicos, iniciando-se por um estudo geomorfológico da região, detendo-se, em seguida, no mapeamento geológico da superfície da área em estudo. Este levantamento local deve visar a obtenção de dados concretos, possíveis de responder as seguintes perguntas:

- 1 - É área de escorregamento antigo?
- 2 - É área de escorregamento recente?

- 3 - Qual a região instável propriamente dita?
- 4 - Quais as causas principais de instabilidade do talude?

Para tanto, tal mapeamento deve conter, além de observações das características próprias do local, dos seguintes itens:

- 1 - Localização e características estruturais da escarpa e dos an floramentos;
- 2 - Área de acumulação das precipitações;
- 3 - Estado da vegetação;
- 4 - Posição, tamanho e direção das xistosidades dos blocos rochosos;
- 5 - Posição e características das fissuras do terreno;
- 6 - Localização de fontes e regiões úmidas;
- 7 - Forma topográfica do pé do talude.

Por ocasião deste mapeamento e da interpretação do mesmo, algumas considerações gerais devemos ter em mente:

- 1 - Áreas de escorregamentos antigos, em geral, apresentam um abaulamento convexo no pé do talude.
- 2 - A delimitação da área instável, ou parcialmente instável, bem como direção principal do escorregamento, é obtida pelas características das fissuras.

Segundo Terzaghi e Peck ( 43 ), "...although the variety of conditions that may cause a slide almost every slide exhibits the general characteristics illustrated by fig. 10".

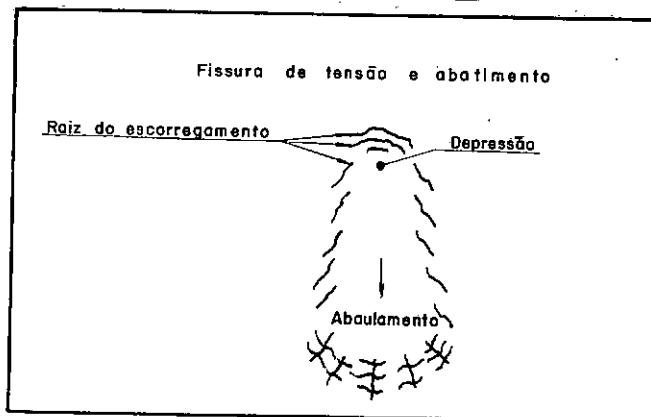


Fig.10-Esquema típico de fissuras em escorregamentos de solos coesivos.  
(bibl.43)

- 3 - Deslizamentos recentes são caracterizados pela ausência de vegetação na "escarpa" (desnível) formada pelo deslizamento.
- 4 - A inclinação das árvores indicam região de "creep" ou deslizamento e a partir da idade das mesmas (mais antigas inclinadas, e mais novas com troncos verticais) é possível estimar a data do deslizamento.
- 5 - Segundo Zábura e Mencí (55) "...the slip surfaces are generally impervious, retaining both surface and ground water; where they approach the ground surface, new springs and wet grounds appear.
- 6 - A direção da xistosidade dos blocos, comparada com a da rocha da escarpa, elucida a origem destes: residual ou tálus.

Somente após a interpretação dos dados geológicos é que as investigações geotécnicas (sondagens, retirada de amostras etc...) devem ser iniciadas. Devemos então formular todos os modelos possíveis de rutura do terreno, e ir eliminando, através de uma programação dinâmica de sondagens e poços, os que forem sendo apresentados incompatíveis à configuração real do terreno, até chegarmos a um número reduzido dos tipos realmente possíveis de rutura.

## 5.2

## SONDAGENS

## 5.2.1

Sondagens de Reconhecimento

Esta etapa tem por finalidade a caracterização de cada camada estratigráfica (horizonte de intemperização) do subsolo, podendo entretanto, se convenientemente executada, fornecer importantes informações adicionais, que orientarão os trabalhos posteriores das investigações geotécnicas. Contudo, do modo como são comumente realizadas, muitas vezes nem mesmo o perfil geológico é possível ser obtido. Vejamos algumas destas deficiências.

Na parte que se refere a descrição do solo, é comum verificarmos boletins de sondagens apresentados como se fossem para projetos convencionais de fundações (dando enfase especial ao I.R.P.) e/ou classificando visualmente o solo apenas pela granulometria, e não mencionando a macro-estrutura do mesmo.

Na zona de solo residual, a "mudança de camada" é indicada quase que aleatoriamente pelo sondador, devido a uma mudança no índice de resistência à penetração e/ou na granulometria. A variação da granulometria pode ser devido à intemperização diferencial na zona, ou existência de solos diferentes, ambos devido a tectônica na massa original da rocha.

Na zona de talus ocorre a mesma deficiência. "Mudanças de camada" são indicadas quando há passagem da matriz do talus para matação decomposto e vice-versa, ou devido a pequenas varia-

ções de granulometria na matriz ou no matacão.

Não citando a macroestrutura do material é impossível saber de que material está se tratando: tálus, solo residual ; qual zona do solo residual?

Uma sistematização referente à macroestrutura de solo é apresentada por Nogami (26).

O índice de resistência à penetração obtido nestas sondagens é de pouca valia para as análises de estabilidade destes terrenos. O que se observa com grande frequência no tálus, é o aumento do I.R.P. quando se passa da matriz do mesmo para um matacão intemperizado, principalmente aqueles a pequena profundidade, devindo ao seu baixo grau de intemperização.

Em vista disto, o melhor procedimento seria a visualização das amostras pelo próprio encarregado da análise do talude, já que, em muitos casos, existe um responsável para "conferir" o boletim do sondador, um para traçar o perfil e, por fim um para a análise de estabilidade. Este último sujeito, portanto, a analisar um "outro talude", totalmente diferente do real.

Como regra básica achamos que o boletim de sondagem, feito pelo sondador, deve pecar sempre por excesso, com relação a descrição do solo.

Outra informação que as sondagens de reconhecimento podem fornecer é com relação à hidrologia subterrânea. Entretanto, isto não se consegue como normalmente é feito, com a indicação apenas nas níveis d'água inicial e final. Deveria ser indicado, em cada dia de execução da sondagem, o nível d'água com as respectivas profundidades do furo e do revestimento. Zonas de perda d'água também devem ser indicadas no boletim de sondagem.

Enfim, devemos mencionar que as investigações geotécnicas por meio de sondagens de reconhecimento devem ser sempre extendidas além da área "potencialmente instável" para melhor estabelecimento do modelo do sub-solo.

#### 5.2.2

#### Sondagens Especiais e Poços de Investigação

Para realização dos ensaios especiais de laboratório são necessárias amostras indeformadas. Estas podem ser obtidas através de sondagens especiais (4 a 6") e/ou abertura de poços ou trincheiras.

M. Vargas (50) apresenta um amostrador de paredes finas de 5 mm de espessura e 120 mm de diâmetro, que, segundo o mesmo, tem sido utilizado com sucesso para a amostragem do solo residual das zonas IA e IB. Este amostrador é introduzido no solo por meio de macaco hidráulico.

Nós temos conhecimento e também usado com sucesso a perfuração rotativa com barrilete duplo (tipo Denison), para amostragem indeformada de solo residual. Neste tipo de amostragem, o barrilete interno permanece estacionário e recebe a amostra à medida que o barrilete externo, rotativo, vai cortando o solo. A qualidade da amostra obtida pelo amostrador tipo "Denison" depende fundamentalmente da posição relativa entre os dois barriletes, os quais devem ser ajustados em função do tipo de solo (Earth Manual pp 355a 361).

Estes tipos de sondagens, de pequeno diâmetro, são ineficientes para detectar zonas e planos de fraqueza no solo, mesmo que a amostragem seja contínua, conforme mencionam vários autores (30, 17, 1). D'Appolonia e Alpestein (1) em artigo sobre o comportamento de talus, proveniente de solo sedimentar, comenta: "... Although "slickensides" were observed at both the top and bottom of the slope, they were not detect in any of the borings despite the fact that split spoon samples were taken continuously with depth in four borings".

Quanto aos poços, constitui o melhor meio para inspeção geológica-geotécnica e retirada de amostras indeformadas. Durante a descida da escavação é possível a observação da disposição de camada, de zonas de fraquezas e de veios preferenciais de percolação. Dois tipos de blocos devem ser extraídos: visando o conhecimento das características médias de cada zona e das singularidades desfavoráveis.

### 5.3

### OBSERVAÇÕES DA HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA

Se, por um lado, o conhecimento da hidrologia subterrânea assume importância de primeira ordem na análise dos taludes de solos residuais e talus, é onde, devido a sua característica errática e a maneira como é investigada, residem as maiores deficiências por ocasião da análise de estabilidade.

Vejamos alguns erros que ocorrem com frequência:

O "nível d'água inicial" obtido nas sondagens, se erradamente, pode fornecer concepção falsa de artesianismo. Em solos argilosos isto é comum de acontecer. De fato, "o nível d'água só é realmente observado depois que a furação o ultrapassou (criando diferença de carga) e a água circundante passa a encher o fundo do furo. Em argilas de baixa permeabilidade o tempo de enchi-mento é tão grande que frequentemente o sondador ultrapassa a co-ta do lençol freático de alguns metros" (24). O procedimento correto, embora muito pouco empregado, é o sondador diminuir o rítm-o da sondagem tão logo observe a zona de saturação capilar. Ao a-tingir o "lençol d'água" a sondagem deve ser interrompida por um certo tempo, em função da permeabilidade do solo, até que ocorra o equilíbrio do N.A. no furo.

Os ensaios de permeabilidade "in situ", executados nos furos de sondagens, só devem ser realizados quando se conhece perfeitamente o subsolo. Estes fornecem, quando bem programados e conduzidos, apenas uma estimativa do valor médio da permeabili-dade do solo nas vizinhanças do ensaio, pois estão sujeitos a vá-rios erros de execução e de teoria (baseiam-se em hipóteses sim-plificadoras quanto a rede de fluxo).

Quando o ensaio é realizado enchendo-se o tubo de revestimento, resultados baixos de permeabilidade podem ser obti-dos devido a formação de uma película de solo, formada por parti-culas em suspensão na água. Este erro pode ser detectado e elimi-nado, realizando-se o ensaio através do esvaziamento do tubo, e ob-servando a subida do N.A..

Por outro lado, resultados elevados da permeabilidade podem ser obtidos devido uma vedação não perfeita no contato solo-parede externa do revestimento, constituindo num caminho preferencial de percolação.

A fim de se obter a distribuição da pressão neutra é necessário a instalação de piezômetros em cada camada do subsolo, bem como, em várias posições de uma mesma camada, pois o tempo entre uma dada precipitação e o "peak" da pressão neutra, pode variar com a distância do ponto em relação ao contato superior rocha-solo, quando este constituir em caminho preferencial de infiltração.

O piezômetro tipo "Casagrande" é satisfatório na maioria dos casos. Durante sua instalação devem ser realizados ensaios para obtenção do "time lag" hidrostático de cada piezômetro. Como regra básica quanto ao número de piezômetro a serem instalados devemos considerar que, em média, apenas 50% tem funcionamento razoável a longo prazo.

Quanto a interpretação da variação da pressão neutra com as precipitações, em geral, correlacionando a pressão neutra com a quantidade de precipitação acumulada em um determinado período de dias (5 a 30 dias), obtém-se correlações mais significativas do que com a sua variação diária.

Finalmente, quando se pretende instalar dispositivos de drenagem profunda, por exemplo, drenos sub-horizontais e poços, uma maior ênfase deve ser dada a procura de caminhos preferenciais de percolação - veios mais permeáveis. De fato, o conhe-

cimento a "priori" destes veios permite a locação da drenagem profunda interceptando-os, aumentando com isto grandemente a eficiência do sistema de drenagem.

## 5.4

## ENSAIOS ESPECIAIS DE LABORATÓRIO

## 5.4.1

Ensaios de Resistência ao Cisalhamento

Análise de ruturas de taludes em solos residuais tem indicado que, quando são consideradas todas as características do mesmo, e o mecanismo real de rutura do talude, os ensaios de resistência ao cisalhamento realizados em laboratório, apresentam valores próximos dos mobilizados "in situ", no momento da ruptura.

O tipo de ensaio a ser realizado depende dos tipos possíveis de rutura do talude: ao longo de superfícies contínuas de fraqueza ou ao longo da massa estatisticamente homogênea.

No primeiro caso as amostras devem ser moldadas de tal forma que a rutura ocorra ao longo destas superfícies menos resistentes (17).

Quando ao segundo, o que interessa é o conhecimento das propriedades médias de todo o depósito, e não, o conhecimento da resistência em determinadas posições.

De um modo simplificado, a resistência ao cisalhamento drenada dos solos residuais - maduros e jovens -, pode ser

expressa pela seguinte expressão:  $s = c + \bar{c}_n \tan \phi$ , em que,  $c = c(s, e_s)$  e  $\phi = \phi(e_s)$

Um exemplo da variação da coesão com o grau de saturação, em solo residual de granito de Hong Kong (19) é apresentado na figura 11.

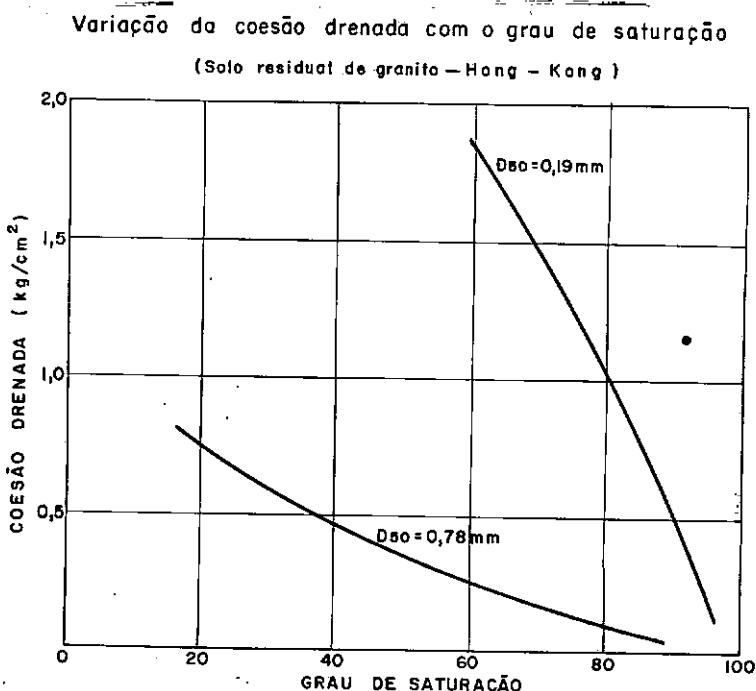


Fig.11 - (bibl.19)

Como já era de se esperar o decréscimo da coesão com o grau de saturação é tanto maior quanto mais fino foi o solo.

Em relação a influência do índice de vazios nos parâmetros  $c$  e  $\phi$  Sandroni (35) apresenta os valores reproduzidos na tabela I, obtidos em ensaios de cisalhamento direto drenado, realizados em solos residuais jovens, saturados em laboratório, do Estado da Guanabara.

Índice de Vazios Inicial ( $e_i$ )	Coesão ( $\text{kg/cm}^2$ )	Angulo de Atrito
0,4	0,35	$43^{\circ}10'$
0,5	0,28	$39^{\circ}30'$
0,6	0,23	$36^{\circ}30'$
0,7	0,19	$34^{\circ}30'$
0,8	0,17	$33^{\circ}40'$

tab. 1

Nestes casos —  $e_0 = \text{constante}$  —, o coeficiente de correlação da envoltória de Mohr-Coulomb é bastante elevado, o que comprova a expressão citada:  $s = c(s, e_0) + \bar{c}_n \tan [\phi(e_0)]$

Entretanto, para análise de taludes, sem zonas de fraquesa, o que interessa são as características médias do meio (do universo); devemos, então, considerar a seguinte expressão para a resistência ao cisalhamento do solo:  $s = c + \bar{c}_n \tan \phi + \xi$  em que,  $c = c(s)$ ;  $\phi = \text{conste}$ ;  $\xi$  é uma variável aleatória com média zero (consideraremos com distribuição normal).

Os limites de confiança de  $\bar{s}$  (resistência média para um dado  $\bar{c}_n$ ) é dado por  $(\bar{s} - \xi \delta_\xi, \bar{s} + \xi \delta_\xi)$ , sendo  $\xi$  dependente do grau de confiança desejado e  $\delta_\xi$  o desvio padrão da linha de regressão da amostra, para o referido  $\bar{c}_n$ .

$$\delta_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum_i (s_i - \bar{s}_c)^2}{n-2}}$$

$$\delta_\xi = \delta_{y/x} \sqrt{\frac{1}{n_a} + \frac{(\bar{c}_{n0} - \bar{c}_n)^2}{\sum_i (\bar{c}_{ni} - \bar{c}_n)^2}} \quad , \text{ em que, } n = \text{nº de amostras ensaiadas.}$$

$n_a = \text{nº de amostras aleatórias}$

Se as amostras ensaiadas foram obtidas a partir de um número limitado de "shelbies" e/ou blocos, estas não representam amostras "verdadeiramente" aleatórias. Nestes casos  $n_a = \frac{n}{k}$  , sendo  $k$  um número que depende de cada terreno e posição das amostras.

Podemos concluir a partir das expressões acima que a amplitude do intervalo de  $\bar{s}$ , correspondente a um dado grau de confiança, depende do número de amostras ensaiadas e da dispersão do depósito natural.

Em vista disso, somos favoráveis a trabalhar com a envoltória média correspondente a um dado grau de confiança, do que a adoção indiscriminada de fatores de segurança parciais nos parâmetros  $C$  e  $\phi$  , independente do número de amostras ensaiadas e da dispersão do depósito.

Finalmente, com relação a resistência mobilizada ao longo da superfície de rutura, a pico ou a residual, os dados disponíveis no momento, através os casos históricos, são insuficientes para que se possa apresentar conclusões definitivas. Somos da opinião, entretanto, que quaisquer índices de instabilidade ou movimentos de um talude são suficientes para não mais considerarmos a mobilização da resistência pico no mesmo.

## 5.4.2

Ensaios de Permeabilidade

Em relação aos ensaios de permeabilidade em laboratório, é suficiente resumirmos as observações de Victor de Mello (23). Segundo o autor ensaios especiais de permeabilidade em laboratório, realizados em direções paralelas e perpendiculares aos planos preferenciais de xistosidade e fraqueza, tem encontrado valores de 2 a 4 vezes maiores numa direção do que em outra, enquanto que, ensaios "in situ", usando corantes para acompanhar os fluxos preferenciais tem obtido, para solos geologicamente semelhantes, valores de permeabilidade da ordem de 1.000 vezes maiores na direção paralela aos fluxos preferenciais do que na direção perpendicular.

## 5.5

## INCLINÔMETROS

Mesmo através de uma investigação geotécnica minuciosa, a análise da estabilidade de um talude de solo residual pode apresentar um grau de incerteza maior do que o admitido. Nestes casos, a observação dos movimentos do talude, e a sua interpretação correta, constitui o único método de se prever o verdadeiro grau de instabilidade do talude, visto que, toda rutura de talude é precedida por movimentos na sua massa.

Devido as características complexas dos movimentos de uma encosta, apenas as observações dos deslocamentos na sua superfície são insuficientes para análise do potencial de rutura de

um talude. É necessário a observação em vários pontos e a várias profundidades. A versatilidade dos inclinômetros ("slope-indicators"), possibilitando observações de movimentos ao longo de toda uma profundidade, tornam estes instrumentos o mais indicado para controle dos movimentos das encostas.

A precisão de um inclinômetro é, em geral,  $\pm 0.001$  radianos. As distorções angulares correspondentes a rutura, que varia com o tipo de solo, apresentam valores entre: 0.03 a 0.5 radianos (14), o que corresponde ao seguinte intervalo de deflexões para o revestimento: 0.01 a 0.1 radianos (o valor depende da inclinação da superfície de rutura em relação ao revestimento - vide bibl: 14 pp. 622). Verifica-se, portanto, que a precisão dos inclinômetros é suficiente para determinar o grau com que uma rutura se aproxima. Entretanto, é necessário distinguir a precisão do instrumento propriamente dito, da precisão da leitura.

Alguns cuidados relativos à precisão da leitura devem ser tomados, a saber:

- a - A instalação de revestimentos próximos as extremidades da "zona de rutura" dificultam sua interpretação;
- b - Inclinômetros baseados em ponte de Wheatstones necessitam de calibração frequente;
- c - O instrumento deve ser deixado meia hora no furo, antes da leitura, para equalização de temperatura;
- d - Devem ser realizadas um conjunto de 3 leituras iniciais. Além disso, segundo Gould e Dunnicliff (14) "...it is probable that, given a particular type of instrument in good repair, the major factor influencing precision is the care and skill

provided by the observer".

Quanto a interpretação dos dados do "slope indicator", só é possível quando se conhece perfeitamente o perfil geotécnico do talude. O potencial de rutura pode ser determinado a partir da distorção angular de rutura do solo. Uma análise mais elaborada seria a partir do comportamento reológico do solo (32,33), obtido através de ensaios de "creep" e "creep-rutura" (34).

Em resumo, a observação de taludes por meio de inclinômetros permite:

- a) - delimitação da área em movimento;
- b) - obtenção da forma da superfície de rutura (ou potencial de rutura);
- c) - estabelecer zonas de movimento para trabalhos de estabilização;
- d) - verificar eficiência dos métodos de estabilização adotados;
- e) - interpretação mais precisa dos períodos de ativação dos movimentos (por exemplo, correlacionando c/precipitações);
- f) - prever o potencial de rutura a partir das distorções angulares observadas e velocidade das mesmas.

6. CONCLUSÕES

"Far better an approximate answer to the right question, which is often vague, than an exact answer to the wrong question, which can always be precise"

John W. Tukey, Ann. Math.  
Stat., vol.33, 1962

## 6.1 QUANTO AO SOLO E TIPO DE RUTURA

- As análises de estabilidade devem ser conduzidas de modo diferente, conforme a zona a que pertencem as superfícies potenciais de deslizamento.
- Na zona de solo residual maduro deve ser observada a variação da coesão com o grau de saturação.
- Na zona de solo residual jovem dependendo da tectonía na rocha de origem e do grau de intemperismo, o comportamento do solo pode ser "uniformemente heterogêneo" (baseado nos valores médios) ou comandado por superfícies de fraqueza.

- Os depósitos de tálus de grandes dimensões apresentam instabilidade em potencial apenas na região próxima a escarpa que o originou.
- As poro-pressões nos depósitos de tálus e solos residuais de granito e gnaissé são, em geral, comandadas por caminhos preferenciais de infiltração e de percolação.
- As investigações geotécnicas dos taludes devem ser precedidas por um completo mapeamento geológico de superfície, e, se possível, por um estudo geomorfológico regional.
- As sondagens de pequeno diâmetro, mesmo contínuas, são insuficientes para detectar zonas de fraqueza do solo.
- Em taludes com índicio de movimentos ou de instabilidade, a resistência pico não é mobilizada em sua massa.

## 6.2

## QUANTO A INTERPRETAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

As incertezas nas análises de estabilidade de taludes, mencionadas nos capítulos anteriores, podem ser separadas em dois grupos:

- a) - Nas premissas básicas do modelo de análise;
- b) - Na estimativa das variáveis do modelo.

Quanto as primeiras, não são necessariamente eliminadas, ou mesmo diminuídas pelo aumento do fator de segurança.

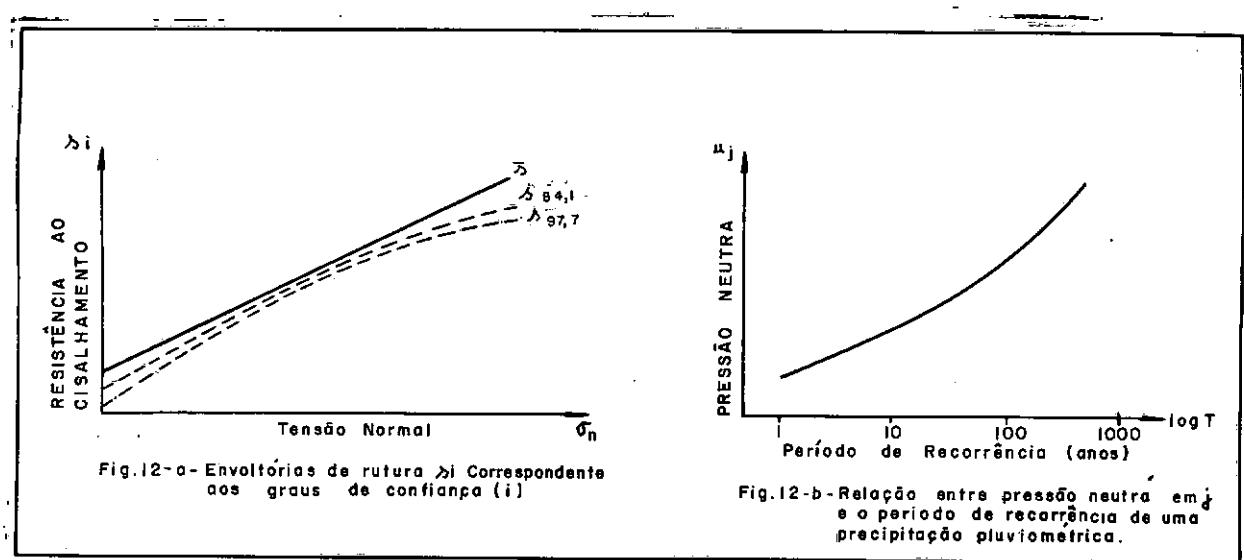
Como exemplo, podemos citar a não consideração de

uma superfície de fraqueza no perfil geológico.

Em relação a estimativa das variáveis, estas podem ser estabelecidas, com o grau de segurança desejado, desde que se conheça a distribuição das mesmas no espaço e no tempo.

No caso dos parâmetros de resistência ao cisalhamento é possível fazer uma análise estatística, conforme exemplificado no item 5.4.1. Quanto a poro-pressão, o estabelecimento de sua correlação com as precipitações, necessita observações locais da hidrologia subterrânea por meio de piezômetro, pois estas correlações variam de talude para talude, quando há caminhos preferenciais de infiltração.

Para os solos naturais o estabelecimento da relação entre fator de segurança e probabilidade de ruína (45, 53, 10) é extremamente trabalhosa, e a nosso ver não traz um aumento de "conhecimento" real da probabilidade de ruína. Preferimos, para interpretação do fator de segurança, a análise do talude para vários valores das variáveis, poro-pressão e resistência ao cisalhamento, conforme os esquemas a seguir:



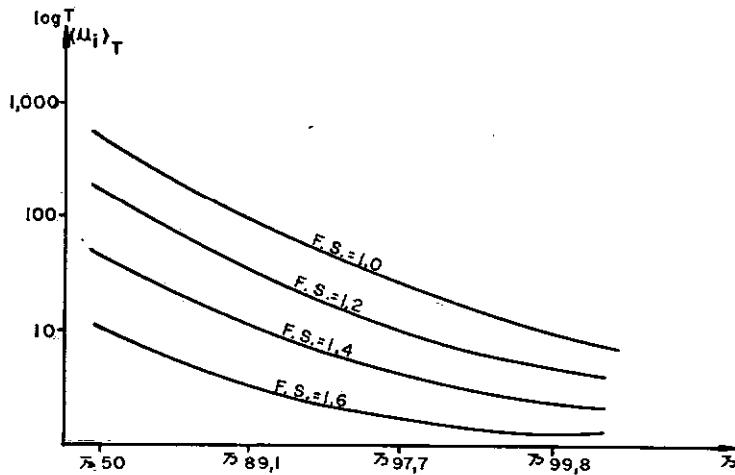


Fig. 13.C - Esquema hipotético da variação do fator de segurança c/ a resistência ao cisalhamento ( $R$ ) e a pressão neutra ao longo da superfície da rutura ( $u_i$ )<sub>T</sub>

### 6.3 QUANTO AO MÉTODO DO PROJETO

Ao analisarmos este item, cumpre inicialmente, uma introdução referente ao critério ótimo do projeto de uma obra de engenharia. Este critério, consiste em minimizar o custo esperado da obra.

Em relação ao projetos dos taludes teríamos:

$E = C_i + C_R P_R$ , em que,  $E$  é o custo esperado da obra;  $C_i$  é o custo inicial do talude - incluindo o custo do projeto e das investigações geotécnicas -;  $C_R$  é o custo devido a rutura do talude - inclui a reconstrução do mesmo, custo de estruturas afetadas e devido à paralisação das mesmas etc...; e,  $P_R$  é a probabilidade de rutura.

Por outro lado, devido a complexidade dos taludes de solos residuais, para diminuir realmente  $P_r$ , é necessário uma investigação geotécnica minuciosa, e o posterior controle do comportamento do talude, o que aumenta consideravelmente  $C_i$ .

A partir das considerações acima, os projetos de taludes de solos residuais devem ser agrupados em três casos, sendo os seguintes casos extremos:

- a) - Aqueles cujo custo de rutura é relativamente baixo. Incluem neste caso os cortes de rodovias, cuja rutura ocasionam apenas uma obstrução parcial da estrada.
- b) - Cortes cujo custo de rutura é muito elevado. São os cortes situados a montante de obras de arte, de edificações, embóques de túneis, nas ombreiras de barragens etc...

No primeiro grupo, por ser o custo de rutura baixo, o valor ótimo de  $E$ , obtém-se com  $P_r$  relativamente elevado, e portanto  $C_i$  baixo. Nestes casos os taludes devem ser projetados empiricamente, com investigações geológicas apenas de superfície, baseadas nas experiências em locais geológico e climatologicamente semelhantes.

Referente ao segundo grupo, devido ao elevado custo de  $C_r$ , a otimização de  $E$  é obtida minimizando  $P_r$ . Isto só é conseguido através de uma investigação geotécnica detalhada, e, principalmente, observando o comportamento do talude, através de piezômetros e inclinômetros.

O terceiro caso seria uma situação intermediária das mencionadas acima. O método de projeto depende de cada caso

em particular, sendo um meio-termo entre o empírico e o semi-analítico, apresentados anteriormente.

2a. PARTE

ANÁLISE DO DESLIZAMENTO DE UM TALUS

## 1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO DESLIZAMENTO: LOCALIZAÇÃO, GEOLOGIA E HISTÓRICO

O escorregamento em análise ocorreu na encosta do Morro dos Urubus, na parte voltada para Terra Nova e Pilares (subúrbios da cidade do Rio de Janeiro), em região de talus sobrejacente a solo residual de gnaisse.

A rocha do maciço é um biotita-gnaisse, de origem precambriana, apresentando caráter milonítico em alguns trechos. A característica biotita-gnaisse é evidenciada pela xistosidade e pelo bandeamento de minerais claros (quartzo e feldspato) e escuros (mica biotita).

O maciço rochoso é totalmente cortado por diques de aplitos e material silicificado, como também, por um fraturamento com sistema preferencial de juntas na direção NW-SE e mergulho para sudoeste. A xistosidade do biotita-gnaisse apresenta também um "strike" NW-SE com inclinação variando de 25° a 30° para sudoeste. O estudo da geologia estrutural da rocha foi-nos facilitado pela existência de uma pedreira situada na encosta do morro, no lado oposto ao deslizamento.

O escorregamento ocorreu no dia 8 de abril de 1966. Os primeiros indícios de deslizamentos de terra, segundo moradores locais, remontam a 30 anos atrás, quando determinada parte da encosta cedeu. Nos anos que se seguiram houve a repetição de tais ocorrências, sempre em menor escala. Estas informações, quanto não nos forneçam dados precisos dos escorregamentos anteriores, apresentam subsídios importantes para a análise de estabilidade, conforme veremos.

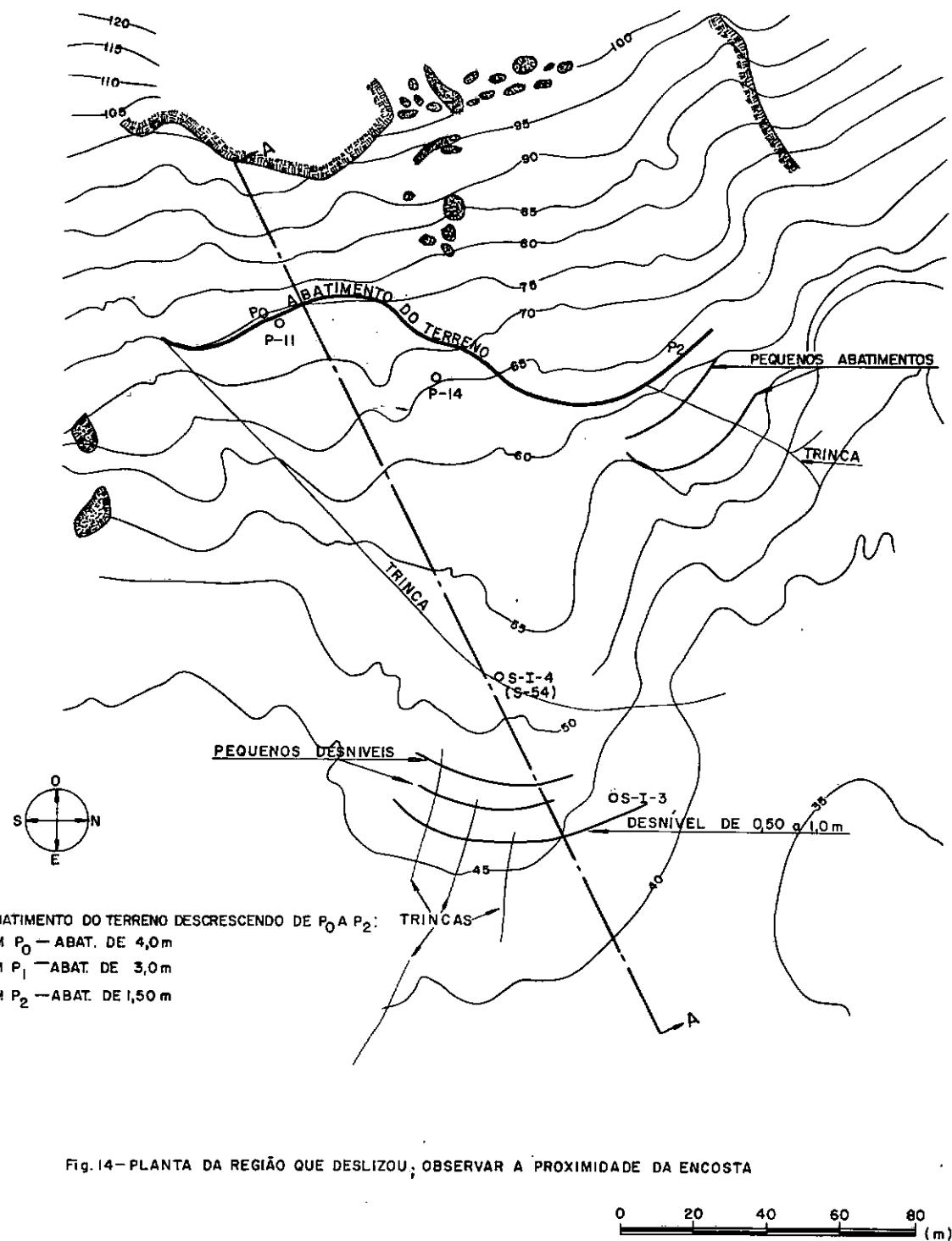
As investigações geotécnicas, ora analisadas, foram realizadas após a ocorrência do deslizamento.

## 2 - CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DA ÁREA DO DESLIZAMENTO

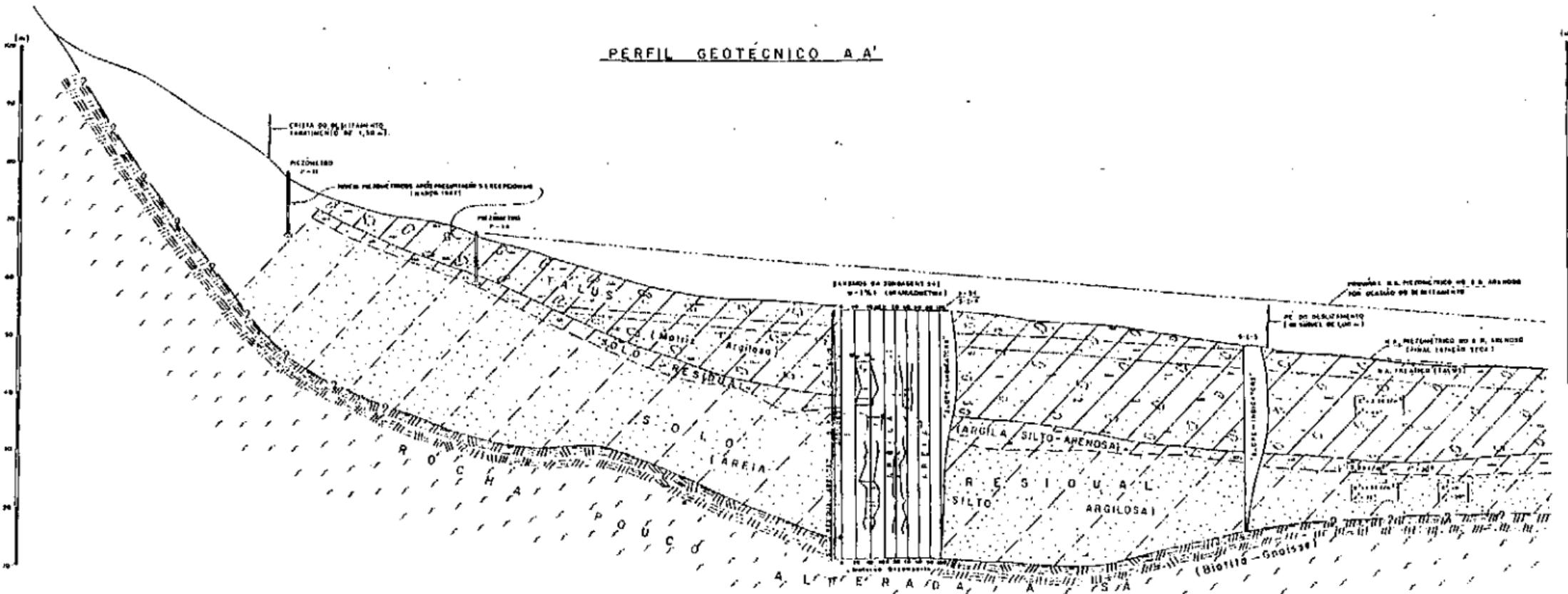
## 2.1 Perfil Geotécnico

Na figura 14 é apresentado em planta, a região da encosta em que ocorreu o deslizamento, com a demarcação das fronteiras do mesmo : uma linha superior correspondente ao abatimento da crista e a indicação, no pé do escorregamento, de trincas e a baulamentos do terreno.

O perfil geotécnico ao longo da direção do deslizamento principal (AA') é apresentado na figura 15.



PERFIL GEOTÉCNICO A.A.



## NOTAS

- 1- AS INVESTIGAÇÕES GLOBAIS E AS DESMEMBRAMENTOS  
PARTEMOS E SÍNTESES INDIVIDUAIS E HABITUAIS ALAVANCAIS  
AMBIENTAIS E DESMEMBRAMENTO DO LIMITE.

2- AS DEFORMAÇÕES HORIZONTALS DURMAIS NOS QUADRANTES  
SISTEMATIZADAS E SISTEMATIZADAS VALORIZADAS QUADRANTES.

3- AS PROBLEMAS SISTEMATIZADOS E DESMEMBRAMENTOS HABITUAIS  
A-NO DENTAL TACONHOLICO, INFERIOR, ANTERIOR, DIA-  
RIO, TONICO DA SUBLINHADE, DO, NO PÉ, NO OS HABITUAIS  
ANGUOSO E AMBIENTAL DO SÓLIDO RESIDUAL.

4- ESCALA, 1.000.

## 2.2 Propriedades Geotécnicas dos Solos

## 2.2.1 Introdução

Os ensaios de laboratório apresentados a seguir, foram realizados em amostras extraídas por meio do amostrador tipo "Denison", na sondagem contínua S-54, cujo perfil é apresentado , de forma esquemática, na figura 16.

Profundidade (m)	DESCRÍÇÃO DO SOLO	
TALUS		MATRIZ DE TALUS - Argila siltosa pouco arenosa, marrom escura.
3,70		ALTERAÇÃO DE MATAÇÃO - Areia pouco siltosa. Textura de gnaiss alterado.
7,90		MATRIZ DE TALUS - Argila siltosa pouco arenosa marrom escura.
9,50		ALTERAÇÃO DE MATAÇÃO - Areia pouco siltosa e argilosa, micácea c/ textura de gnaiss alterado
12,25		MATRIZ DO TALUS - Argila siltosa pouco arenosa, marrom escura. Grãos de feldspato branco argilosas até 0,5 cm
17,05		SOLO RESIDUAL (IB) - Argila muito siltosa, micácea, arenosa, cinza esverdeado com textura de gnaiss muito alterado.
20,75		
RESIDUAL		
		SOLO RESIDUAL (IB) - Areia siltosa pouco argilosa, variegada com textura de gnaiss muito alterada, veios esparsas de decomposição de pegmatita.
ROCHA ALTERADA II		Gnaiss alterado ( biolita - gnaiss )
41,75		Diáclases formando, de um modo geral, 20° c/ a horizontal
44,70		
46,18		
47,30		
ROCHA SA III		Gnaiss são ( biotita - gnaiss )
48,50		
50,00		

Recuperação %  
0 20 40 60 80

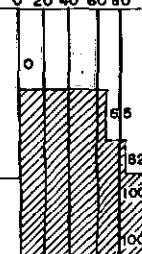


Fig. 16 - Sondagem continua. - S-54

## 2.2.2

## Propriedades Geotécnicas do Tálus

O depósito de tálus é constituído por uma matriz argilosa que envolve matações decompostos e sãos. Estes matações ocupam de 25 à 40% da massa global do tálus.

Os ensaios de caracterização e de resistência ao cisalhamento realizados nos materiais do depósito de tálus, a matriz argilosa e os matações decompostos, ao longo da sondagem S-54, são apresentados na tabela 2 e nas figuras 17-a e 17-b.

## I - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

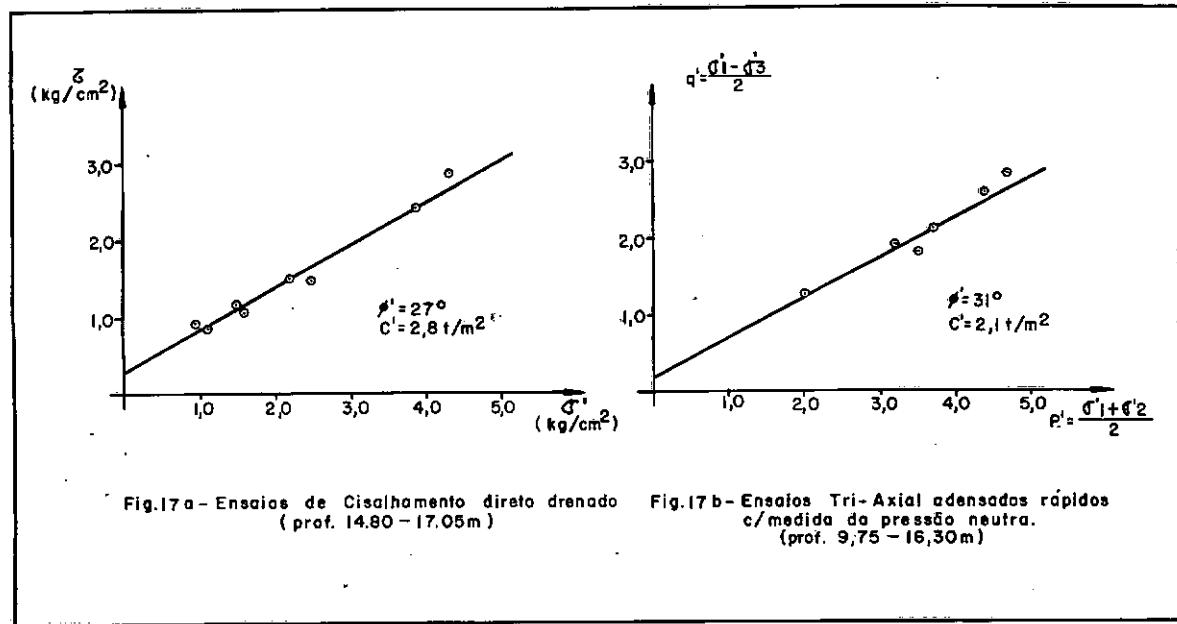
Prof. (m)	Mat.	Limites			Granulometria		
		$W_1$	$W_p$	$I_p$	Arg.	Silte	Areia
8,50 - 9,10	Matriz	39,8	20,5	19,3	24	19	57
13,48 - 14,16		48,6	26,2	22,4	32	14	54
14,86 - 15,20		42,3	21,2	21,1	33	17	50
15,70 - 16,30		40,1	19,7	20,4	31	13	56
6,64 - 7,24	Matação decomposta	NP	NP	NP	4	6	90
7,24 - 7,90		*	*	*	13	10	77
14,16 - 14,86		*	*	*	17	11	72

Tab. 2 - Ensaios de Caracterização no Tálus

\* Ensaios não realizados

II - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO  
(Matriz do Táclus)

II - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO (MATRIZ DO TÁLUS)



A diferença nas envoltórias de resistência obtidas deve-se provavelmente à dispersão do depósito. Em vista disto, consideramos para a análise de estabilidade a média dos parâmetros obtidos:  $c' = 2,45 \text{ t/m}^2$  e  $\phi' = 29^\circ$ .

### 2.2.3 Propriedades Geotécnicas do Solo Residual

O solo residual, subjacente ao depósito de talus, mantém ainda a estrutura da rocha de origem (solo residual jovem). Neste solo é possível distinguir duas camadas: uma superior, com 1,0 a 4,5 metros de espessura, constituída por material argiloso bastante micáceo, e uma inferior, com textura arenosa, que se estende até a rocha alterada.

O solo residual arenoso é uniformemente heterogêneo, visto que os ensaios de caracterização indicaram variações erráticas com a profundidade e com a posição em planta, apresen-

tando também valores médios e dispersões semelhantes, quando analisados segundo uma ou outra daquela variável de posição.

Em vista disto, a envoltória média obtida com amostras de uma única sondagem é representativa para toda a camada deste solo.

Na tabela e gráficos que se seguem estão resumidos os ensaios de caracterização e de resistência ao cisalhamento realizados ao longo da sondagem S-54, na camada de solo residual arenoso.

## I - ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

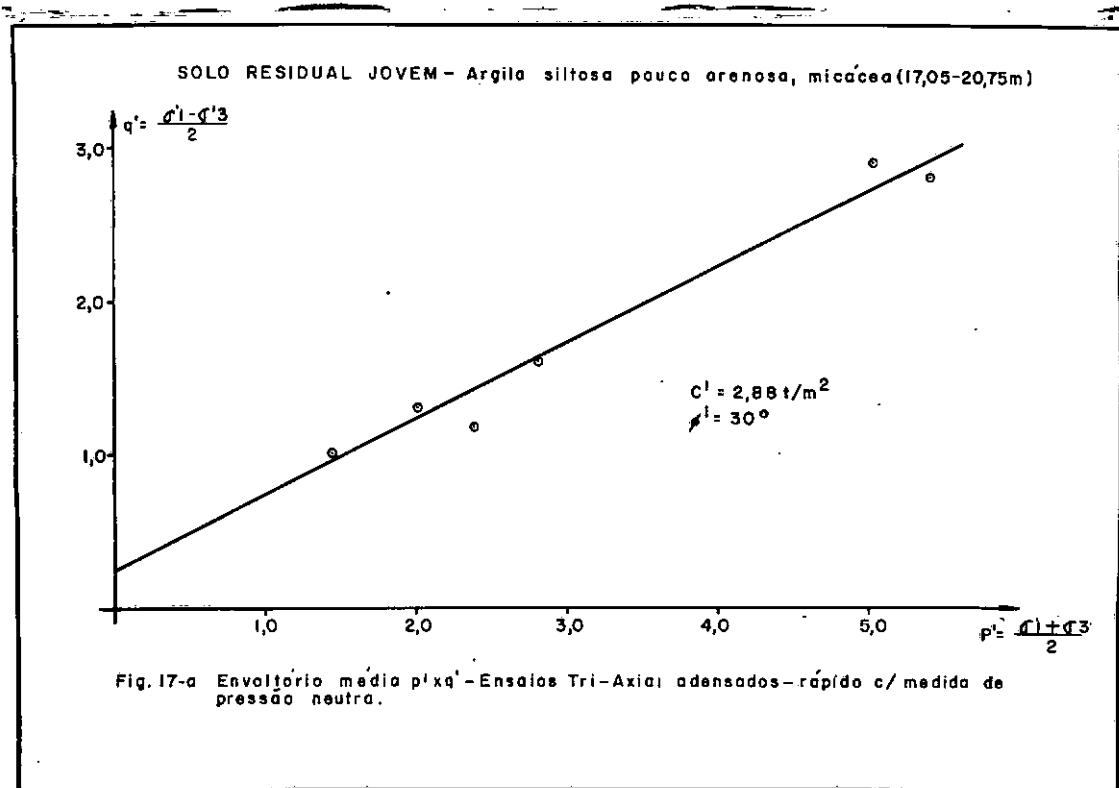
Solo	Prof.	Limites			Granulometria		
		$W_1$	$W_p$	$I_p$	% Arg.	% Silte	% Areia
Solo Residual Jovem Argila silto arenosa	17,08 - 17,70	57,3	33,2	24,1	34	21	45
	17,70 - 18,37	58,2	34,4	23,8	40	25	35
	22,70 - 23,44	46,7	29,5	17,2	14	18	68
	24,24 - 25,05	47,8	33,8	14,0	20	16	64
	25,05 - 25,72	46,9	30,2	16,4	18	17	65
	25,72 - 26,50	47,7	31,8	15,9	14	11	75
	27,35 - 28,00	*	*	*	15	10	74
	29,60 - 30,37	41,5	21,6	19,6	15	12	73
	30,37 - 31,07	49,3	30,2	19,1	15	10	75
	31,73 - 32,55	*	*	*	20	16	64
	32,75 - 33,29	49,3	30,7	18,6	15	15	70
	33,29 - 34,02	49,5	31,0	18,5	18	18	64
	35,53 - 36,33	40,84	28,6	12,6	*	*	*
	36,33 - 37,10	42,8	27,4	15,4	17	15	68
	37,10 - 37,84	39,0	30,3	8,7	16	12	72
	37,84 - 38,60	*	*	*	12	18	70

Tabela 3 - Ensaios de Caracterização no Solo Residual

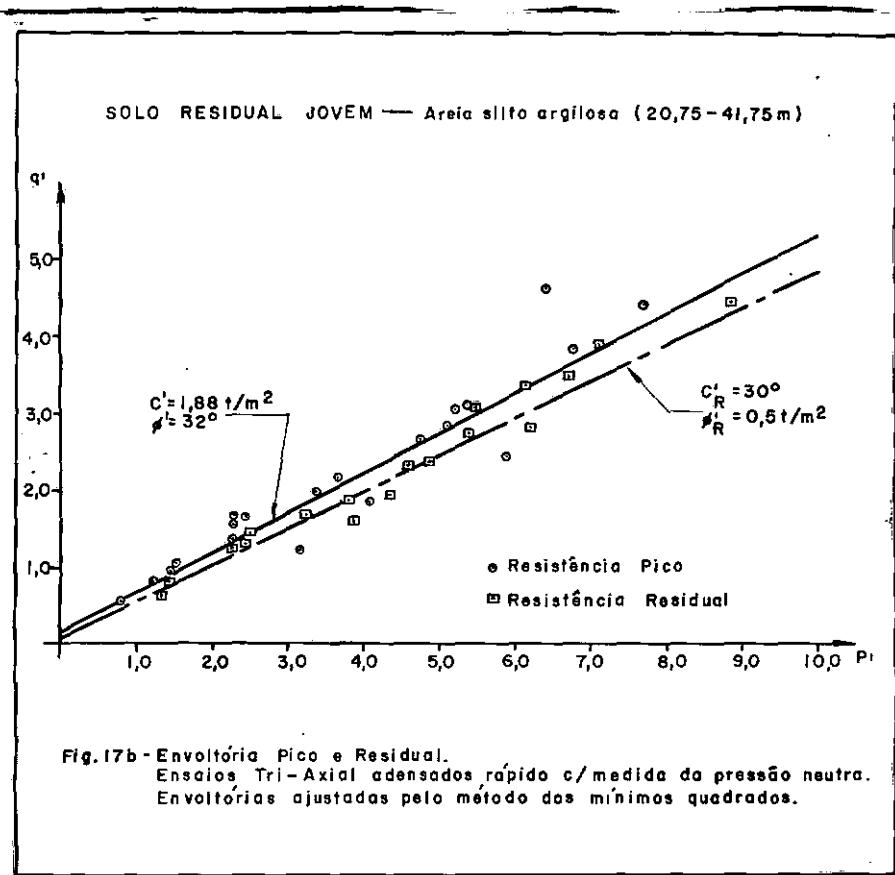
\* Ensaios não realizados

## II - ENSAIOS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

## III.1 - Solo residual jovem: ARGILA siltosa pouco arenosa micácea



## II.2 - Solo residual jovem: AREIA silto argilosa



## 2.3

## Hidrologia Sub-superficial

Os níveis d'água, freático - na camada de talus - e artesiano - no solo residual - , no final da estação seca estão indicados no perfil geotécnico apresentado na figura 15.

A variação destes níveis d'água com as precipitações só foi observada em dois pontos - P-11 e P-14 - (vide figura anteriormente citada), em curto período de tempo, e após o deslizamento, nos permitindo assim, apenas conclusões gerais no que se refere a hidrologia subterrânea.

Para melhor interpretação da relação entre as variáveis precipitação e pressão neutra, consideramos a precipitação acumulada em determinado período de dias. O intervalo de tem-

po de acumulação das precipitações que melhor possibilite a referida interpretação, depende das características hidrológicas de cada talude, e foi obtido por tentativas.

Nos gráficos a seguir são apresentadas a variação destas variáveis com o tempo, para os piezômetros P-11 e P-14.

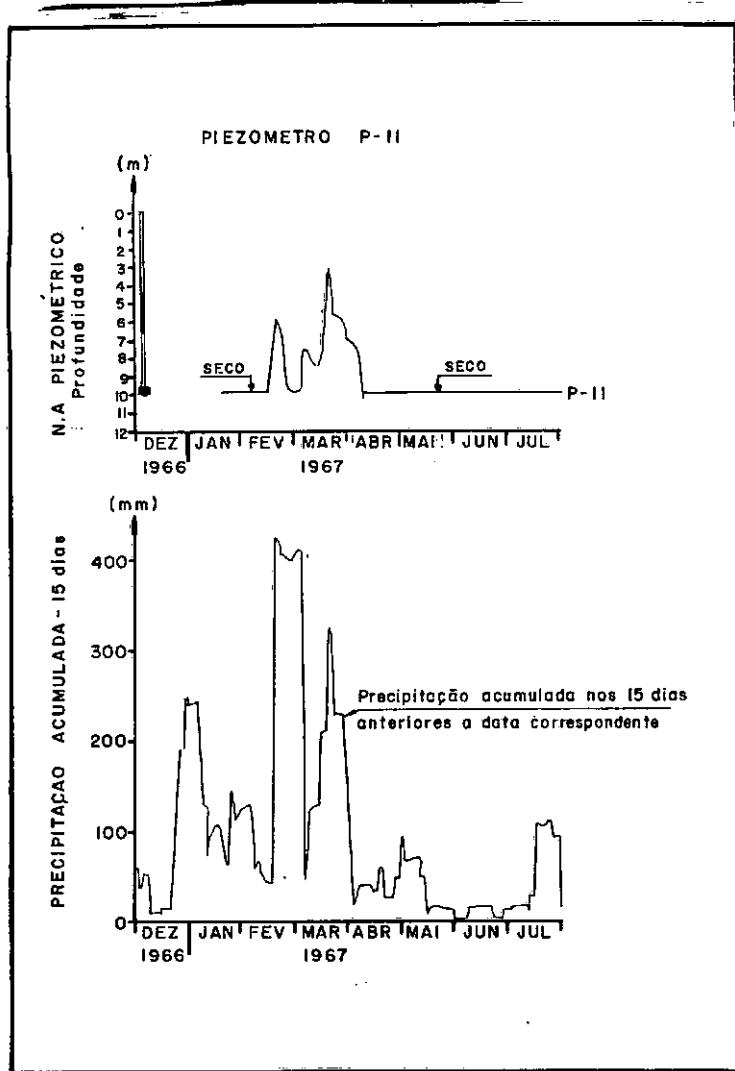


Fig.19a—OBSERVAÇÕES PIEZOMETRICAS P-11

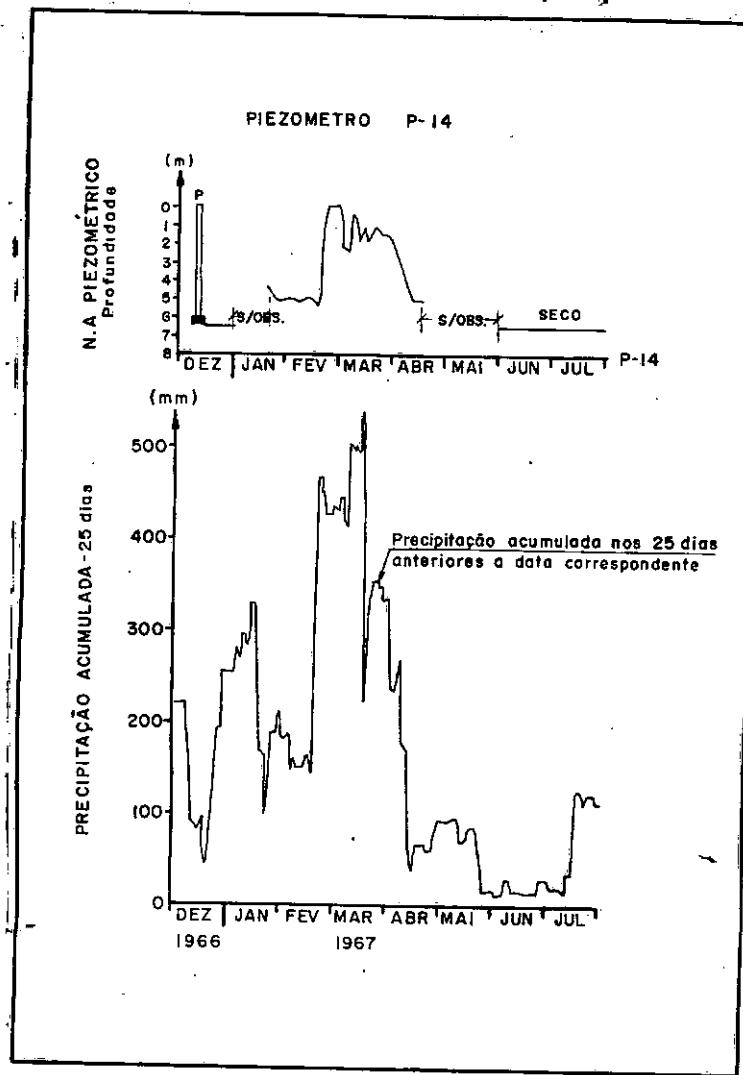


Fig. 19 b – OBSERVAÇÕES PIEZOMETRICAS P-14

A partir do perfil geotécnico e dos gráficos anteriores, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

1 - O depósito de talus, argiloso, sobrejacente ao solo residual, arenoso, propicia a formação de um lençol artesiano neste solo.

2 - A variação do nível d'água na parte superior da encosta possibilita o desenvolvimento "momentâneo" de pressão neutra ao longo de toda camada de solo residual jovem, talude abaixo.

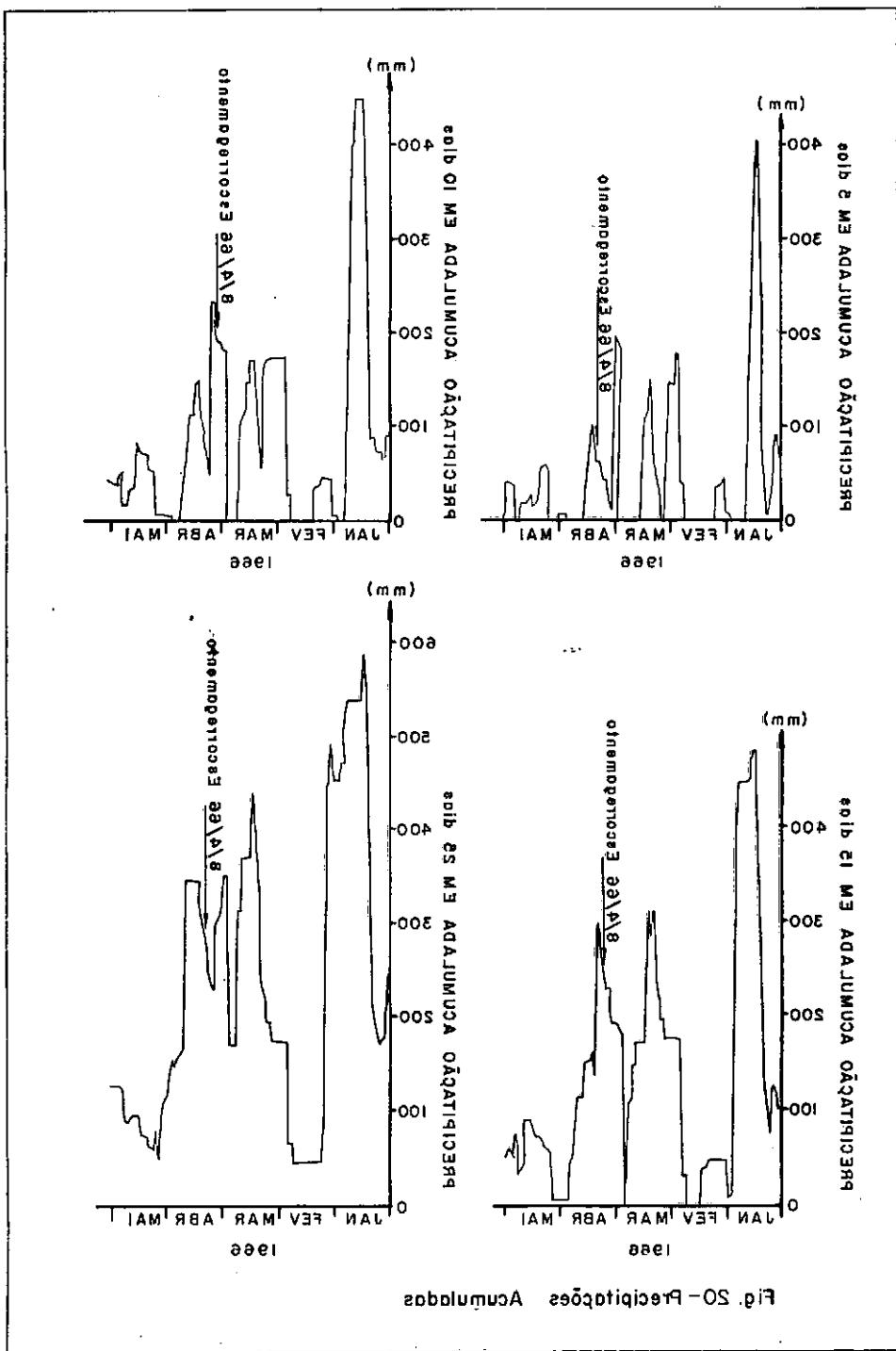


Fig. 20 - Precipitation - Accumulations

3 - O tempo de retardo (tempo entre a precipitação e o início da variação do N.A.), de 1 a 2 dias para o P-11 e de 4 dias para o P-14, obtido através da comparação entre as precipitações diárias e as variações piezométricas, indica a existência de caminhos preferenciais de infiltração.

4 - A amplitude da variação dos níveis d'água piezométricos, superior a 5 metros, em 4 dias, indica que uma considerável parcela de infiltração é devido à precipitação acumulada na área da escarpa, a montante, e infiltrada pelo contato tálus-maciço rochoso.

5 - Para o P-11, mais perto da encosta rochosa, a correlação da variação piezométrica com a precipitação acumulada é obtida considerando um período de acumulação de 15 dias. Para o P-14, correlações mais expressivas são obtidas considerando um período de acumulação de 25 dias.

## 3 - ANÁLISE DO DESLIZAMENTO

As análises de estabilidade de taludes naturais devem partir do estabelecimento dos tipos possíveis de superfícies de ruptura, baseados nas características geotécnicas do terreno, ao cálculo da estabilidade do maciço, e não pelo procedimento inverso, puramente matemático, que consiste na obtenção das superfícies potenciais de deslizamento, em função dos resultados dos cálculos de estabilidade realizados em superfícies aleatórias.

Nesta análise, adotamos o método acima preconizado. Assim, eliminamos de início superfícies de ruptura circulares. De fato, estas superfícies se aproximam da realidade somente quando todo o talude possui propriedades geotécnicas (resistência ao cisalhamento, hidrologia sub-superficial, etc. ...), homogêneas, ou estatisticamente homogêneas, o que não é o caso em questão.

No deslizamento em estudo, a interpretação conjunta da topografia, do mapeamento das fissuras na superfície do talude, do perfil geotécnico - prioritariamente da hidrologia subsuperficial - e das observações (qualitativas) após o deslizamento, dos "slope-indicators", nos conduziu, em primeira análise, a consideração de três possíveis configurações de ruptura:

- a - ao longo do contato tálus-solo residual argiloso;
- b - ao longo da superfície hipotética entre solo residual argiloso e solo residual arenoso;
- c - no solo residual arenoso, incluindo o contato deste com a rocha alterada, subjacente.

Vejamos como chegamos a estas configurações de ruptura:

- 1 - Encostas com topografia suave apresentam, em geral, superfícies de ruptura constituídas por uma linha reta (ou

arcos suaves) e cunhas ativas e passivas.

2 - A direção do deslizamento principal, obtido através do mapeamento das fisuras e abatimentos do terreno, e das observações dos "slope-indicators", é segundo AA'. Os abatimentos indicados em planta, como secundários, foram devido ao deslizamento principal.

3 - Os ensaios de resistência ao cisalhamento realizados nos três "tipos de solos" (matriz do talus, solo residual argiloso e solo residual arenoso) não apresentaram diferenças sensíveis nas envoltórias de ruptura. Sendo assim, as superfícies de deslizamento são comandadas pela hidrologia subterrânea, em particular, pelos contornos da mesma.

4 - As observações dos "slope-indicators", após o deslizamento, indicam deformações cisalhantes ao longo de toda a espessura de solo residual, com distorções praticamente nulas na massa de talus.

Passemos agora, ao cálculo da estabilidade do talus de propriamente dito, começando pela análise da variável pressão neutra.

A falta de observações piezométricas, por ocasião do deslizamento impede uma análise mais precisa do mesmo. Entretanto, podemos estimar a distribuição das pressão neutras através das precipitações pluviométricas.

Nas figuras abaixo estão plotadas as precipitações acumuladas (5, 10, 15 e 25 dias) no período em que ocorreu o deslizamento.

Comparando estas precipitações com as ocorridas em 1967 (vide figura 19), ocasião em que não houve um novo deslizamento, verificamos que as pressões neutras, quando do deslizamento, devem ter sido um pouco superior às desenvolvidas em 1967.

O nível piezométrico provável, no solo residual, por ocasião do deslizamento, utilizado para o cálculo de estabilidade, está representado no perfil geotécnico.

Os cálculos de estabilidade realizados apresentaram os seguintes valores:

Superfície de Deslizamento	Parâmetros de Resistência		Fator de Segurança Mínimo
	$c'$ ( $t/m^2$ )	$\phi'$	
TALUS X S. RESIDUAL	2.45	29°	1.77
S. Residual Argiloso X S. Residual Arenoso	1.80	32°	1.56
SOLO RESIDUAL ARENOSO	1.80	32°	2.0

Tabela 4

Como ocorreu a rutura, o fator de segurança devia ser 1.0. A diferença entre o valor real e o obtido nos cálculos é então devido a considerações erradas nas variáveis de cálculo: pressão neutra ou parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Quanto a pressão neutra, o valor adotado provavelmente já seja um pouco superior ao que tenha realmente atuado.

Passemos então a uma análise mais detalhada da resistência ao cisalhamento associada ao provável mecanismo de rutura. Conforme nos referimos no início, alguns moradores locais

menzionaram a ocorrência de pequenos movimentos nos últimos 30 anos. Além disso, as observações dos "slope-indicators", posteriores ao deslizamento, indicam que a massa de solo residual se encontra em "creep" contínuo.

Por outro lado, se analizarmos as precipitações a cumuladas da figura 20 verificamos que as pressões neutras no momento da rutura provavelmente não tenham sido as máximas daquele período pluvioso.

A partir das considerações acima, verificamos não ser correta a análise do talude como uma massa estável, que só se movimentou na ocasião da rutura, mobilizando a resistência pico, conforme hipótese admitida implicitamente nos cálculos anteriores resumidos na tabela IV.

É de se esperar que os movimentos anteriores do talude, e principalmente os anteriores (2 meses) a rutura, devido as pressões neutras elevadas tenham levado a resistência ao cisa-lhamento ao valor residual.

Considerando os parâmetros da resistência residual ( $c'_r = 0$  e  $\phi'_r = 30$  ), chegamos aos seguintes valores do fator de segurança:

- No contato talus-solo residual F.S. = 0.93
- Entre o solo residual argiloso e o solo residual arenoso F.S. = 1.04
- No solo residual arenoso F.S. = 1.60

Estes resultados confirmam a hipótese formulada com relação a mobilização da resistência residual do solo na rutura.

A superfície provável de rutura foi ao longo do

contato tálus-solo residual ou entre o solo residual argiloso e o solo residual arenoso, não dispondo de dados suficientes para conhecer a sua localização precisa.

## 4 - CONCLUSÕES

As análises de deslizamentos de taludes naturais de tálus e solos residuais - suas causas e mecanismos - são muito complexas, necessitando de uma investigação geotécnica detalhada e observações da pressão neutra e dos movimentos do talude antes do escorregamento, durante um longo período de tempo.

O reduzido número de dados disponíveis nos leva a considerar as conclusões apresentadas abaixo, com reservas, que necessitam de comprovações, com outros taludes geotecnicalemente semelhantes e em locais também climatologicamente semelhantes.

Em resumo, as conclusões que podemos tirar são as seguintes:

- A hidrologia subterrânea do talude analisado é comandada por caminhos preferenciais de percolação. O maciço rochoso funciona como bacia de acumulação das precipitações cuja água infiltra no solo preferencialmente no contato talus-maciço rochoso.
- O depósito de tálus, argiloso, sobrejacente ao solo residual, arenoso, propicia a formação de um lençol artesiano. A variação do nível d'água na parte superior da encosta possibilita o desenvolvimento de pressões neutras elevadas, com pequeno período de retardo (inferior a uma semana), ao longo de toda camada de solo residual arenoso, talude abaixo.
- A resistência ao cisalhamento realmente mobilizada "in-situ" em solo residual e tálus, depende das deformações ocorridas anteriormente. No talude analisado é provável que no momento da rutura tenha sido mobilizada apenas a resistência residual do solo residual.

A N E X O S

## ANEXO A - SUGESTÕES PARA PESQUISAS

- 1 - Estabelecimento de parâmetro de fácil obtenção que apresente correlação significativa com o grau de intemperismo.  
Até que ponto o índice de vazios pode ser indicativo do grau de intemperismo?
- 2 - Interpretação da coesão efetiva nos solos residuais maduros.
- 3 - Interpretação da coesão efetiva nos solos residuais jovens.
- 4 - Análise da variação da coesão efetiva nos solos residuais maduros e jovens, com o grau de saturação.
- 5 - Verificação da possibilidade de obtenção da dispersão dos solos residuais jovens, quanto a resistência ao cisalhamento, a partir do conhecimento da dispersão do índice de vazios.
- 6 - Análise da variação da resistência ao cisalhamento, em solos residuais jovens, com a variação do plano de rutura em relação ao "plano de xistosidade do solo".  
A partir de qual grau de intemperismo (ou índice de vazios?), o solo passa a ser isotrópico quanto a resistência ao cisalhamento?
- 7 - Observação da hidrologia subterrânea por meio de piezômetros e sua correlação com as precipitações.
- 8 - Estabelecimento de tabelas para projetos de taludes pelo método

do empírico, a partir de uma observação sistemática das carac  
terísticas de taludes existentes: geologia local; perfil de  
intemperismo; altura, comprimento e inclinação do talude; sis  
tema de drenagem; condições de estabilidade; idade do talude  
etc. .

9 - Observações de movimento do talude por meio de "slope-indica-  
tors". Análise de resistência mobilizada "in-situ" a partir  
das deformações cisalhantes obtidas pelos "slope-indicators".  
Comparação da resistência "in-situ" com a obtida através en-  
saios de laboratório de "creep-rutura".

## ANEXO B

BIBLIOGRAFIA

TAYLOR, D.W., 1966. "Fundamentals of Soil Mechanics" -

Wiley International Edition, Copyright 1948.

— X —

- 1 - D'APPOLONIA, E.; ALPERSTEIN, R.; 1967. "Cehavior of a Colluvial Slope"; Journal Soil Mech. and Found Div., A.S.C.E. 93, SM 4, pp. 447 - 473
- 2 - BARATA, F.E., 1969 - "Landslides in the Tropical Region of Rio de Janeiro" - Proc.7th Int.Conf.Soil Mech.Found. Eng., Vol.2, pp. 507-516
- 3 - BISHOP, A.W., 1955 - "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Earth Slopes" - Geotechnique, vol. 5, pp. 7 - 17
- 4 - BISHOP, A.W., and HENKEL, D.J., 1957 - "The meassurement of Soil Properties in the Triaxial Test", London, Arnold
- 5 - BJEERRUM, L., 1967 - "Progressive Failure in Slopes of Over- Consolidated Plastic Clay and Clay Shales", Journal Soil Mech.and Found.Div., A.S.C.E 93, SM 5, pp. 3 - 49
- 6 - CHAO, L.L., 1969 - "Statistics: Methods and Analysis". Mc. Graw-Hill
- 7 - CHUGAEV, R.R., 1966 - "Stability Analysis of Earth Slopes"; Israel Program for Scientific Translations; Jerusalém

- 8 - DA COSTA NUNES, A.J., 1973 - "Fatores Geomorfológicos e Climáticos na Estabilidade de Taludes de Estradas" - Tópicos de Geomecânica nº 11
- 9 - DEERE, D.V.; PATTON, F.D., 1971 - "Slope Stability in Residual Soils", Proc. 4th Pan. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., State of Art Volume (Puerto Rico) pp. 87-170
- 10- FERRY BORGES, J.; CASTANHETA, M.; 1971 - "Structural Safety", 2 nd edition - L.N.E.C. (Lisboa)
- 11- FOX, P.P., 1957 - "Geology Exploration and Drainage of Serra Slide, Santos, Brasil". Eng. Geol. Case Histories, 1, pp. 17 - 23
- 12- FRANCISS, F.O., 1967 - "Breves considerações sobre a Influência do Regime Hídrico Subsuperficial e a Estabilidade de Encostas Terrosas"
- 13- GOULD, J.P., 1960 - "A Study of Shear Failure in Certain Tertiary Marine Sediments". Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils, A.S.C.E., Bouldir, Colorado.
- 14- GOULD, J.P.; DUNNCLIFFT, C.J.; 1971 - "Accuracy of Field Deformation Measurements". Proc. 4th Pan. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Porto Rico, vol. 1, pp. 313 - 366
- 15- GRIM, I.R.; BRADLEY, W.F.; 1963 - "Clay Mineral Composition and Properties of Deep Residual Soils from São Paulo, Brasil". Proc. 2nd Pan. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Brasil, vol.1, pp. 63-72

- 16 - HOOPER, J.A., and BUTLER, F.G.; 1966 - "Some Numerical Results Concerning the Shear Strength of London Clay", Geotechnique, vol. 16, pp. 282-304
- 17 - JOHN, B.J.; SOWERS, G.F.; WEAVER, E.-1969 - "Slickensides in Residual Soils and their Engineering Significance", Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. Found. Eng., vol. 2 - pp. 591 - 597
- 18 - LITTLE, A.L., 1967 - "Laterites", Proc. 3rd Reg. Asian Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. (Haifa) vol. 2, pp. 61 - 71.
- 19 - LUMB, P., 1962 - "Effect of Rain Storms on Slope Stability", Symposium on Hong Kong Soils, Paper 71, pp. 73-87
- 20 - LUMB, P., 1962 - "The Properties of Decomposed Granite", Geotechnique 12, vol.3, pp. 226 - 243
- 21 - LUMB, P., 1965 - "The Residual Soil of Hong Kong", Geotechnique 2, vol. 15, pp. 180 - 194
- 22 - LUMB, P., 1966 - "The Variability of Natural Soils", Can. Geot. Journal (1966) 3, pp. 74 - 97
- 23 - DE MELLO, V.F.B., 1963 - "Discussão sobre Propriedades dos Solos", Seg. Cong. Pan. de Mec. dos Solos e Eng. de Fund. (Brasil) vol. ii, pp. 561 - 566
- 24 - DE MELLO, V.F.B., 1972 - "Recomendações Referentes a Estudos Geológicos e Geotécnicos para Barragens", VIII Sem. de Gde. Bar. (São Paulo
- 25 - MORGENSTERN, N.R.; and PRICE, V.E., 1965 - "The Analisys of the Stability of General Slip Surfaces", Geotechnique, vol.13, pp. 121 - 131

- 26 - NOGAMI, J.S., 1970 - "Classificação e Terminologia para Macro Estruturas Naturais de Solo", Anais da 2ª Semana Paulista de Geologia Aplicada (São Paulo) vol. I, pp. 55 - 67
- 27 - PECK, R.B., 1967 - "Stability of Natural Slopes", Journal Soil Mech. and Found. Div. A.S.C.E., SM4 pp. 403 - 436
- 28 - PHILIP, J.R., 1957 - "The Theory of Infiltration", Soil Science part 1, 83, pp. 345, - 357.
- 29 - PHILIP, J.R., 1957 - "The Theory of Infiltration", Soil Science part 4, 84 pp. 257 - 264
- 30 - QUEIROZ, L.A., 1965 - "Discussion on Mechanism of Development of Slides in Embankments and Slopes", Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. (Montreal) vol. 3, pp. 542-544
- 31 - RUDDOCK, E.C., 1969 - "Properties and Position in Lateritic Ground: Some Statistical Relationship", Proc. of the Speciality Session Eng. Prop. of Lat. Soils - 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found
- 32 - SAITO, M.; UEZAWA, H.; 1961 - "Failure of Soil due to Creep" Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Eng., Paris, vol. I, pp. 315 - 318
- 33 - SINGH, A.; MITCHELL, J.R.; 1968 - "General Stress - Strain - Time Function for Soils". Journal of Soil Mech. and Found. Div., A.S.C.E., Janeiro 1968

- 34 - SINGH, A.; MITCHEL, J.K.; 1970 - "Creep Potencial and Creep Rupture of Soils". Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found., México, Vol. I, pp. 379 - 384
- 35 - SANDRONI, S.S., 1973 - "Resistência ao Cisalhamento dos Solos Residuais das Encostas da Guanabara"; Grupo de Solos; Deptº de Eng. Civil; PUC-RJ - Série Pesquisa 01.
- 36 - SOUNDER, M.K., and FOOKE, P.G., 1970 - "A Review of the Relationship of Rock Weathering and Climate and its Significance to Foundation Engineering" Eng. Geol. 4, pp. 289 - 325
- 37 - SERAFIN, J.L. and RIDRUEJO, F.S., 1966 - "Calculation of Stability of Slopes of Dams Foundations". Proc. 1st Congr. of the Int. Society of Rock Mechanics. Lisboa. Vol. 2, pp. 645 - 649
- 38 - SKEMPTON, A.W., 1964 - "Long-Term Stability of Clay Slopes", Geotechnique 14, pp. 77 - 101
- 39 - SKEMPTON, A.W., 1969 - "Stability of Natural Slopes and Embankment Foundations" - State of Art Report State of Art Volume - Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found Eng. México, pp. 291 - 340
- 40 - SOWERS, G.F., 1963 - "Engineering Properties of Residual Soils Derived from Ignous and Metamorphic Rocks", Proc. 2nd Panam. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Brasil, vol. 1, pp. 39-62

- 41 - SOWERS, G.F., 1967 - Discussion, Proc. 3rd Pan. Conf. on Soil Mech. and Found Eng., Caracas, vol. 3, pp. 160 - 461
- 42 - TEIXEIRA, A.H., KANJI, M.A., 1970 - "Estabilização do Escorregamento da Encosta da Serra do Mar na Área da Cota 500 da Via Anchieta", Anais do 4º Congr. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. de Fundações, vol. 1, pp. IV-33 - IV-53
- 43 - TERZAGHI, K. and PECK, R.B., 1967 - "Soil Mechanics in Engineering Practice" 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 430 - 433
- 44 - TERZAGHI, K., 1967 - "Mechanism of Lanslides", From Theory to Practice in Soil Mechanics, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 119 - 120
- 45 - U. NASCIMENTO; FALCÃO, C.B., 1971 - "Segurança e Coeficiente de Segurança em Geotecnia", Geotecnia, vol.1, pp.31-46
- 46 - VARGAS, M., 1953 - "Some Engineering Properties of Residual Clay Soils Occurring in Southern Brazil", Proc. 3th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., vol. 1, pp. 67 - 71
- 47 - VARGAS, M. e PICHELER, E., 1957 - "Residual Soil and Rock Slides in Santos, Brasil", Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., London vol,2, pp. 394 - 398
- 48 - VARGAS, M., 1966 - "Estabilização de Taludes em Encostas de Gnaisses Decompostos", Anais do 3º Congr. Bras. de Mec. dos Solos., vol.1, VI pp. 32-55

- 49 - VARGAS, M., 1967 - "Design and Construction of Large Cuttings in Residual Soils", Proc. 3rd Pan. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Caracas, vol.2, pp. 243 - 254
- 50 - VARGAS, M., 1969 - "Residual Soil Sampling Practice in Brazil" Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and. Found. Eng., Esp. Sec. on Soil Sampling, México, pp. 50 - 53
- 51 - VARGAS, M., 1970 - "Origem, Propriedades e Natureza dos Solos Residuais Indeformados. Pontos ainda não Esclarecidos e Pesquisas Necessárias", Publicação 2/70 - COPPE/UFRJ (Propriedades Mecânicas dos Solos Residuais - Jaques de Medina Editor):
- 52 - WALTERS, R.C.S., 1971 - "Dam Geology", 2nd Ed., Butterworth & Co., London, pp. 59 - 62
- 53 - WU, T.H.; KRAFT, L.M.; 1970 - "Safety Analisys of Slopes", Journ. of Soil Mech. and Foun. Div. A.S.C.E. 96, SM 2, pp. 609 - 630
- 54 - YOUNG, A., 1972 - "Slopes", Olivier and Boyd, Edinburgh
- 55 - ZÁRUBA, Q., MENCL, V., 1969 - "Landslides and Their Control". Elsivier, Prague.