

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DA EROÇÃO SUPERFICIAL NOS TALUDES DE CORTE,
DE ESTRADAS DO NORDESTE BRASILEIRO

POR

ABEL GALINDO MARQUES
PROFESSOR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - U. F. A. L.

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA
JULHO - 1977

À minha esposa Mercedes e minha
filha Juliane Andréia pelo
incentivo e sacrifício dedicados
a mim, tornando possível a
concretização deste trabalho.



M357e

Marques, Abel Galindo.

Estudo da erosão superficial nos taludes de corte, de estradas do nordeste brasileiro / Abel Galindo Marques. - Campina Grande, 1977.

113 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1977.

"Orientação : Prof. Gunther E. Bauer".

Referências.

1. Solos - Erosão - Nordeste - Brasil. 2. Taludes de Corte - Erosão. 3. Estradas - Erosão Superficial. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Bauer, Gunther E. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 631.6.02(812/813)(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CCT

ESTUDO DA EROSÃO SUPERFICIAL NOS TALUDES DE
CORTE, DE ESTRADAS DO NORDESTE BRASILEIRO

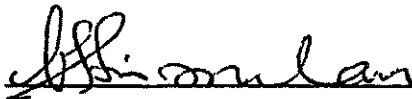
Abel Galindo Marques

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NE
CESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

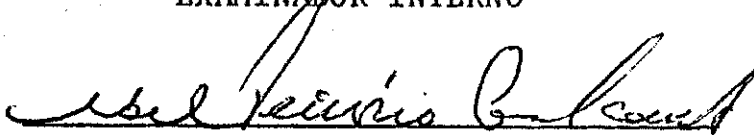
APROVADA:



PROF. GUNTHER E. BAUER
PRESIDENTE



PROF. VAJAPEYAM S. SRINIVASAN
EXAMINADOR INTERNO



PROF. ABEL T. CAVALCANTE
EXAMINADOR EXTERNO

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
JULHO - 1977

A STUDY OF SURFACE EROSION ON THE SLOPES
OF HIGHWAY CUTS IN THE NORTHEAST OF BRAZIL

M.Sc. Dissertation

by

Abel Galindo Marques

ABSTRACT

The study presented in this dissertation, treats analysis and arguments concerning problems of erosion on the slopes of highway cuts some highways located in the Northeast of Brazil.

In this work si presented a critical bibliografic review of present known facts of the phenomenon of erosion in soils, emphasizing the principal parameters of soils susceptible to erosion and their physicol characteristics.

The fiels study was concentrated in six natural slops cuts. The principal parameters, such as, grain size distribution, Atterberg Limits, specific gravit, cohesion and internal friction were determined in the Laboratory.

Chemical analysis of some of the component elements of the soils were conductec'to compliment the experimental date.

Arguments and analysis are presented based on the local topography, drainage of the slops cuts and geological structures, relating these to experimental date. The conclusions are based on geotectonic characterisistics of the soils encountered (on the slopes of cut) as well as the degree of weatherability of these soils.

ESTUDO DA EROÇÃO SUPERFICIAL NOS TALUDES DE
CORTE, DE ESTRADAS DO NORDESTE BRASILEIRO

Tese de Mestrado

por

Abel Galindo Marques

SUMÁRIO

O estudo apresentado nesta dissertação trata de análises e discussões sobre problemas de erosão em taludes de corte de algumas estradas situadas no Nordeste Brasileiro.

Neste trabalho é apresentada uma revisão crítica bibliográfica dos conhecimentos atuais do fenômeno da erosão em solos, destacando-se os principais parâmetros do solo susceptíveis à erosão e ao seu mecanismo.

O estudo de campo foi centralizado em seis taludes naturais. No laboratório, foram determinados os principais parâmetros, tais como: granulometria, Limites de Atterberg, densidade real, coesão e atrito interno.

Análises químicas de alguns elementos componentes do solo, foram realizadas para complementação dos dados experimentais.

Discussões e análises são apresentadas com base na topografia local, drenagem dos taludes, elementos geológicos, relacionando-os com os dados experimentais. A conclusão fundamenta-se nas características geotécnicas dos solos dos taludes como também, no grau de intemperismo destes solos.

Í N D I C E

		Página	
CAPÍTULO	1	INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO	2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
	2.1	Geral	4
	2.2	Parâmetros e Propriedades do solo susceptíveis à erosão	4
	2.2.1	Granulometria	5
	2.2.2	Limites de Atterberg	11
	2.2.3	Compactação	14
	2.2.4	Permeabilidade.3	18
	2.2.5	Tipo e quantidade de mineral de argila	19
	2.2.6	Fluído dos poros	21
	2.2.7	Estrutura e teor de matéria orgânica	25
	2.3	Mecanismo de erosão	27
	2.3.1	Aspecto geral	27
	2.3.2	O passado histórico de um solo e sua estrutura	29
	2.3.3	Depósito materiais não compactados	30
	2.3.4	Depósito compacto	32
	2.3.5	Mecanismo da força de atração	36
	2.4	Estudo analítico da erosão	37
CAPÍTULO	3	INVESTIGAÇÃO DE CAMPO	44
	3.1	Introdução	44
	3.2	Seleção e localização dos taludes	45
	3.3	Descrição dos taludes	48
	3.3.1	Talude 1 e 2	48
	3.3.2	Talude 3	53
	3.3.3	Talude 4	59
	3.3.4	Talude 5	63
	3.3.5	Talude 6	65

		Página	
CAPÍTULO	4	ENSAIOS DE LABORATÓRIO	70
	4.1	Introdução	70
	4.2	Retirada das amostras	70
	4.3	Objetivos e tipos de ensaios	71
	4.4	Apresentação dos resultados experimentais	74
CAPÍTULO	5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	100
	5.1	Aspecto geral	100
	5.2	Observações de campo	101
	5.3	Resultados dos ensaios de laboratório	102
	5.4	Análise e discussão dos dados e resultados experimentais	102
CAPÍTULO	6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
	6.1	Conclusões	108
	6.2	Recomendações	110
		REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
		AGRADECIMENTOS	113

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O fenômeno da erosão em solos tem sido nos últimos anos, fator de preocupação de muitos pesquisadores ligados aos problemas de solos. Em diversos setores do campo da construção civil vem ocorrendo prejuízos devido ao tal fenômeno. Entre eles, destacam - se o setor de construção de estradas de rodagem, construção de barragens e aterros de grandes construções, tais como: edifícios, indústrias, etc.. Mas os problemas maiores estão nas estradas e nas barragens.

Particularmente no Brasil, as verbas destinadas à conservação das estradas são maiores do que as destinadas à construção. A grande maioria dos problemas das estradas brasileiras é causada pela erosão dos taludes de corte e aterro. A erosão aqui tratada é a superficial que também se relaciona diretamente com os problemas de erosão profunda e deslizamentos nos taludes de corte e aterro.

O agente externo responsável diretamente pelos problemas da erosão do solo é a água. Quando esta, em forma de chuva atinge o talude, parte dela se infiltra no solo e parte escoia sobre a superfície do talude, levando consigo grãos do solo da superfície, formando canais e cavidades de dimensões variadas.

A água que escoia por estes canais naturais e que se infiltra nas camadas internas do talude, através das

cavidades por ela produzidas tem ocasionado os seguintes problemas: obstrução das sarjetas, pelo excesso de solo transportado; destruição de drenos profundos, provocando o escoamento d'água pelas camadas internas do pavimento, através do fenômeno de "piping". Este segundo problema ocasiona os deslocamentos dos grãos de solo e o conseqüente enfraquecimento dos aterros das estradas (erosão profunda). A erosão profunda ocorre nas camadas dos solos, devido à formação de canais internos (piping), provocando o rompimento estrutura interna pelo fluxo d'água nestas camadas.

As pesquisas dirigidas ao problema da erosão superficial já realizadas até a data atual, tem sido com ensaios experimentais em laboratório, com objetivo de determinar os principais parâmetros do solo, susceptíveis à erosão. Embora seja comum o uso de algumas medidas preventivas contra erosão superficial nos taludes, tais como: valeta de crista, construção de banquetas com canaletas de drenagem, etc., nunca foi realizado no Brasil um estudo sobre a erosão superficial de taludes de estradas nordestinas, com base em simples observações de campo, ensaios de caracterização de solos e cisalhamento direto.

A metodologia aqui aplicada compreendeu em : estudos de laboratório e de campo. No laboratório foram realizados ensaios de limites de liquidez e plasticidade, granulometria, densidade real dos grãos, cisalhamento direto e análise química dos solos dos taludes com e sem problemas de erosão. Em cada talude foram colétadas três amostras (deformadas) para os ensaios de caracterização e seis indeformadas, para ensaio de cisalhamento direto rápido, sendo executado em duas séries (cada série com três amostras), sendo uma com as amostras no estado natural e a outra saturada. No campo, o estudo compreendeu num levantamento topográfico expedito e análise mineralógica.

O propósito deste trabalho é discutir e analisar problemas de erosão superficial em alguns taludes de estradas nordestinas, fundamentando-se em simples observações de campo, ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade, densidade real, cisalhamento direto rápido e pequena análise química dos solos componentes dos taludes estudados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Geral

Neste capítulo, serão apresentados os parâmetros e as propriedades do solo que mais influenciam na susceptibilidade do solo à erosão, bem como os mecanismos. De um modo geral, procura-se mostrar a influência de cada propriedade ou parâmetro do solo, na sua resistência à erosão, através de fatos conhecidos pela literatura sobre o assunto.

As análises apresentadas neste capítulo, têm por base os resultados de testes sobre erosão em solos, de vários estudiosos citados na bibliografia deste trabalho.

2.2 - Parâmetros e Propriedades do solo, Susceptíveis à Erosão

As propriedades e parâmetros do solo, muito importantes no mecanismo da erosão a serem revisadas, são as seguintes:

- Granulometria
- Limites de Atterberg

- Compactação
- Permeabilidade
- Tipo e Quantidade de Mineral de Argila
- Fluidos dos poros
- Estrutura e Teor de Matéria Orgânica

Devido a alta complexidade do comportamento em conjunto de todas as propriedades e parâmetros, com relação à erosão, procura-se mostrar a influência de cada uma delas considerando as demais constantes.

2.2.1 - Granulometria

Quando o fluxo d'água escoar sobre a superfície de um solo, as partículas superficiais ficam submetidas às tensões cisalhantes. A resistência oferecida pelo solo a estas tensões depende de muitos fatores intrínsecos do solo. Em termos simples, pode - se dizer que a resistência do solo às tensões cisalhantes ocorre sob dois aspectos: atrito e coesão das partículas. Para os solos argilosos que apresentam alta percentagem de finos, a resistência está na coesão entre as partículas. Os solos que apresentam grãos maiores, tais como, solos siltosos, arenosos e pedregulhosos, a resistência está no atrito entre as partículas.

Baseado na velocidade do escoamento d'água na superfície de um solo, Nas cimento, (8); estabeleceu um relacionamento gráfico Fig. 2.1, a velocidade de segurança contra a erosão e granulometria.

Esta figura mostra os limites superior e inferior de velocidade de segurança contra erosão, em função da granulometria. Vê-se que para um solo constituído por siltes ou areias finas, sem proteção vegetal, não compactado, com

partículas interligadas fracamente, etc., a velocidade de segurança contra erosão é zero. Enquanto que para as areias grossas e os pedregulhos, mesmo nas piores condições de resistência à erosão, apresentam significantes velocidades de segurança contra erosão. Por outro lado, para um solo com defesa vegetal e outros elementos que resistam à erosão, as areias finas e médias são mais susceptíveis à erosão, pois elas apresentam menores velocidades de segurança contra erosão. As partículas de argila e os pedregulhos apresentam mais estabilidade em relação à erosão. Evidentemente que os mecanismos de resistência da percentagem de argila e de pedregulhos são diferentes. Como foi dito anteriormente, as partículas de argila não tem atrito (comparadas com os pedregulhos), mas apresentam alta coesão, ou seja, estão ligadas fortemente entre si. Os pedregulhos são fracamente ligados entre si, mas apresentam, relativamente, maior atrito.

Nota-se que quanto maior for a partícula de silte, maior será a erosão na porção siltosa. Isto já era esperado, porque a medida que as partículas de silte aumentam ocorre redução nas forças de ligação interpartículas.

Estudos experimentais de laboratório (3), sobre erosão em solos erosivos, mostram que os solos argilosos que apresentam maior percentagem de finos, são menos susceptíveis à erosão. As características dos solos analisados são apresentadas no quadro abaixo.

Solo	% pas.	% passando	% menor que	LL LP IP		
	Na pen. 40	na pen. 200	2 microns			
Caulenita	100	100	53	43	29	14
Grundita	100	96	62	51	30	21

Quadro 1 - (Christensen e Das, 1973)

O método utilizado para determinar as quantidades de erosão neste solo, foi o processo do cilindro rotativo. Neste teste a amostra em forma de cilindro, é submetida n'água e depois rotacionada. Para medir a erosão, divide-se a variação do peso da amostra (que corresponde a quantidade de solo medido), pela área lateral do cilindro, sendo assim a erosão expressada em unidade de peso por unidade de área. As Fig. 2.2 e 2.3, mostram os resultados encontrados para os dois solos, acima referidos, quando submetidos à tensões de cisalhamento, diferentes. Estas tensões são obtidas com o tubo de Preston, o qual se fundamenta na equação:

$$\log \frac{\tau_0 d^3}{d_p v} = - 2,604 + \frac{7}{8} \log \frac{P_t - P_s}{4 v^2} d^2 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

d = diâmetro do tubo em ft

p = densidade de fluido, slugs/ft³

v = viscosidade cinemática do fluido, em ft²/s

p_t = pressão total, em lb/ft²

p_s = pressão estática, em lb/ft²

τ₀ = tensão crítica de cisalhamento, em lb/ft²

Com os dados d, p, v, P_t, P_s, os quais são conhecidos ou medidos durante o ensaio, determina-se a tensão de cisalhamento na equação acima.

Resultados de testes de desagregação sobre cinco solos coesivos cujas características são apresentados no quadro 2, mostra que o tempo necessário para completa desagregação das partículas de um solo (12) não se relaciona diretamente coma percentagem de fino.

A Fig. 2.4 apresenta o relacionamento entre tempo de desagregação e percentagem de finos para cinco solos analisados. Pode-se ver claramente que o solo S-5, cuja percentagem de fino é maior que nos demais solos, apresenta um maior tempo de desagregação. Porém o solo S-1, apesar de conter percentagem de finos maior que os solos S-2, S-3, S-4, apresenta um tempo de desagregação menor que estes solos. Então, nem sempre pode-se afirmar que um solo com maior percentagem de finos é menos susceptíveis à erosão que um outro de menor percentagem.

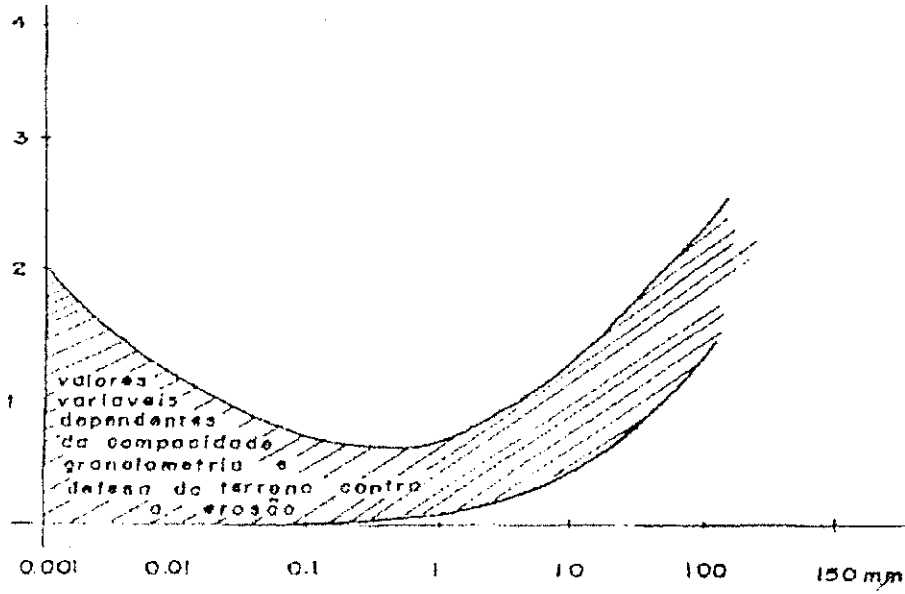
Propriedades	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
% entre 0.05 a 0.005 mm.	39	55	55	53	9
% menor que 0.005 mm.	50	37	33	27	7.6
% menor que 0.001 mm.	30	22	12	10	6.2
LL	67	52	35	40	75
LP	31	24	18	27	38
IP	36	28	17	13	37
LC	12.8	13.7	15	21	32
Percentagem de mat. Org.	1.95	2.2	1.0	4.5	0.0
S.O / R.O.	3.6	3.2	3.2	3.1	1.3
Tempo de desagregação (min.)	25	30	38	49	32.8

Quadro 2 - Características dos solos analisados por Winterkorn, 1973.

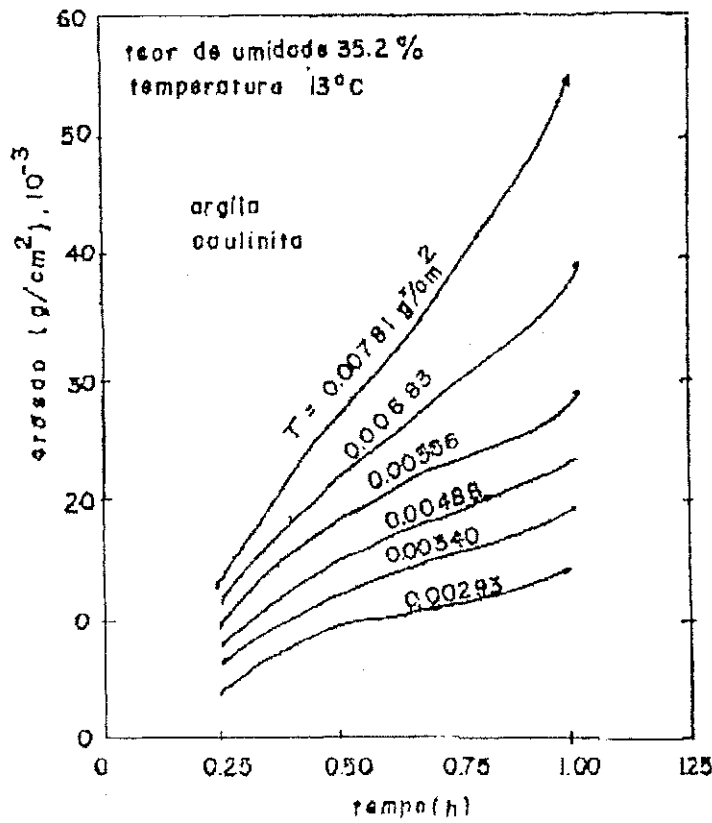
Figura 2.1 - Velocidade de segurança contra a erosão versus granulometria. Nascimento, 1952.

Figura 2.2 - Erosão versus tempo, para tensões de cisalhamento. Christensen e Das, 1973.

Velocidade de segurança a erosão (m/seg.)



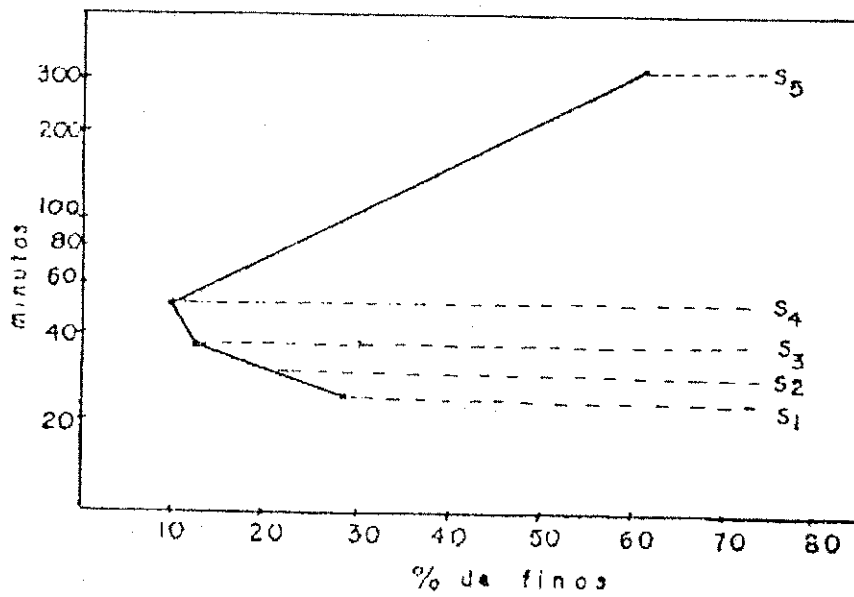
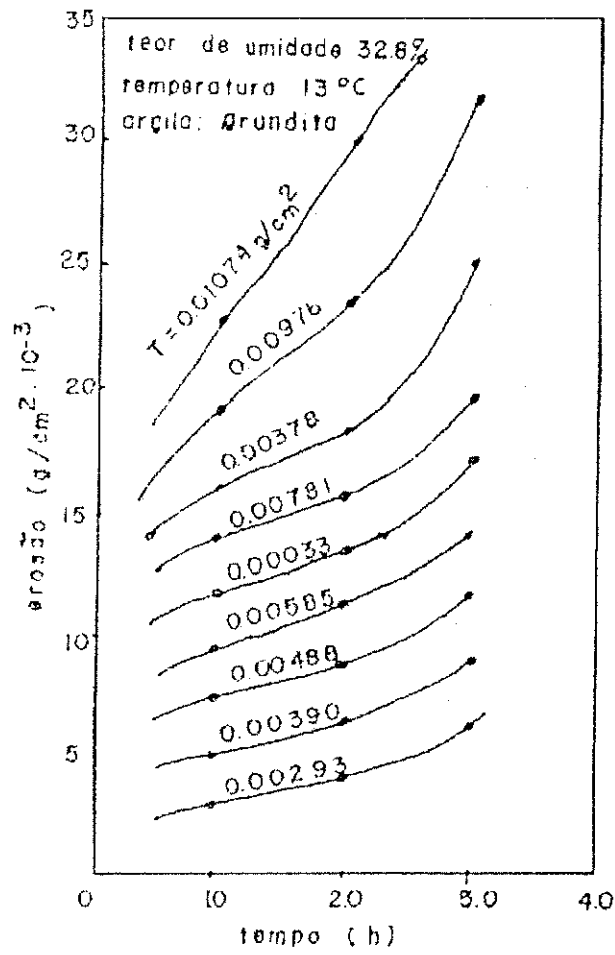
argila	silte	areia			pedregulho				
		fin	med	gr	fin	med	gr		
		0.005	0.07	0.5	2	5	15	30	150



* tensões impostas ao solo, durante o ensaio.

Figura 2.3 - Erosão versus tempo para várias tensões de cisalhamento. Christensen e Das, 1973.

Figura 2.4 - Relação entre percentagem de finas e tempo de desagregação para cinco solos coesivos. Winterkorn, 1973.



2.2.2 - Limites de Atterberg

Na literatura técnica encontra-se muitos estudos sobre a erosão em solos coesivos. Uns procuram mostrar que quanto maior for o índice de plasticidade de um solo, maior é a susceptibilidade deste solo à erosão. Outros mostram o contrário. Fazendo-se uma análise detalhada nestes resultados adversos, conclui-se que os limites de Atterberg, por si só, não podem medir a susceptibilidade de um solo à erosão. Entretanto de acordo com os resultados de pesquisas já realizadas, pode-se afirmar que os limites de Atterberg, para os solos que contém partes proporcionais de argila, silte e areia, são perfeitamente válidos na valiação da susceptibilidade destes solos à erosão. Isto quer dizer que os limites de Atterberg, como um meio de identificar, isoladamente solos erosivos e não erosivos, só são válidos para solos pouco plásticos.

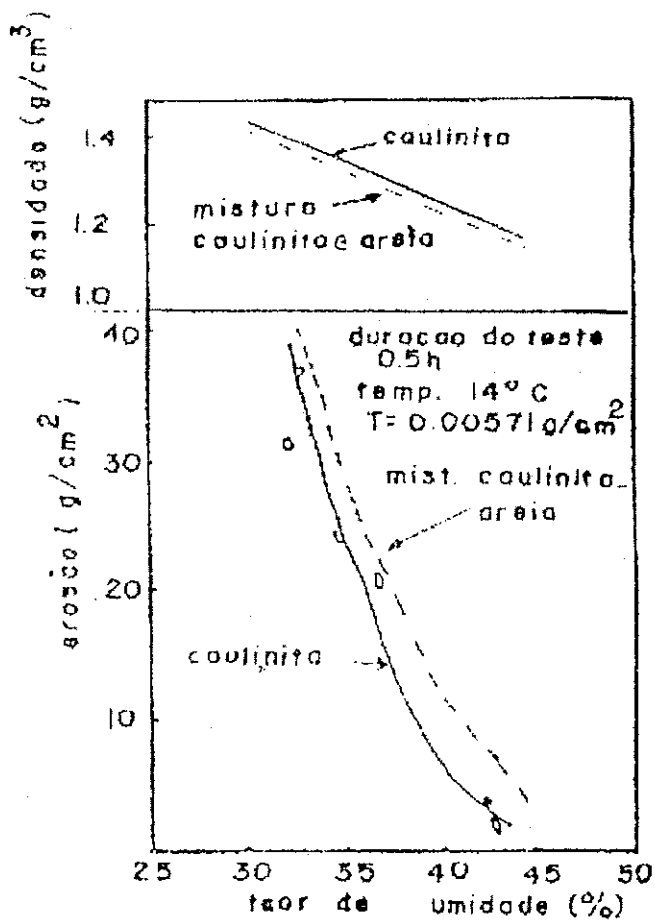
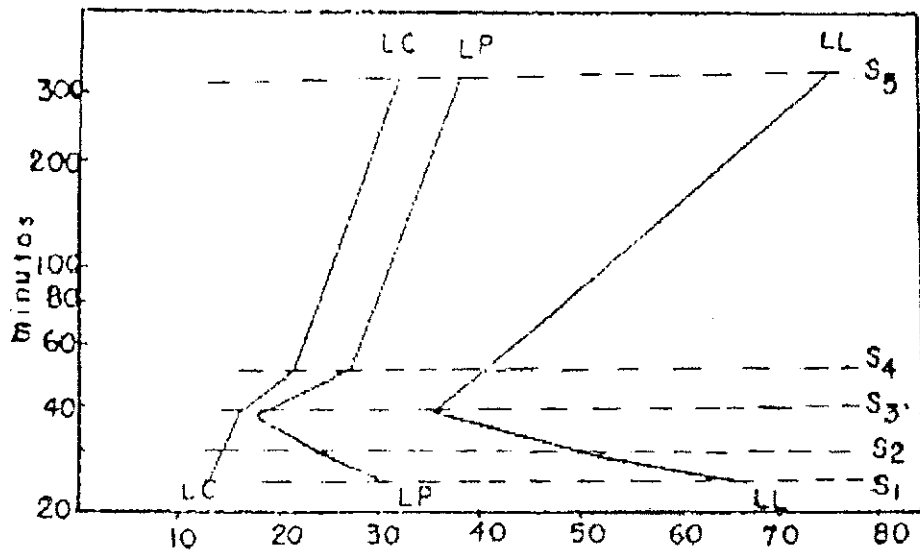
Christensen e Das (3) analisando o comportamento de dois solos argilosos, cujas propriedades são mostradas no quadro 3 verificou-se que a caulenita (menos plástica que a grundita) é mais susceptível à erosão.

Entretanto Winterkorn (12) ao analisar a influência dos limites de Atterberg sobre a resistência de um solo à erosão obteve resultados que, em parte, divergem com os encontrados por Christensen. As características dos solos analisados por Winter Korn são apresentadas no quadro 2. As relações entre os limites de Atterberg dos cinco solos e tempo para desagregação das partículas são apresentadas na Fig. 2.5

Estes resultados mostram que os solos mais plásticos (S-1 e S-5) são os que apresentam menor e maior resistência à

Figura 2.5 - Relação entre LC, LP, LL e tempo de desagregação das partículas. Winterkorn, 1973.

Figura 2.6 - Relação entre erosão versus teor de umidade de compactação, para uma mesma tensão de cisalhamento, para argila caulenita e sua mistura com areia. Christensen e Das, 1973.



erosão. Conforme o autor estas anomalias, provavelmente, estão relacionadas com o teor de matéria orgânica e a taxa de sesquióxidos (SiO_2 / R_2O_3). Estudos mais detalhados que relacionem percentagem de matéria orgânica e taxa de SiO_2 / R_2O_3 , índice de plasticidade (IP) e taxas de erosão, são necessários para se Ter uma melhor compreensão e certeza da influência do IP sobre a resistência do solo à erosão (12).

Quanto ao limite de contração (LC), pode-se ver claramente, que existe uma relação direta com a susceptibilidade do solo à erosão. Nota-se que, quanto maior o limite de contração, maior será sua resistência á erosão. O processo do canal de fluxo controlado, resume-se numa calha estreita, de inclinação controlada, que tem um orifício no fundo cujo diâmetro é igual ao da amostra. Esta é colocada (por meio de um dispositivo próprio) no orifício, de modo que sua face superior faça uma pequena saliência com o fundo da calha. Esta saliência é mediada e depois submetida à tensões cisalhantes impostas pelo fluxo d'água, que escoa pela calha. Sendo conhecida a área da amostra, a quantidade de solo erodido (em peso) e o tempo, determina-se as quantidades de solo erodido por unidade área por unidade de tempo. A tensão do cisalhamento pode ser determinada pelo tubo de Preston ou pela fórmula de Lane:

$$\sigma_0 = \gamma HS \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

- σ_0 = tensão crítica de cisalhamento
- γ = densidade de fluido, do fluxo
- H = profundidade do fluxo
- S = inclinação da superfície d'água

Na Fig. 2.8 á apresentada a curva de compactação do solo testado. A umidade ótima de compactação 14.8% (conforme mostra a Fig.). Na Fig. 2.9, é apresentada a relação entre tensão de cisalhamento (imposta ao solo) versus taxa de erosão para várias umidades de compactação. Podemos ver que existe uma relação direta entre a resistência do solo à erosão e a umidade de compactação. Têm-se que quanto maior for a umidade de compactação maior será a sua resistência à erosão. A Fig. 2.10 mostra a relação entre umidade de compactação e tensão crítica de cisalhamento. Entende-se por tensão crítica de cisalhamento, uma determinada tensão para a qual a taxa de erosão é zero. Esta figura foi construída com base na Fig. 2.9. De acordo com estes resultados, pode ser dito que só apresenta tensões de cisalhamento críticas para umidades de compactação acima da umidade ótima. Então podemos dizer que, para um mesmo solo, quanto menor for a sua umidade de compactação, mais susceptível à erosão ele será.

2.2.3 - Compactação

Geralmente é considerado que, para sólidos em idênticas condições a taxa de erosão diminui com o aumento da densidade. Contudo, vários estudos evidenciam que tal fato ainda não é conclusivo (4).

Christensen e Das (3) fazendo estudos em solos puramente coesivos e misturados com areia, compactados, encontraram resultados bastante significantes. Os testes foram realizados no cilindro rotativo modificado. Os solos analisados foram as argilas, caulenita, e grundita, com também misturas destes solos com areia. As amostras foram testadas nas condições de saturação. Os testes tiveram por finalidade

observar a influência da variação do teor de umidade e as respectivas variações das densidades sobre a erosão, para uma mesma tensão de cisalhamento, tempo de duração do teste, temperatura do fluido erosivo (água) e espessura do solo. Estes resultados estão reproduzidos na Fig. 2.6 e 2.7.

Devido ao estado de saturação das amostras, um aumento de teor de umidade implica numa redução da densidade. Pode ser visto claramente que, aumentando-se o teor de umidade da amostra, a quantidade de erosão é reduzida. Isto ocorre tanto para os solos puros como misturados com areia. É observado também que, apesar da densidade das misturas serem mais reduzidas do que as dos solos puros, elas apresentam maiores quantidades de erosão. Isto justifica o fato de que, para solos com certas proporções de areia, a ação da erosão é maior.

No ato da moldagem das amostras, é observado (3) que, a medida que aumenta o teor das amostras ficam cada vez mais polidas. E quanto mais plástico for o solo, mais polida é a superfície. Baseado nestes termos, eles concluíram que uma redução na rugosidade da superfície de um solo parece ser mais importante que um aumento na densidade.

Nas Fig. 2.8, 2.9 e 2.10, são apresentados os resultados de um estudo que trata dos efeitos da compactação sobre a resistência de um solo à erosão (1). O solo analisado tem 40% de areia, 49% de silte e 11% de argila. Análises de raio x, acusou a presença dos minerais de argila montmorilonita, caulenita, mica e vermiculita. O aparelho de teste foi o canal de fluxo controlado.

Os resultados da Fig. 2.9, também nos faz ver que para umidades de compactação menos que umidade ótima, ocorrem altas taxas de erosão e estes valores caem bruscamente para umidades de compactação maiores que umidade ótima. Baseado neste fato, Arumungan diz que parece existir dois processos

Figura 2.7 - Relação entre erosão versus teor de umidade de compactação para uma mesma tensão de cisalhamento, para argila grundita e sua mistura com areia. Christensen e Das, 1973.

Figura 2.8 - Curva de compactação dos solos testados por: Arulanandan e Arumungan, 1972.

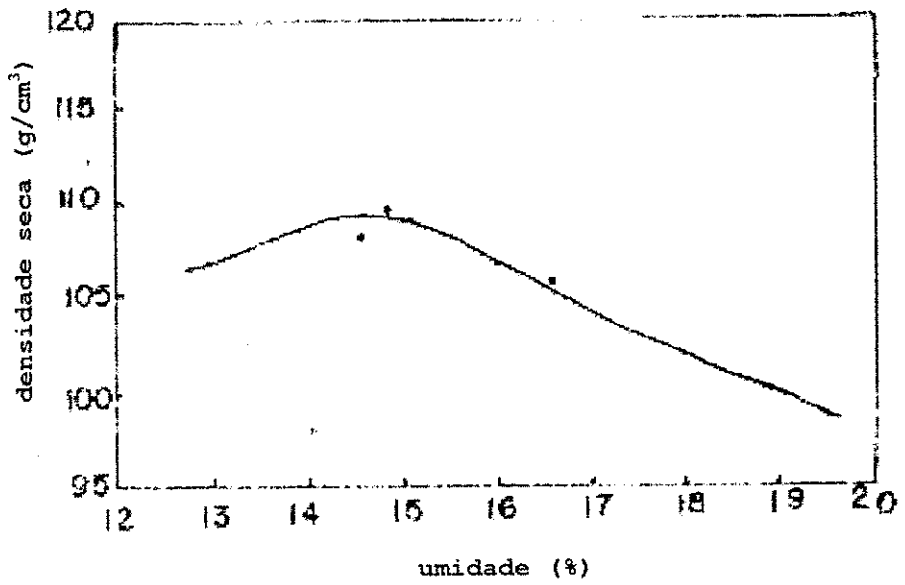
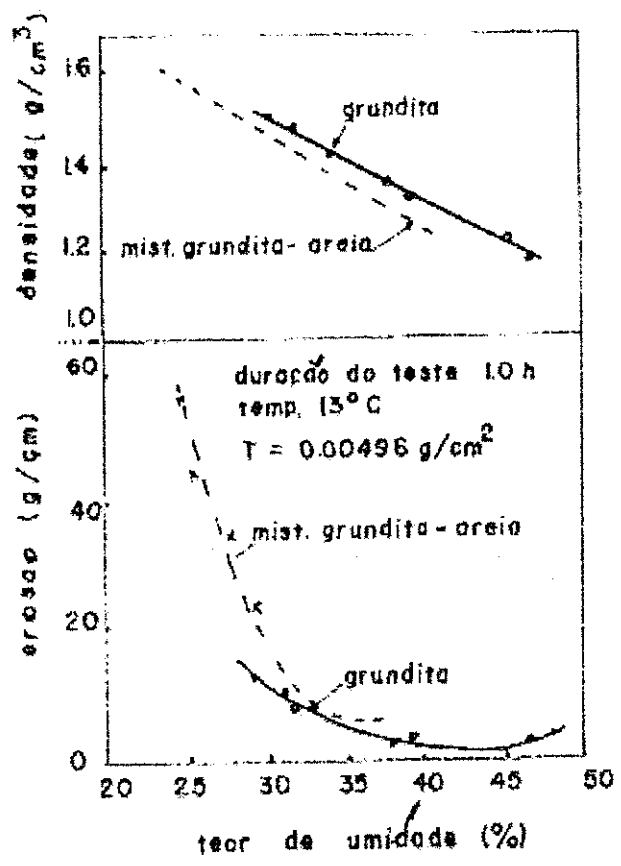
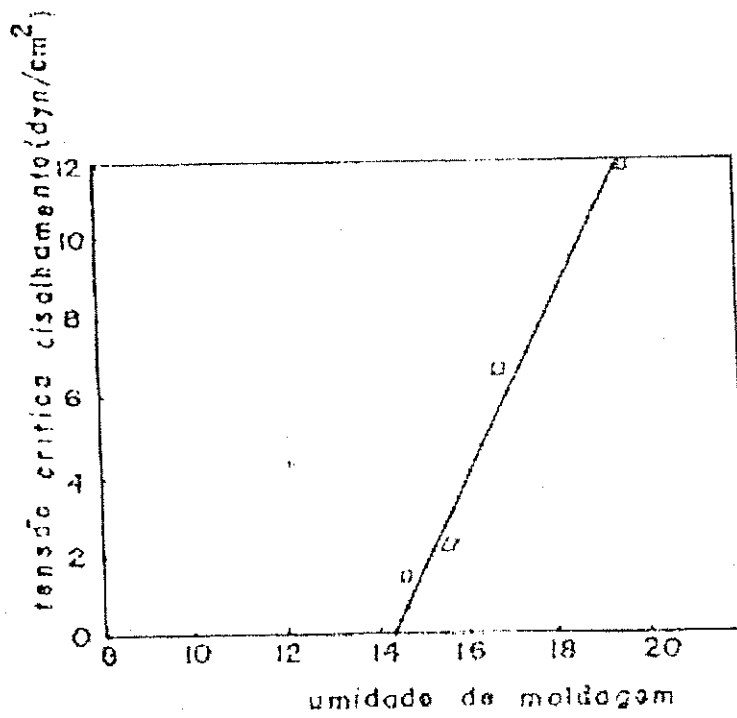
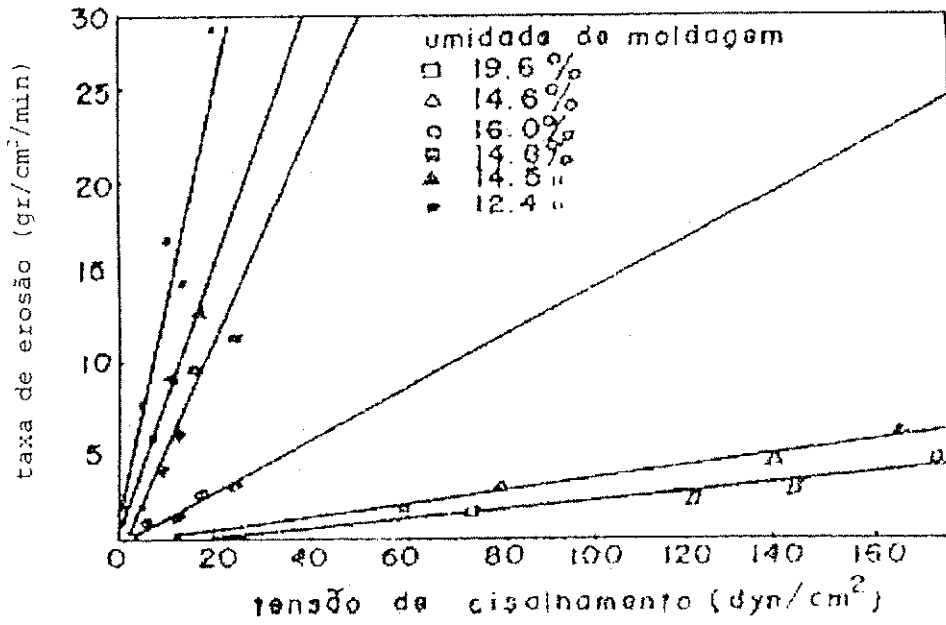


Figura 2.9 - Tensão de cisalhamento versus taxa de erosão, para várias umidades de compactação. Arulanandan e Arumungan,

Figura 2.10 - Influência da umidade de compactação sobre a tensão crítica de cisalhamento. Arulanandan e Arumungan, 1972.



diferentes de erosão. O processo erosivo que ocorre no lado seco da curva de compactação, ele chama de flaking (descascar ou extrair pequenas porções do solo), o que ocorre no lado molhado é conhecido por slaking (desagregação das partículas).

2.2.4 - Permeabilidade

A permeabilidade de um solo é um parâmetro bastante indicador da erodibilidade. Como a permeabilidade é função da granulometria e da estrutura do solo, é possível que a influência na erosão seja análoga a da granulometria (8). Para uma certa faixa de permeabilidade, é dito que um solo mais permeável é menos erodível que outro de menor permeabilidade. Por exemplo, uma areia grossa, sendo mais permeável que uma areia fina, será menos erodível que a areia fina. A explicação é simples: sendo um solo mais permeável, este reduz a energia disponível à erosão, através da fácil filtração da água neste solo. O restante da energia à disposição da erosão, será combatida pelo peso dos grãos e o entrosamento de ligação entre eles. No caso da areia fina, os pesos dos grãos são menores e portanto mais facilmente erodidos. Por outro lado, temos que solos com baixíssima permeabilidade são menos erodíveis que outros com baixa permeabilidade. Seria o caso da montmorilonita e caulenita. Por a montmorilonita apresentar baixíssima permeabilidade; a quantidade de infiltração de água não é suficiente para destruir ou alterar as forças de ligação interpartículas. No caso da caulenita, ocorre maiores infiltrações e conseqüentemente maiores destruições das ligações interpartículas. Finalmente, os solos de média permeabilidade, que seria o caso dos solos silteosos, estes são

os mais erodíveis, por apresentarem baixa coesão e partículas cujos pesos são muito pequenos.

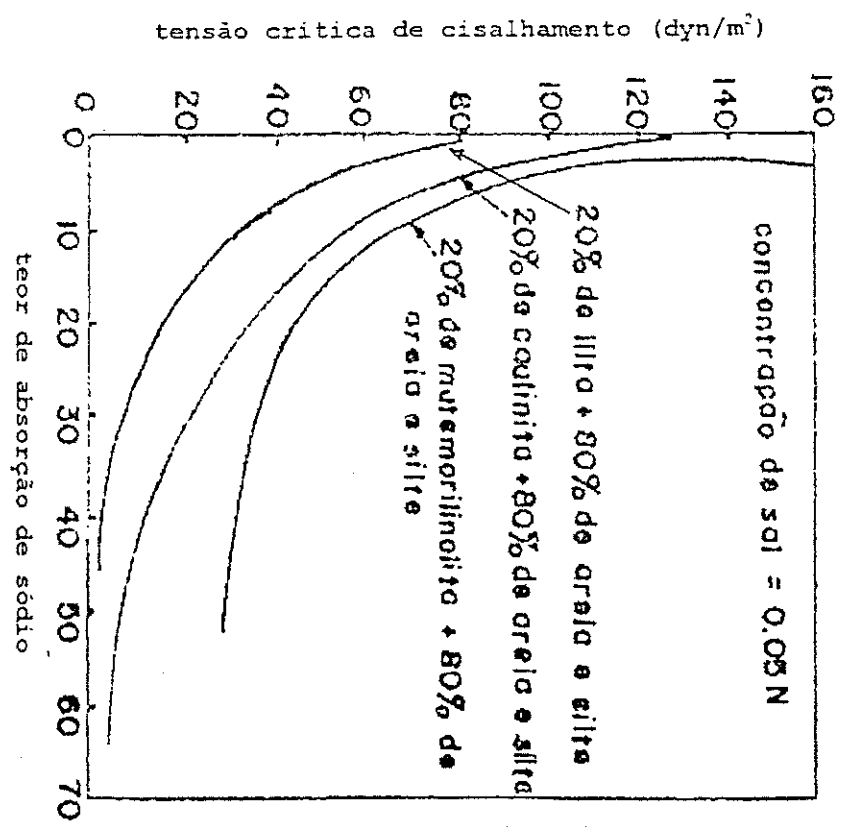
2.2.5 - Tipo e quantidade de mineral de argila

O tipo de mineral de argila do solo, entre todos os parâmetros já mencionados, parece ser o mais seguro meio de comparar ou identificar os solos susceptíveis à erosão. Evidente que esta afirmação só é válida para solos que apresentam teor de matéria orgânica, taxa de absorção de sódio (SAR), condições climáticas, umidade de compactação, etc., aproximadamente iguais.

Arulanadan (1), estudando a influência do tipo e da quantidade do mineral de argila na erodibilidade, encontrou resultados que afirmam as conclusões sobre o mesmo assunto por outros pesquisadores. O aparelho usado nos testes foi o cilindro rotativo da Masch, Espey, Moore (5). No solo analisado, as partículas de tamanho menor que 50 microns, foram substituídas pelos minerais de argila, caulenita, illita e montmorilonita. O método usado para identificar o mineral de argila foi a Dispersão Dielétrica. A Dispersão Dielétrica é basicamente a diferença na constante dielétrica dos constituintes do solo. Todas as amostras foram analisadas para diversas taxas de absorção de sódio.

Fig. 2.11 relaciona taxas de absorção de sódio para três tipos diferentes de solo com percentagens iguais de diferentes minerais de argila, e tensão crítica de cisalhamento (τ). Pode ser visto que o solo com 20% de montmorilonita é menos erodível que os outros contendo mesma percentagem de caulenita e illita. Isto para uma mesma taxa de absorção de sódio.

Figura 2.11 - Relação entre taxas de absorção de sódio e tensão crítica de cisalhamento para diferentes tipos de argila. Arulanandan, Sargunam e Loganathan, 1973.



Na Fig. 2.12, é apresentada a relação entre dispersão dielétrica e tensão crítica de cisalhamento, para diferentes taxas de absorção de sódio (TAS). Este gráfico tem por finalidade mostrar a importância da dispersão dielétrica no estudo da erosão. O tipo e a quantidade de minerais de argila, a estrutura, como também a orientação das partículas podem ser caracterizadas pelas propriedades elétricas de um solo. A Fig. 2.12 mostra uma relação direta entre a dispersão dielétrica e a tensão crítica de cisalhamento. A apresenta também que a tensão crítica de cisalhamento é uma função inversa da TAS (SAR). Então, um solo será mais resistente à erosão quanto maior for a sua dispersão dielétrica o menor TAS.

Um fato bastante interessante, é visto nos solos analisados por Winterkorn (quadro 2). Nota-se que a taxa de sílica para sesquióxidos apresenta uma relação com o tempo de desagregação das partículas independente dos demais fatores. Este fato evidencia a grande influência do tipo de mineral de argila na resistência do solo à erosão.

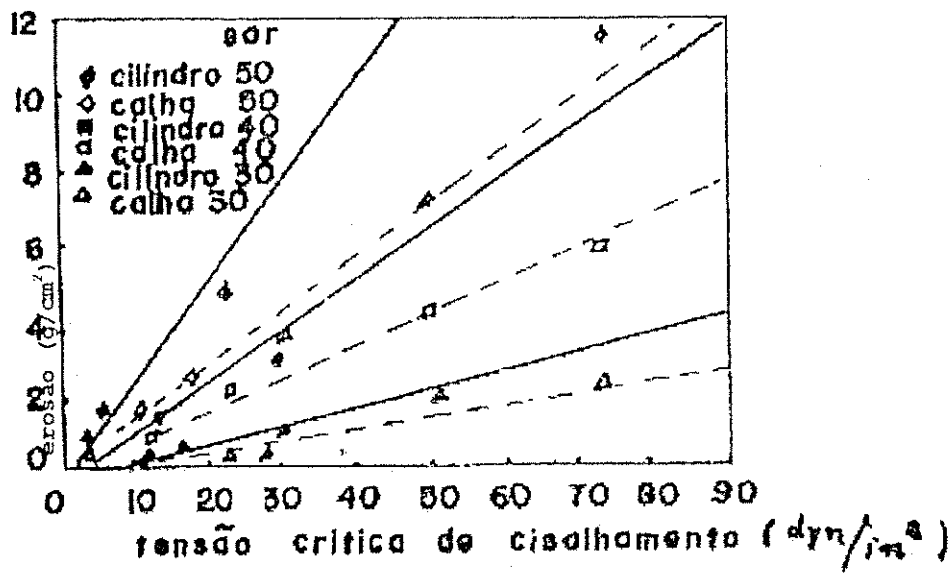
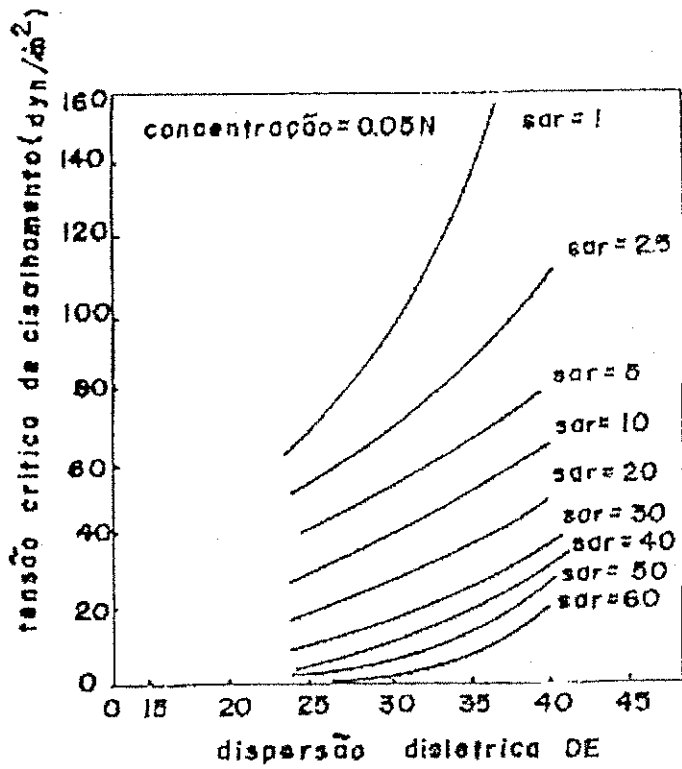
2.2.6 - Fluidos dos poros

A composição dos fluidos dos poros de um solo é outro parâmetro intrínseco de grande relevância na indicação da erodibilidade de um solo.

Arumungan Arulanandan (2) fizeram análises de erodibilidade de um solo contendo 40% de areia, 49% de silte e 11% de argila, com dois aparelhos diferentes: o cilindro rotativo e o canal de fluxo controlado. Entre várias propriedades de solo, susceptíveis à erosão, ele analisou também a influência da composição química do fluido dos poros. A Fig. 2.13, mostra os resultados encontrados por ele, ao

Figura 2.12 - Relação entre dispersão dielétrica e tensão de cisalhamento crítica, (Arulanandan, Sargunam e Loganathan, 1973), para diferentes TAS.

Figura 2.13 - Relação entre tensão crítica de cisalhamento e erosão, para várias taxas de absorção de sódio (TAS). Testes realizados com o cilindro rotativo e o canal de fluxo controlado. Aramumgan e Arulanandan, 1972.



relacionar tensão de cisalhamento crítica e taxas de erosão para várias taxas de absorção de sódio. Os resultados mostram que independente do aparelho testado, a tensão de cisalhamento crítica diminui com o aumento da taxa de absorção de sódio (TAS). Pode ser visto que para uma mesma tensão de cisalhamento, quantidades de erosão maiores são obtidas com cilindro rotativo. Isto mostra que o tipo de aparelho testado, também implica na avaliação dos resultados encontrados. Partheniades e Paaswell (10) consideram que a resistência de um solo medida no cilindro rotativo, como também o índice de plasticidade, não transmitem o estado do solo na superfície e, portanto, são parâmetros pobres para avaliar a erodibilidade.

Arulanandan (1) no seu trabalho já citado no sub-capítulo que trata da influência do tipo e da quantidade do mineral de argila, na erosão, também analisou o tipo e a quantidade dos íons no fluido dos poros em relação à erodibilidade. Os meios empregados para identificar o tipo e a quantidade de íons no fluido dos poros, como também no fluido erosivo, foi a condutividade elétrica e a taxa de absorção do sódio, a qual pode ser calculada pela fórmula:

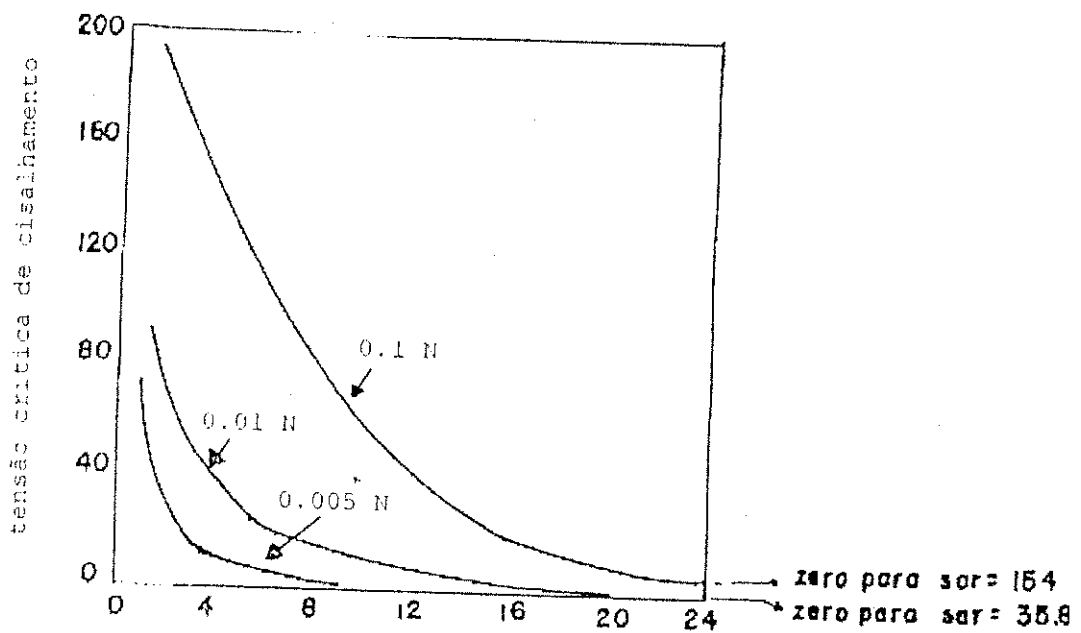
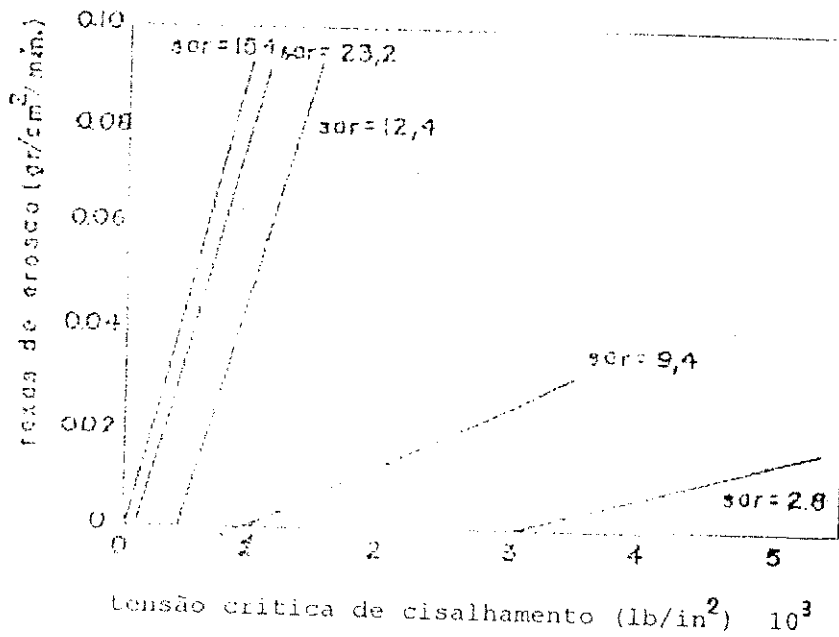
$$TAS = \frac{[Na]}{\sqrt{0.5 \left(\frac{[Ca^{++}]}{[Ca^{++}]} + \frac{[Mg^{++}]}{[Mg^{++}]} \right)}}$$

Onde cada íon (Na, Ca, Mg) indica a concentração individual dado em mili-equivalente por litro (meq/l). O solo testado tem a seguinte composição: 46% de areia, 35% de silte e 19% de argila. A capacidade de troca catiônica é de 19.8 meq/100g .

Os resultados encontrados por ele, são apresentados nas Fig. 2.14 e 2.15. Na Fig. 2.14, temos a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de erosão para várias caixas de absorção de sódio. Os resultados confirmam os já encontrados. Isto é, taxas de erosão diminuem com a redução da TAS. Na Fig.

Figura 2.14 - Tensão crítica de cisalhamento versus taxa de erosão, para várias taxas de absorção de sódio (TAS). Arulanandan, Sargunam e Loganathan, 1973.

Figura 2.15 - Taxas de absorção de sódio (TAS) versus tensão crítica de cisalhamento para várias concentrações de soluções. Arulanandan, Sargunam e Loganathan, 1973.



2.14, tem seu relacionamento entre TAS e tensão crítica de cisalhamento (tensão mínima necessária para iniciar a erosão) para soluções com diferentes concentrações. Os dados desta figura tem por base os resultados da Fig. 2.14. Vemos que a tensão mínima necessária para iniciar a erosão aumenta para taxas de absorção de sódio menores e maiores concentrações da solução.

Winterkorn (12), fez também experiências com os cinco solos apresentados na tabela 2 com referência a trocas catiônicas no fluido dos poros. Os resultados encontrados são apresentados no quadro 3. Em função do tipo de íon trocado, ele obteve tempo máximo e mínimo no fenômeno de slaking (desagregação). O quadro 3, mostra os tempos de slaking para o solo natural, suas misturas com dois tipos de areia e este mesmo solo e misturas transformados pelo processo de trocas catiônicas. Observa-se que para naturais e suas misturas os tempos de slaking foram bem maiores, quando estes sofreram o processo da troca catiônica para determinar tipo de íons. Por outro lado os tempos de slaking foram reproduzidos quando os solos naturais e suas misturas foram tratados com outros tipos de íons.

2.2.7 - Estrutura e teor da matéria orgânica

Existem diversas conotações usadas para o termo estrutura. Uma delas considerada estrutura sob um aspecto geral abrangendo a composição mineralógica, forma a distribuição das partículas elétricas, forças de interação entre as três fases, propriedades e natureza da fase gasosa e aquosa e a história da formação do solo. Pela própria distribuição dos assuntos tratados neste capítulo, o conceito

SOLO	Tempo (mint)		
	T.Nat.	T. Max.	T. Min.
Solo - S-1	25	28 (Na)	8 (Al)
Areia limestone	13	179 (Na)	7 (Al)
Areia flint	6	55 (Na)	4 (Al)
Solo - S-2	30	159 (Na)	17 (Fe)
Areia limestone	17	355 (Na)	10 (H)
Areia flint	6	360 (Na)	4 (K,Al,Fe,H)
Solo - S-3	38	138 (Na)	20 (Fe)
Areia limestone	17	255 (Na)	5 (K,Al)
Areia flint	13	240 (Na)	6 (H)
Solo - S-4	44	266 (Na)	6 (Fe)
Areia limestone	15	92 (Na)	7 (Fe)
Areia flint	10	39 (Na)	3 (Fe)
Solo - S-5	328	360 (H)	188 (Mg)
Areia limestone	114	209 (Mg)	59 (Na)
Areia flint	54	110 (Na)	39 (Na)

Quadro - 3 - Tempo de slaking para os solos naturais e modificados por trocas catiônicas.
(Winterkorn, 1973)

de estrutura não poderia abranger tantas propriedades como o citado a cima. Aqui tomaremos o termo estrutura como a forma de distribuição e ligação das partículas.

A estrutura de um solo esta intimamente ligada com a granulometria e permeabilidade dele. De maneira que a influência da estrutura no processo erosivo será análoga à influência da granulometria e da permeabilidade.

Como vimos anteriormente (Fig. 2.11 a 2.15) quando um solo é tratado com taxas de absorção de sódio, torna-se mais susceptível à erosão a medida que estas taxas aumentam. Quando isto ocorre, verifica-se que solo ganha uma estrutura mais dispersa, isto é, reduz o grau de floculação. Portanto, podemos afirmar que, normalmente, um solo com uma estrutura mais dispersa é mais erodível que outro, em idênticas condições, com uma estrutura menos dispersa. Por outro lado, de acordo com os resultados das pesquisas realizadas por Winterkorn (ver quadro3), a presença de um esqueleto granular não traz benefício algum ao combate da erosão. Podemos ver que só os coesivos quando misturados com areia, tornam-se mais susceptíveis à erosão. É fácil de ser compreendido, visto que a presença de areia nos solos coesivos, aumenta a permeabilidade e reduz as forças interpartículas, tendo como consequência uma estrutura grágil.

Os resultados de várias pesquisas, têm mostrado que o teor de matéria orgânica, apresenta uma relação inversa com taxas de erosão. A matéria orgânica é um agente cimentante das partículas, principalmente, para os siltes e arei fina. Winterkorn atribui ao grande teor de matéria orgânica, longos tempos de desagregação das partículas, como por exemplo o caso do solo S-4 apresentado na tabela 3. Wischmeier e Meyer (13) afirmam que a erodibilidade de um solo é uma função inversa do teor de matéria orgânica. Porém, neste mesmo trabalho, com base nas observações de campo, ele mostra que se a quantidade

do material argiloso é aumentada a taxa de erosão diminui e esta redução cai se houver quantidades excessivas de matéria orgânica. Portanto parece existir uma quantidade ótima de matéria orgânica capaz de aumentar a resistência do solo, principalmente nos solos coesivos.

2.3 - mecanismo de erosão

Neste sub-capítulo serão apresentados os mecanismos de erosão com base em parâmetros fundamentais do solo como também em outros fatores que influenciam na formação da estrutura do solo. Existem determinados parâmetros cujas influências no mecanismo já são perfeitamente aceitas e compreendidas e outras que ainda não são definidas. Com base neste fato, serão apresentadas as teorias já definidas e outras ainda em discussão com relação ao problema da erosão. A teoria sobre os mecanismos de erosão aqui apresentadas, fundamenta-se no trabalho do professor Robert E. Paaswell, publicado na revista Report nº 135, 1970.

Segundo Lyle e Smerdon, mencionados na referência 14, afirmaram que as propriedades de um solo as quais governam ou ditam sua resistência a erosão hidráulica são numerosas e difíceis de se compreender. As dificuldades de se prognosticar e estabelecer dados para uma melhor compreensão de mecanismo da erosão são: a) obter os parâmetros de solo que controlam e que sirvam de suporte ao combate da erosão; b) definir o estado real da tensão induzida na interface solo-água, pelo fluido que escoar na superfície do solo.

2.3.1 - Aspectos geral

A erosão é iniciada quando a partícula individual ou pequeno grupo de partículas (flocos) são destacados e

carregados pelo fluido que escoia sobre a superfície do solo. O segundo caso trata-se de um problema de estabilidade de massa ou movimento de massa o que difere do primeiro.

A resistência ao cisalhamento de um solo é a resistência que ele esboça para conter as tensões cisalhantes a ele impostas. No solo argiloso estas tensões atuam ao longo de toda a superfície as quais são combatidas pelas forças de fricção e as forças eletroquímicas, as quais serão definidas posteriormente. No deslocamento de grupos de partículas, um plano de ruptura se desenvolve quando as tensões cisalhantes ao longo deste plano excede a resistência do solo. Este plano pode ser visualizado facilmente. No caso de tensões de cisalhamento é bastante diferente. Os fatores que constituem a resistência ao cisalhamento não são bem definidas porque trata de uma situação onde a tensão de confinamento é zero.

A coesão é o parâmetro que contribui efetivamente na resistência dos solos coesivos no combate à erosão superficial. Ela é fruto das ligações interpartículas de naturezas químicas e cimentantes. Paaswell (9), mostra que a resistência coesiva é função das condições dos depósitos, dos tipos de minerais de argila e da ocorrência ou não de tensões no solo. É muito importante estabelecer a distinção entre solo normalmente consolidados e pré-consolidados. Para um solo normalmente consolidado a tensão atual é a original e nunca foi excedida. O pré-consolidado a tensão atual é menor que outra preexistente. Os seguintes exemplos ilustram a diferença entre os dois estados: 1) um leito de solo cuja superfície foi formada e cuja deposição é incessante e onde não ocorre erosão; 2) um leito cujas camadas superiores foram erodidas e o escoamento do fluido está sempre desenvolvido na camada subsequente àquelas escondidas. Será visto que a erosão de dois estados acima citados ocorre diferentemente.

A tixotropia é a recuperação da resistência por uma argila, num dado espaço de tempo. É causada pela reação da posição de equilíbrio das partículas e estas tendem a readquirir nova posição de equilíbrio para as novas posições impostas. Ela é geralmente associada a formação de flocos. A ocorrência da resistência ganha com o tempo por argilas compactadas, é essencial da avaliação da resistência de leitos argilosos no laboratório ou nos canais artificiais. De acordo com Mitchell (7), a tixotropia ocorre quando o excesso de energia do limite de atração no sistema de força interna é dissipada e o equilíbrio ocorre através do reajustamento das partículas e de mudanças na estrutura pela água absorvida. Este fenômeno é muito importante na valiação dos resultados dos testes de laboratório.

A quantidade do fluido durante o processo de formação do depósito e no ato da erosão é de grande importância (9). Uma mudança nos íons absorvidos implicado nas propriedades físicas da argila, isto é, limite de liquidez, limite plasticidade e resistência. Num estudo sobre erodibilidade de leitos argilosos, Tese de Mestrado de Liou, mencionado na referência 9, é mostrado que variações pronunciadas na estabilidade do solo ocorrem quando se troca o tipo de aditivo químico no fluido erosível. Partheniades, no seu trabalho de Doutorado mencionado na referência 9, descobriu que a presença de íons na água erosível, era suficiente para causar ação cimentante na superfície do leito, e que mudanças substanciais ocorrem na tensão crítica de cisalhamento quando os íons de ferro não estão presentes.

2.3.2 - O passado histórico de um solo e sua estrutura

Os resultados de experiências mostram que a estrutura física de um material coesivo, tem papel preponderante na

resistência a erosão e as características da estrutura deste solo é função do tipo de deposição inicial, isto é, com ou não compactação na formação de um solo sedimentar as partículas ao serem transportadas, executam movimento Browniano e as cargas elétricas destas partículas sofrem modificações que dependem da qualidade da água na qual são transportadas.

As partículas que estão fortemente interligadas pelos vértices devido ao tipo de orientação que elas podem ao acaso possuir (estrutura flokulada), no transporte, podem sofrer uma total modificação em suas orientações e adquirirem uma orientação de paralelismo, transformando-se numa estrutura dispersa. Podem também ocorrer das partículas formarem grupos orientados e depois ganhar estruturas arbitrárias ou formar estruturas orientadas paralelamente (6).

Os solos residuais devido aos intemperismos físico químicos, apresentam estruturas que não tem relacionamento (físico) algum com a rocha origem. A estrutura de um solo residual está ligada ao grau de intemperismo sofrido por ele. Os solos coesivos compactados artificialmente apresentam estruturas bastante diferentes dos solos acima citados. Diversos pesquisadores afirmaram que a taxa de erosão em um solo compactado, dependem do método de compactação e do teor de umidade de compactação. A seguir são apresentados os mecanismos da formação da estrutura para os solos depositados não compactados e os solos depositados compactados (naturalmente ou artificialmente), (6).

2.3.3 - Depósitos naturais não compactados

O mecanismo da formação da estrutura dependerá da qualidade da água no início da deposição. Portanto, as

discussões serão apresentadas sob dois aspectos, ou seja, no caso da água existente for doce ou salgada.

Na água doce existe uma grande difusão de pequeníssimas quantidades de sais e de ions de hidrogênio os quais circulam nas partículas ou podem penetrar em seu interior. Com a difusão, as partículas adquirem cargas tais, que forma campo elétrico em torno de si. Então ocorrerá fortes repulsões em água doce, resultando em estrutura dispersa, onde o índice de vazios diminui com a redução da carga elétrica original na superfície da partícula. Com isto as partículas ficam mais justas. A porosidade da superfície de um solo ou da camada logo abaixo da superfície é também influenciada pela taxa de deposição e pelo tamanho das partículas (6). A porosidade é maior para uma rápida deposição e menor para maior tamanho das partículas.

Quando a água é salgada, ocorre a floculação, principalmente se o solo coesivo for de natureza caulenítica. Isto pode ocorrer pela redução da carga negativa na face da partícula e conseqüentemente uma atração com as cargas positivas, nos vértices das partículas. Como produto têm-se ligações interpartículas o que resulta numa estrutura aberta de alta porosidade. Se algum acréscimo for dado na concentração do sal, ocorrerá uma redução no potencial elétrico da carga da superfície resultando numa estrutura mais dispersa

A deposição numa água contendo sais tais como NaCl, MgCl₂ e CaCl₂, normalmente resulta numa estrutura floculada devido a supressão da força repulsiva e o aparecimento de pequenas forças atrativas. Esta estrutura floculada pode Ter ligação interpartícula do tipo face maior para face menor (edge to face) ou face maior para face maior (face to face), formando uma treliça aberta. As argilas de natureza fixa, como a montmorilonita forma domínios ou grupos de partículas,

resultando também numa estrutura floculada. Durante o processo de deposição, é possível também ocorrer a formação de flocos durante a estabilidade do fluido. A Fig. 2.16 mostra o aspecto da estrutura formada. Suas características são: alta porosidade, relativamente muita fraca e com baixa densidade. Se por a caso este solo receber cargas de origem sedimentar ou cargas exteriores artificiais, suas partículas tendem a formar uma orientação de natureza paralela, sendo os flocos destruídos. A distância interpartículas é função de mineral de argila e da qualidade do fluido. Se houver predominância das forças de atração é possível a formação de ligação do tipo face-maior face-menor. Caso ocorra predominância das forças repulsivas, as partículas se manterão separadas devido a carga elétrica da película d'água que reveste cada partícula da orientação das partículas como também as cargas elétricas da superfície para se ter uma melhor interpretação e avaliação das forças erosivas (9).

2.3.4 - Depósito compactado

Anteriormente foi dito que os solos compactados mecanicamente, adquirem uma nova estrutura, devido a nova orientação das partículas em paralelo. No ato da compactação (natural) e de pequenos graus de ligações subsequentes que possam ocorrer quando o depósito é tensionado, a estrutura que o solo ganha depende do teor de umidade de compactação (9). Quando a umidade de compactação aumenta a estrutura torna-se mais orientada. Considerando que é possível ter estruturas floculadas (geralmente com baixa umidade de compactação) é improvável relacionar a formação de estrutura composta de flocos com grande índice de vazios, com a teoria da formação da estrutura floculada pela deposição natural do material.

A natureza de composição, serve como índice de quantias subsequente de expansão para solos flocculados que tendem a se expandir num grau muito maior do que os solos mais orientados (9). Sendo a expansão um fator que aumenta um índice de vazios, (enfraquecendo a estrutura e a erosão tida como fenômeno superficial é de se esperar que a expansibilidade só possa produzir efeitos opostos a resistência do solo à erosão.

Muitos estudos foram realizados com solo compactados naturalmente e artificialmente. E como já se sabe as variações que ocorrem nas estruturas do solo, são os elementos básicos responsáveis pela resistência deste solo à erosão. A estrutura reflete este sistema de força interpartícula e é estabelecida pela natureza deste sistema de forças internas. Como o problema da erosão é tratado como um fenômeno de superfície, qualquer fator que minimize as forças interpartículas ou minimize a estabilidade da camada superficial (como por exemplo, a geometria da superfície ou a configuração da energia potencial) aumenta em grande escala as condições de erosão.

Existem dois sistemas distintos de tensões que controlam o comportamento resistente do solo, os quais são: externo e interno. O sistema externo, compreende as ações externas atuantes no depósito durante e após a sua formação. A tensão que existiu anteriormente no solo, se normalmente consolidado, é uma função simples do peso da sobrecarga no local. Se esta sobrecarga foi colocada pelo homem, o solo pode ter adquirido algumas propriedades que são funções da energia absorvida. O sistema externo tem grande influência a geometria das partículas, pois, quando as sobrecargas são maiores as partículas adquirem uma maior orientação e a distância entre elas são reduzidas. Devido a estas sobrecargas pode ocorrer a formação de vínculos muito fortes. Na Fig. 2.17 é mostrado a

influência da forma estrutural e da posição da partícula. A Fig. 2.16, mostra o aspecto da estrutura floculada.

Pode ser visto que as partículas da superfície estão presas a forças menores do que aquelas das camadas inferiores. Devido ao processo natural de compactação, o índice de vazios diminui com a profundidade. Um índice de vazios menor implica numa matriz estrutural complexa, devido a uma interação física entre as partículas. Acrescentando o fato de que as partículas da superfície são constantemente cisalhadas pelo fluido que escoia na superfície, é evidente que as partículas superficiais têm um estado de estabilidade menor do que aquelas das camadas mais profundas. Quanto a forma estrutural, pode ser admitido que a estrutura floculada (Fig. 2.17.b) está mais sujeita ao cisalhamento, isto porque as partículas sendo interligadas perpendicularmente (aproximadas) elas se expõem à forças cisalhantes mais do que aquelas que são orientadas paralelamente (Fig. 2.17.a). Como elas são normalmente e fortemente ligadas uma as outras, dependendo do tempo de escoamento, podem ocorrer o destacamento de grandes porções conforme mostra a Fig. 2.18.a.

Com base nestes fatos, na literatura aqui consultada é fácil concluir que a complexidade de forças que mantém as partículas de um solo coesivo, unidas pode ser compreendida pelo passado histórico do depósito. O tipo de material determina a grandeza das forças elétricas e por conseguinte a forma estrutural. O cisalhamento contínuo implica em reações das partículas e nas distâncias interpartículas. Com isto o solo pode ou não tornar-se susceptível à erosão, dependendo do novo tipo de orientação das partículas e da distância entre elas.

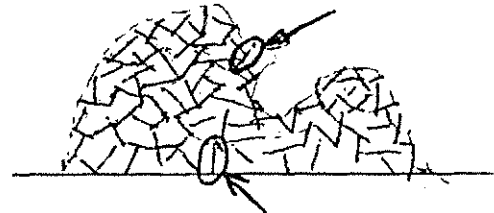
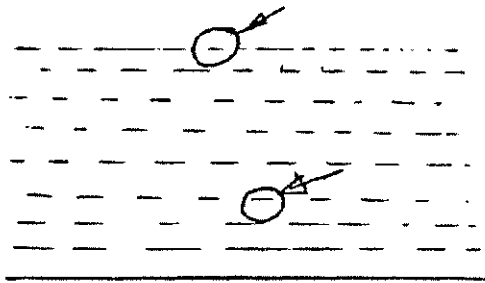
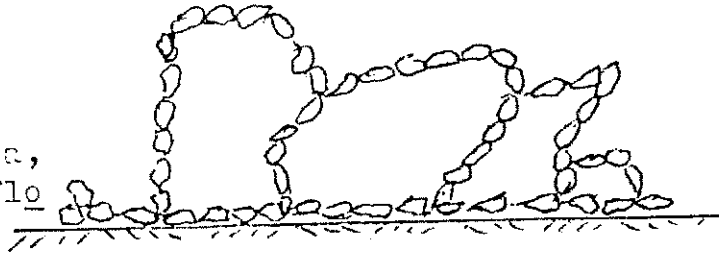
Figura 2.16 - estrutura de treliça aberta formada pela deposição de flocos. Paaswell, 1973.

Figura 2.17 - Posição da partícula nas camadas de solo e o tipo de estrutura. Paaswell, 1973.

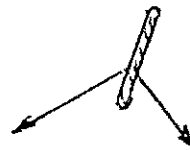
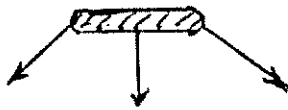
flocos formados
na deposição.



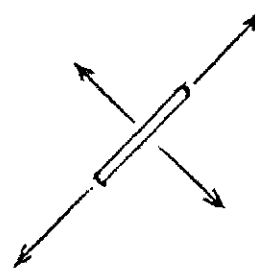
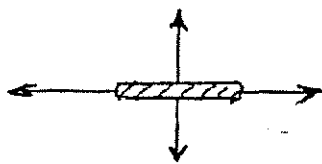
treliça ou malha,
formada pelos flo-
cos.



partícula na superfície



partícula na camada inferior



(a)

(b)

2.3.5 - Mecanismo da força de atração

Uma tentativa para definir uma relação entre a força de atração e erosão, de superfície e de profundidade, vários investigadores trabalharam com jatos d'água submersos. Dunn, mencionado na referência (9), baseou suas avaliações na suposição de que a força total que causa erosão é composta pelo carregamento das partículas de forma turbulenta e de forma viscosa, sendo a maior parte da força, proveniente do carreamento viscoso. A força resistente ao cisalhamento foi tomada pelo critério de falha de Coloumb; para o qual é necessário admitir algum valor ϕ (ângulo de atrito) e c (coesão), os quais apresentam boas aproximações quando estudados pelo critério de falha. Partindo da suposição de que o critério de falha de Coloumb é operativo, Dunn admitiu que o mecanismo de falha de erosão da superfície, pode ser definido da mesma maneira que o critério de falha de base profunda.

Estudando a resistência do solo ao cisalhamento com relação a resistência deste ao Vane Test, os resultados de Dunn indicam que a tensão crítica de cisalhamento, de certa forma aumenta com a resistência do solo ao Vane Test (fenômeno de base profunda). Isto implica que o cisalhamento de superfície deve também ser correlacionado livremente com a resistência ao Vane Test. Porém este fato ainda não foi demonstrado. Com base na teoria de falha ele relacionou erodibilidade com IP e percentagem de finos. Observou que, quando o IP e percentagem de finos aumentam, a resistência também aumenta. Os solos testados por Dunn foram remoldados e imediatamente consolidados em condições de saturação. O IP máximo foi de 15,6 sendo que de sete amostras testadas, três tinham IP menor que dez. Isto sugere que as amostras tinham minerais de argila relativamente inertes. As amostras não foram sujeitas a expansão (talvez por terem os minerais de

argila inertes). A correlação entre IP e resistência a tração, anteriormente citada, não pode ser generalizada, já que os solos testados tinham IP numa faixa bastante limitada isto é, entre 5 e 16 por cento.

Leitch e Yong, mencionados na referência (9), mostraram que sob tensões cisalhantes (base profunda), há uma determinada reorientação de partículas nos planos da falha. As partículas tornam-se orientadas segundo a direção do movimento de fluxo no plano de falha. Este ato é claramente mostrado por microfotografias eletrônicas. Embora o comportamento das partículas superficiais e daquelas de base profunda seja diferente em relação ao cisalhamento a natureza de reorientação das partículas não pode ser negligenciada. A reorientação ou rotação na superfície, que permite erosão deve ocorrer com um total desprendimento da estrutura. Se as partículas forem submetidas a força de tração (forças superficiais de destacamento) ou submetidas a flexão, onde destacamentos de partículas possam ocorrer, e o campo de energia entre as partículas será reduzido. A orientação na direção do plano de falha, das partículas que estão fortemente ligadas em forma de grupos ou (flocos), pode causar o destacamento de grandes porções de solo, como é mostrado na Fig. 2.18.a.

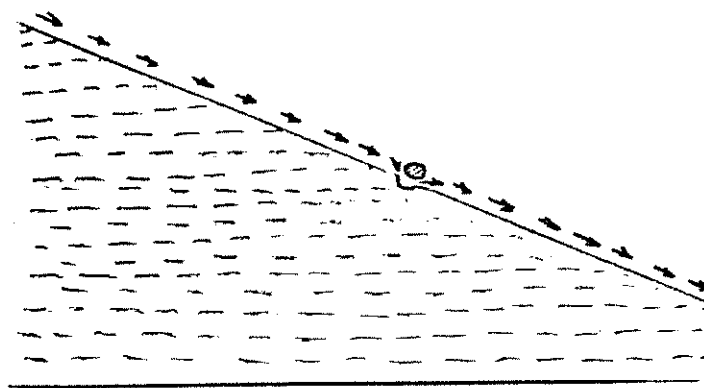
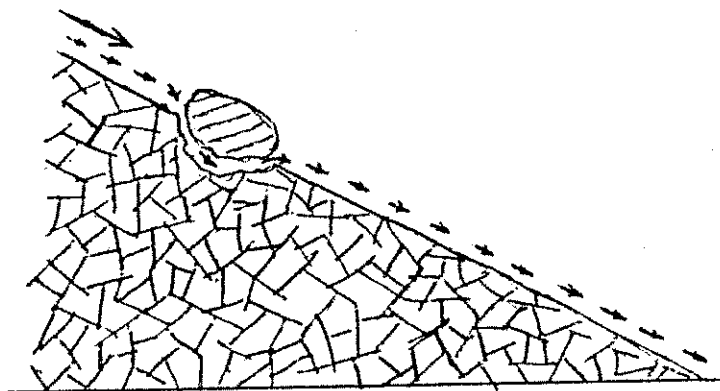
2.4 - Estudo analítico da erosão

Toda análise matemática da erosão apresentado neste sub-capítulo, é de autoria do Dr. Smalley (11).

Nos sistemas de solos secos, a tensão é resultante da forças coesivas e forças gravitacionais (peso das partículas). As forças coesivas nestes sistemas, tendem a se concentrarem nos pontos de contato. A natureza destas forças, parece ser de pequena intensidade química, do tipo das forças de Van Der

Figura 18.a - Mecanismo de destacamento de grupos de partículas
Paaswell, 1973.

Figura 18.b - Destacamento de partículas individuais.
Paaswell, 1973.



Waals. Nos sistemas que apresentam ligações interpartículas de tal natureza, pode-se considerar que as forças de coesão são independentes do tamanho das partículas. Porém se ao sistema for acrescentada uma quantidade maior de argila, não se pode admitir, que as forças coesivas independam do tamanho das partículas.

Com a finalidade de se estabelecer uma equação que retrate a tensão resistente num sistema de solo seco, são estabelecidas as seguintes considerações: a) o solo é composto de partículas esféricas de diâmetro D ; b) e são distribuídas ao acaso e as ligações entre as partículas são do tipo resistente nos solos siltosos. O agente externo erosivo considerado, é um fluxo do vento através de um orifício adequado.

Quando as amostras são submetidas ao fluxo, a ruptura ocorre devido a quebra dos vínculos de ligações entre as partículas. Isto ocorre de duas maneiras.

- 1- As partículas são simplesmente dispersadas.
- 2- As partículas são fragmentadas, isto é, a ruptura ocorre pela quebra da própria partícula.

Além da força de ação do fluxo, ocorrem violentas colisões entre os grãos de areia (que são destacados facilmente) e porções do solo da superfície. Portanto é necessário considerar um critério de falha de volume, onde V é o volume do solo atingido violentamente por um grão de areia.

Para fins de dedução da equação que estabelece a dependência entre as tensões resistentes e certas variáveis do solo, é tomada uma seção, de espessura t , perpendicular a tensão cisalhante, conforme a Fig. 2.19. O sistema de solo, tem um volume total V_a e a zona de falha tem espessura t e

volume V_s . A falha que ocorre no volume V_s , pode ser representada pela falha que ocorre na superfície do solo no volume V_i . Então podemos escrever que:

$$V_s = V_i \quad \text{Eq. 3}$$

A Fig. 2.19 apresenta o sistema de solo ideal considerado. A tensão cisalhante t , tende a separar o sistema em duas partes. A ruptura de partículas ocorre somente numa determinada zona estipulada (conforma a Fig. 2.19). O número médio (P) de partículas tendo porção de suas superfícies dentro da zona de falha, é dado por (29):

$$P = \rho_0 V_s / V_p \quad \text{Eq. 4}$$

Onde V_p é o volume - significante atingido de partículas e ρ é a densidade fracional envolvida. A zona de falha pode ser considerada como um sub-sistema. A densidade fracional envolvida, isto é, a relativa proporção de partículas de solos e vazios é a mesma para todo sistema por conveniência de cálculo, apesar da espessura da zona de falha ser pequena. Considerando que, parte de cada partícula contribui na zona de falha, o diâmetro D , torna-se um elemento importante para o cálculo da tensão resistente. V_p pode ser calculado por:

$$V_p = A_p t \quad \text{Eq. 5}$$

Onde A_p é a área significativamente atingida das partículas da zona de falha.

$$P = \rho \frac{(Aat)}{(Apt)} \quad \text{Eq. 6}$$

A Fig. 2.20, mostra o comportamento de uma partícula da zona da falha. A partícula é cortada em forma de discos de espessura t e raio r . O disco divide efetivamente (na perpendicular) o diâmetro em duas partes ou seja, x e $(D - x)$. De acordo com a Fig. 20, temos:

$$A_i = \frac{1}{D} \int_0^D \pi [x (D - x)] dx \quad \text{Eq. 7}$$

Substituindo na equação 6, tem-se:

$$P = \frac{6 \rho A a}{\pi D^2} \quad \text{Eq. 8}$$

Tendo determinado o número de partículas introduzidas na zona de falha, é necessário calcular o número de contatos interpartículas no volume do sistema. Os vínculos nestes contatos interpartículas são quebrados quando a falha ocorre. Podemos determinar primeiramente a área significativa da superfície de uma partícula na secção de falha, ou seja:

$$A_w = \pi D t \quad \text{Eq. 9}$$

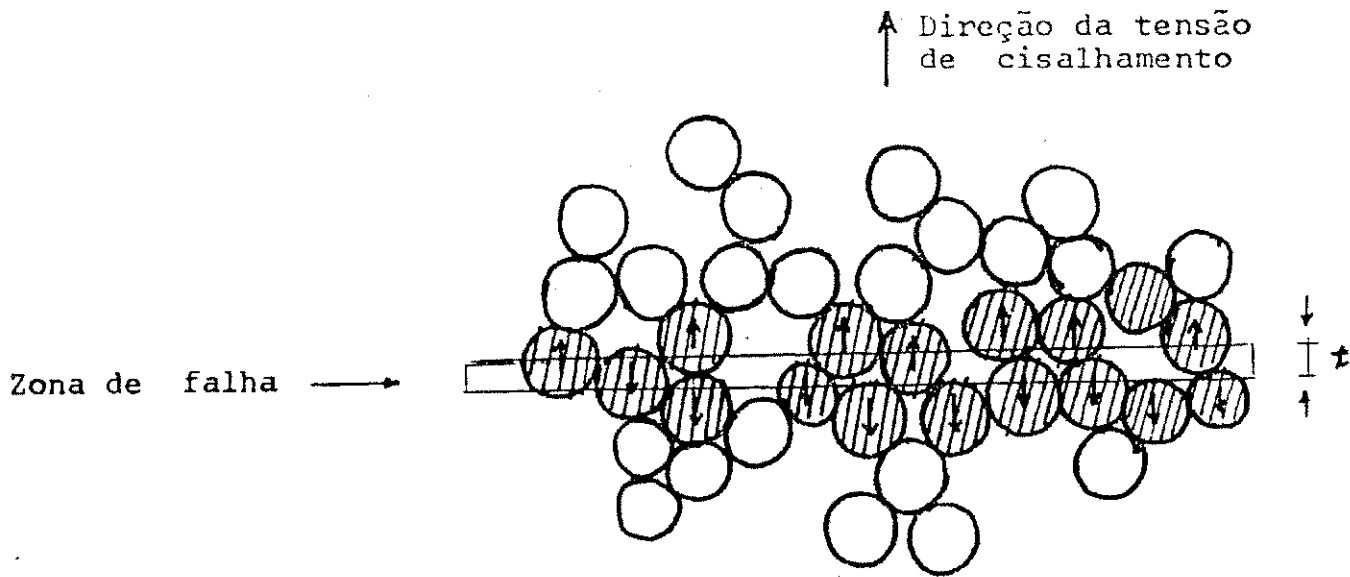
o valor F o qual representa o número médio de vínculos em alguma partícula da zona de falha, é dado por:

$$F = \frac{k A_w}{\pi D^2} = \frac{k t}{D} \quad \text{Eq. 10}$$

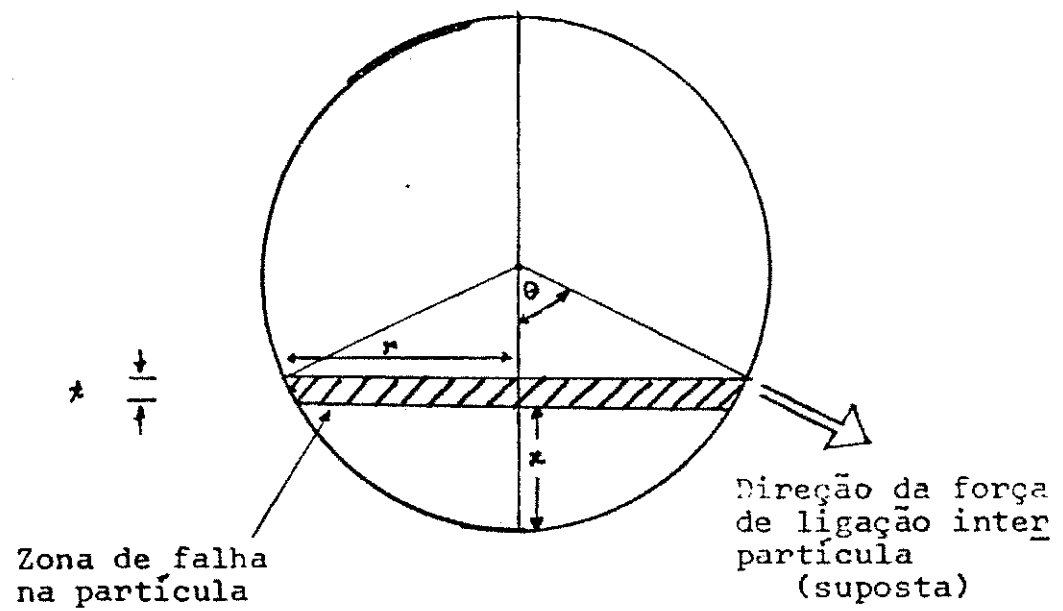
Onde k é o número de coordenação. Isto dá uma indicação da intimidade das partículas envolvidas no sistema do solo. Num

Figura 2.19 - Zona de falha do sistema de solo ideal sujeito à tensões de cisalhamento, Smalley, 1970.

Figura 2.20 - Partícula de solo ideal apresentando a provável zona de falha e a provável direção da força interpartícula, Smalley, 1970.



- Partícula ideal no sistema de solo
- ⊗ Partículas que contribuem na falha do sistema
- ↑↓ Sentido de movimento das partículas no momento da falha



material ideal, cada partícula tem k vizinhos próximos. O número médio (N) de vínculos na seção de falha é dado por:

$$N = \frac{P F}{2} \quad \text{Eq. 11}$$

Fixher, mencionado na referência 11, analisando um vínculo entre duas partículas, exclui os vértices das partículas. Considere que a direção do vínculo é normal a superfície da partícula. A resistência média do vínculo é B , e atua conforme a Fig. 20. Segundo ele, a tensão resistente do solo é estimada por:

$$\sigma = \frac{0,55 \beta \rho k t}{D^3} \quad \text{Eq. 12}$$

E portanto ele conclui que resistência a erosão, é relacionada diretamente com a densidade fracional envolvida, número de coordenação e resistência do vínculo interpartícula é inversamente proporcional ao cubo do diâmetro da partícula.

CAPÍTULO 3

INVESTIGAÇÕES DE CAMPO

3.1 - Introdução

As investigações de campo realizadas neste trabalho de pesquisa, tiveram como objetivo, a obtenção de dados os quais servirão de suporte para uma melhor visualização da erosão superficial nos taludes de corte das estradas nordestinas.

Conforme com o que foi visto no capítulo anterior, as pesquisas sobre erosão em solos, mostram que este fenômeno é função de muitos fatores, sendo assim, muito difícil se estabelecer uma teoria precisa sobre a erosão. Por esta razão, o que se pretende mostrar neste trabalho, é uma discussão sobre a erosão nos taludes selecionados com base nos dados de campo e nos conhecimentos atuais sobre erosão.

Os trabalhos executados in situ em cada talude selecionado foram os seguintes:

- 1 - Levantamento topográfico expedito, observando-se a seção de corte, perfil, ângulo de inclinação, etc.
- 2 - Levantamento geológico da superfície do talude analisando-se o tipo de solo (residual ou sedimentar), rocha origem e os principais minerais

- componentes da rocha e dos solos do talude.
- 3 - Levantamento fotográfico, nostrando-se as condições do talude.
 - 4 - Anotações sobre as condições de drenagem.
 - 5 - Anotações sobre o tipo de proteção da superfície do talude.
 - 6 - Retirada de amostras deformadas e indeformadas, visando-se a obtenção dos principais parâmetros dos solos.
 - 7 - Levantamento climatológico da região, tomando-se por base a precipitação pluviométrica e as temperaturas máxima e mínima da região.

3.2 - Seleção e localização dos taludes

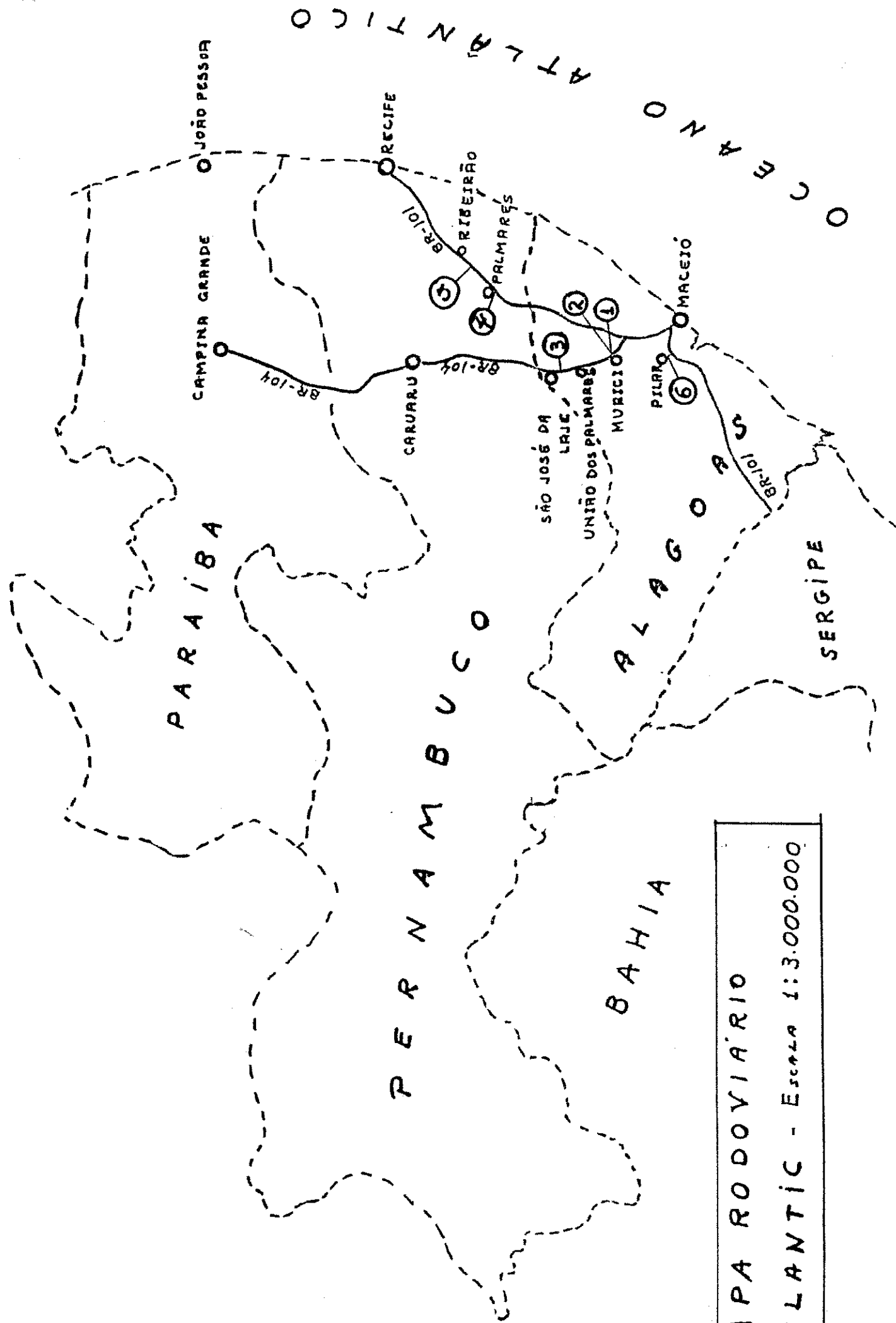
Os taludes selecionados situam-se nos estados de Alagoas e Pernambuco, localizados na região da mata. A razão da escolha de taludes localizados naquela região, reside na alta taxa de precipitação pluviométrica daquela zona, já que o fator chuva é o principal agente externo na erosão dos solos. A topografia bem como a dimensão do corte, foram outros fatores levados em consideração na escolha dos taludes, isto porque, observa-se que a erosão pode ocorrer tanto nos taludes de grandes dimensões como nos de pequenas dimensões. A proteção da face do talude também foi considerada na escolha.

Visando-se um estudo comparativo, foram selecionados quatro taludes com pequenos e grandes problemas de erosão e outros dois sem problemas com erosão. Os dois taludes sem erosão situam-se próximos a outros taludes com problemas de erosão também escolhidos para análises. O mapa dos Estados de Alagoas e Pernambuco e Paraíba, apresentado na Fig. 3.1, mostra a posição geográfica dos taludes. Suas localizações exatas são as seguintes:

Taludes 1 e 2 - Situam-se na BR-104, a 48,7 Km da divisa Alagoas-Pernambuco, sendo o primeiro a direita, e o segundo à esquerda; sentido de caminhamento Caruaru-Maceió. (Pertencem ao mesmo corte).

Talude 3 - Situa-se também na BR-104, estado de Alagoas a 26,4 Km da divisa Alagoas-Pernambuco, lado esquerdo, no mes

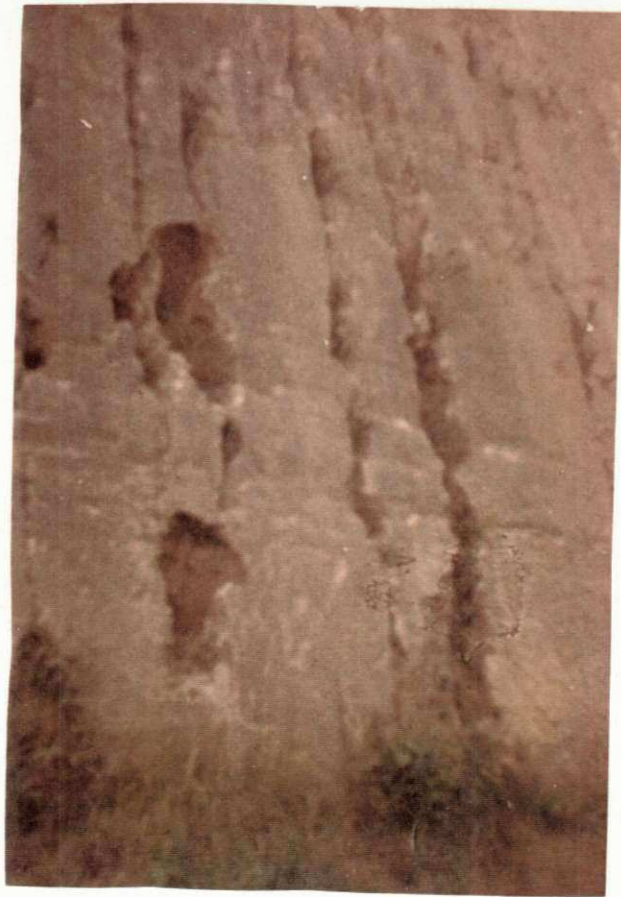
Figura 3.1 - Localização geográfica, dos taludes analisados.
Os números dentro dos círculos indicam as
localizações dos taludes.



MAPA RODOVIÁRIO
 ATLANTIC - Escala 1:3.000.000

Figura 3.2.a - Aspecto da erosão superficial do talude 1

Figura 3.2.b - Aspecto da erosão superficial do talude 1



mo sentido que os taludes 1. e 2.

Talude 4 - Situa-se na BR-101, a 22,5 Km da divisa Alagoas-Permambuco, lado esquerdo, no sentido Maceió-Recife.

Talude 5 - Situa-se também na BR-101, Estado de Pernambuco, a 51,3 Km, da divisa Alagoas-Pernambuco, lado esquerdo no sentido Maceió-Recife.

Talude 6 - Está localizado na estrada que liga a cidade do Pilar (Estado de Al), a Br-101, 700 m daquela cidade, la do esquerdo, no sentido cidade do Pilar-Br101 (ver Fig. 3.1).

3.3 - Descrição dos Taludes

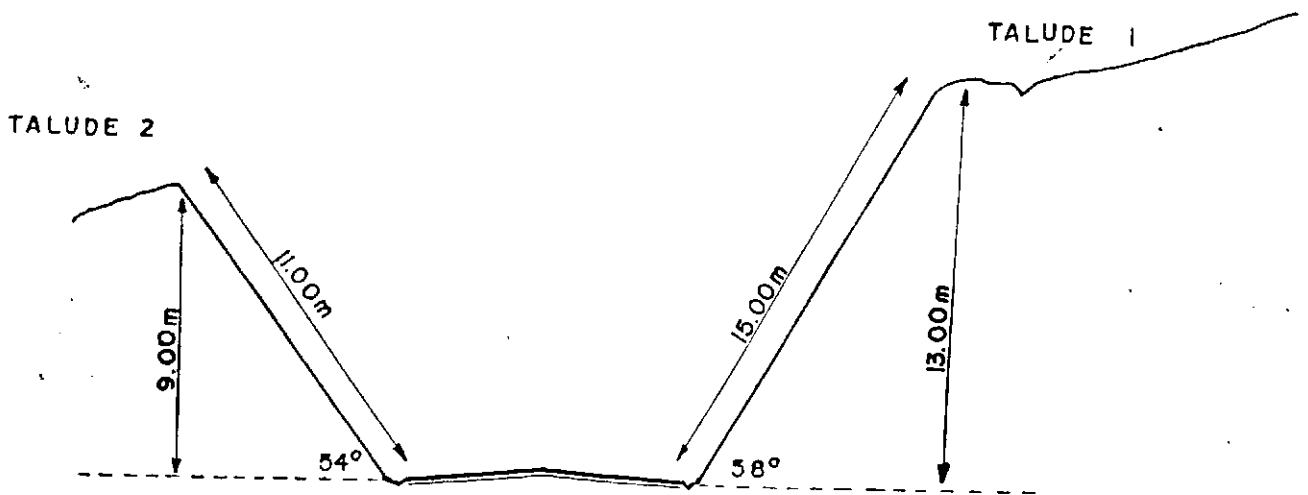
Para cada talude selecionado, tomou-se para análise os seguintes elementos: Perfil da maior seção do corte, fotografias das principais partes, dados geológicos, precipitação pluviométrica, drenagem, temperatura, tipo de proteção superficial e a mostras deformadas e indeformadas para determinação dos principais parâmetros do solo, principalmente aqueles que determinam a resistência do solo ao cisalhamento.

3.3.1 - Taludes 1 e 2

As fotografias apresentadas nas Fig. 3.2.a e b mostra o tipo de erosão que ocorre no talude 1. Trata-se de erosão de ravinamento, isto é, erosão em pequenos e médios sulcos. Estes sulcos começam na parte intermediária do talude e se estendem até o seu pé. Alguns destes sulcos, formam ao longo do seu curso, cavernas com dimensões que variam de 30 a 80 cm de diâmetro e profundidade variável entre 30cm a 70cm. Na Fig. 3.2.a, vê-se em sua parte central, uma destas cavidades a qual apresenta dimensões aproximadas de 70 cm de diâmetro e 60 cm de profundidade. É provável que alguma destas cavernas, futuramente, venha ser a causa do deslizamento de alguma porção deste talude, em face do seu crescimento gradativo, devido a erosão.

O perfil do corte em que se encontram estes taludes, é mostrado na Fig. 3.3; onde o talude 1 tem maiores dimensões que o 2. Quanto a drenagem o primeiro talude apresenta drenagem superficial com valetas na crista e no pé. A valeta de crista está parcialmente obstruída por palhas de cana-de-açúcar, havendo desta forma, deficiência de drenagem. O talude 2 não tem problema

Figura 3.3 - Perfil da seção transversal dos taludes 1 e 2



com drenagem. As fotografias fazem ver também, que nenhum dos dois taludes têm proteção vegetal ou um outro tipo qualquer.

O aspecto geológico foi estudado com base nas análises mineralógicas, macroscópicas, fundamentadas nas observações in situ e informações colhidas no Mapa Geográfico de Reconhecimento do Embasamento Cristalino, entre as Bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá e Sergipe-Alagoas, Petrobrás, 1964. A divisão, aproximada, dos horizontes do perfil do talude, foi feita com base nos dados obtidos em laboratórios, os quais serão estudados com maiores detalhes nos próximos capítulos.

O perfil do talude 1 é apresentado na Fig. 3.5, o qual é composto por quatro horizontes. O primeiro é a cobertura orgânica com uns 40 cm. de espessura, seguido de um horizonte argiloso de aproximadamente 5 m. de espessura com tonalidade vermelha, depois uma camada (horizonte), de argila siltosa amarelada de 2 m. de espessura e finalmente a rocha alterada com aproximadamente 5,5 m. De acordo com os resultados dos estudos geológicos, trata-se de um solo residual cuja rocha origem é o granito. Os principais minerais encontrados na rocha alterada foram feldspato, quartzo e mica. Nas camadas VI e III os minerais encontrados foram o quartzo em razoável quantidade, feldspato do tipo microclina. Na camada II, os principais foram os minerais argílicos. O talude 2 é apresentado na Fig. 3.4. Este em contraste com o talude 1 não apresenta nenhum indício de erosão apesar de pertencer ao mesmo corte do 1. Os dados geológicos do talude 2 são os mesmos que os do talude 1. Seu perfil é mostrado na Fig. 3.6.

Os dados climatológicos desta região, são apresentados no quadro 3.1. Nêle se tem as precipitações pluviométricas médias mensais durante o período de 1920 a 1967. Estes dados foram fornecidos pela Estação Experimental de Tratamento da Cana-de-Açúcar do Estado de Alagoas.

É de capital importância, evidenciar ou resumir os dados apresentados no quadro 3.1, nos seguintes elementos:

- Temperatura mínima anual 22.3°C
- " " máxima " 25.8°C
- " " média " 24.2°C
- Precipitação pluviométrica média anual 1417.6 mm.

Figura 3.4 - Aspecto geral do talude 2.

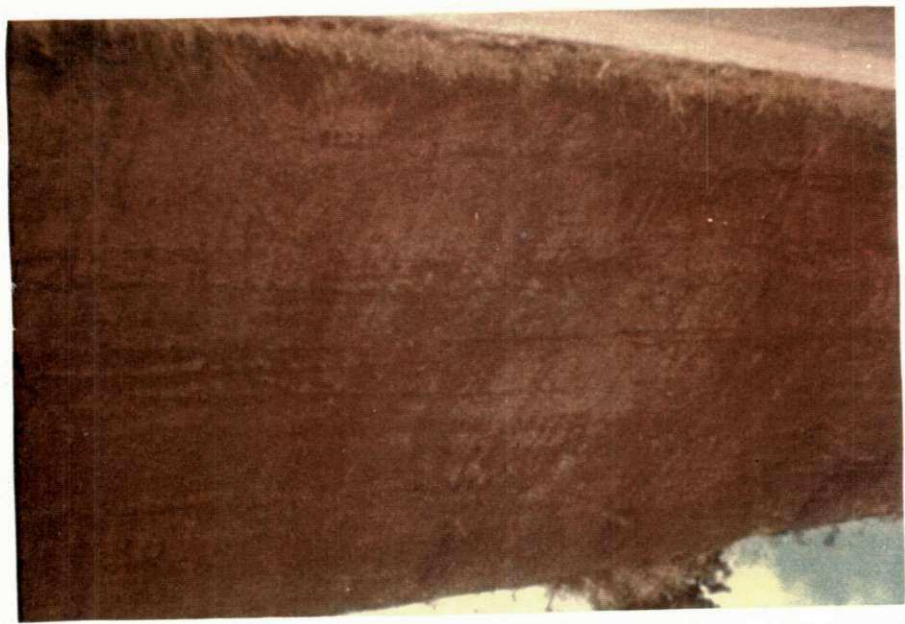
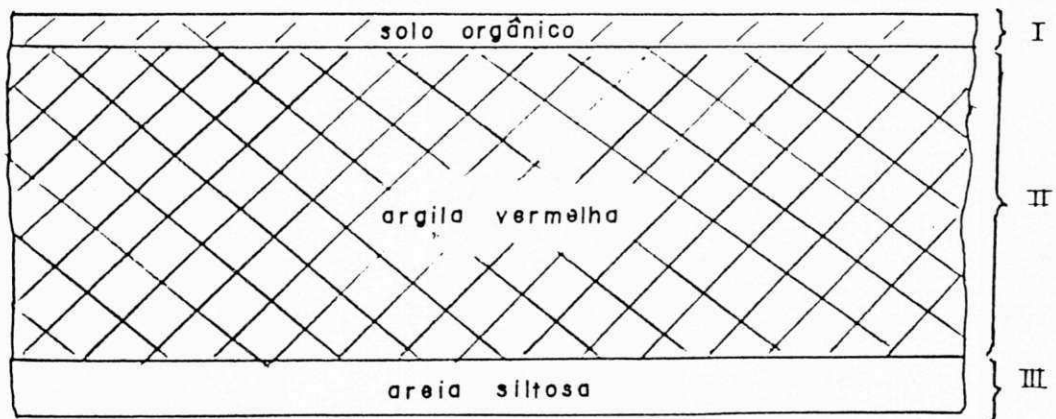
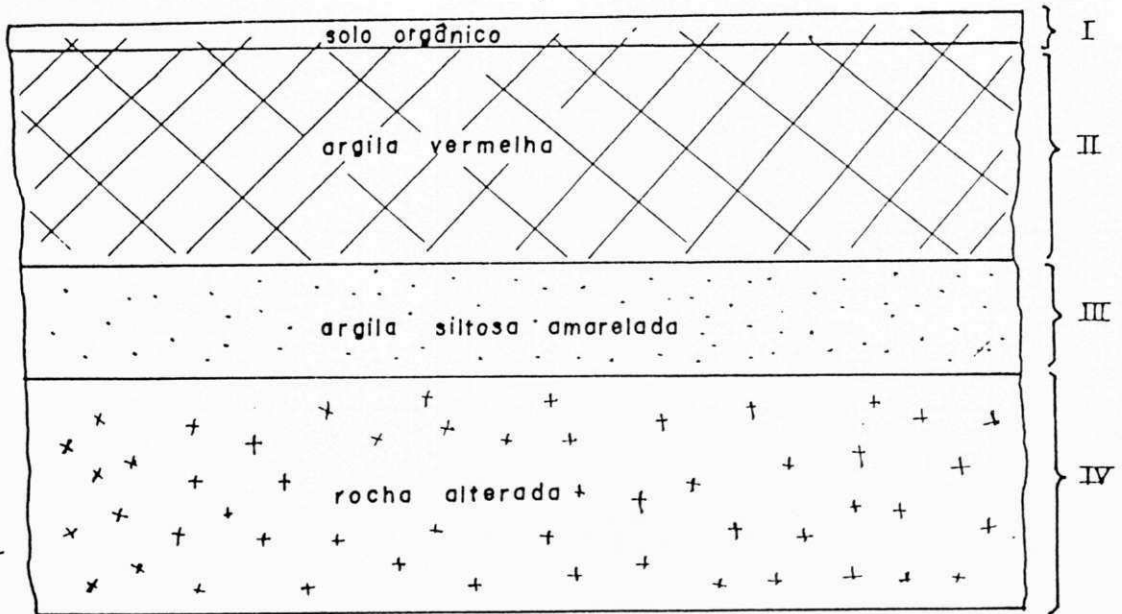


Figura 3.5 - Perfil esquematizado dos horizontes do talude 1.

Figura 3.6 - Perfil esquematizado dos horizontes do talude 1.



Meses	Prec. pluv. (mm)	Temperatura (°C)
Jan.	53,6	25.6
fev.	49.5	25.8
mar.	119.2	25.6
abr.	204.8	24.9
mai.	234.3	24.1
jun.	229.1	23.0
jul.	208.8	22.3
ago.	127.5	22.3
set.	88.9	23.0
out.	39.3	24.2
nov.	21.1	24.9
dez.	41.5	25.2

Quadro 3.1 - Precipitação pluviométrica e temperatura da região dos taludes 1 e 2.

3.3.2 - Talude 3

As fotos das Fig. 3.7-a, b, c, d e e, retratam os problemas de erosão no talude 3. Como se pode observar, neste talude existe erosão superficial e profunda, tendo ocorrido também grandes escorregamentos. Na Fig. 3.7.a, vê-se erosão do tipo voçoroca profunda muito bem representada pela caverna que aparece no centro da foto. A foto da Fig. 3.7.b, dá uma visão geral dos diversos tipos de erosão existente neste talude, como também um grande escorregamento, o qual aparece na extremidade direita da foto. A foto 3.7.c, nos mostra uma parte do talude onde a erosão começou de forma laminar e em seguida o desmoronamento de pequenas e médias porções de solo, até formar o aspecto mostrado pela foto. Erosão do tipo de ravinamento profundo é muito bem exemplificado pela foto da Fig. 3.7.d, na qual aparece canais de até 1.80 m. de profundidade. Finalmente a foto apresentada na Fig. 3.7.e, focaliza uma das muitas cavernas ali existentes. Esta que aparece na foto tem dimensões aproximadas de 1.60 m. de altura, 0.80 m. de largura e 1.20 m. de profundidade.

O perfil de sua seção transversal é mostrado na Fig 3.8, o qual nos dá uma visão bem aproximada de suas dimensões geométricas. Quanto a drenagem, antes havia valeta de crista e sarjeta no pé do talude; atualmente só existe a sarjeta devido aos escorregamentos ocorridos. Não existe nenhum tipo de proteção de superfí-

Figura 3.7.a - Aspecto geral da erosão no talude 3.



Figura 3.7.b - Visão geral do talude 3.

Figura 3.7.c - Tipo de erosão laminar no talude 3, com formação de fendas transversais à face do talude.



Figura 3.7.d - Tipo de rosão de ravinamento do talude 3.

Figura 3.7.e - Tipo de voçoroca profunda do talude 3.

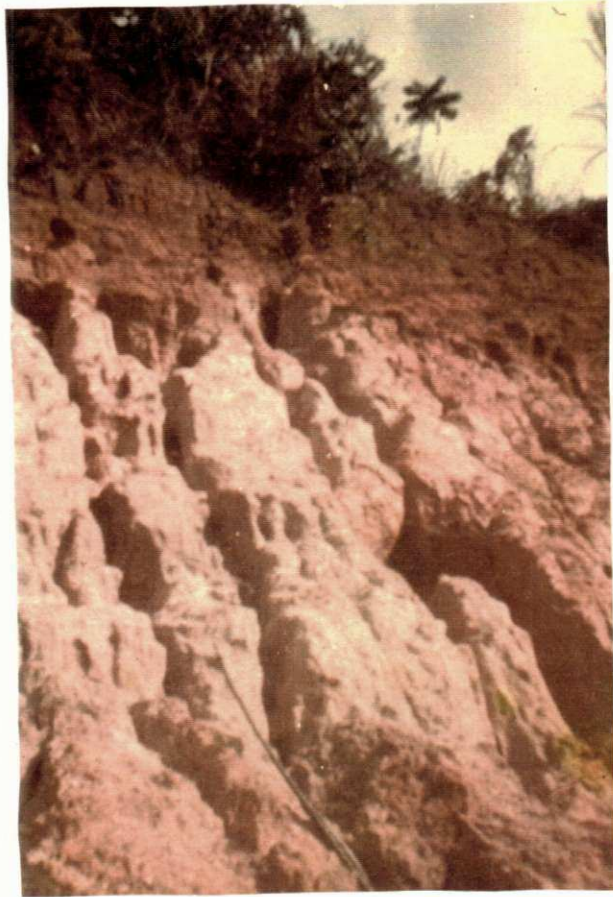
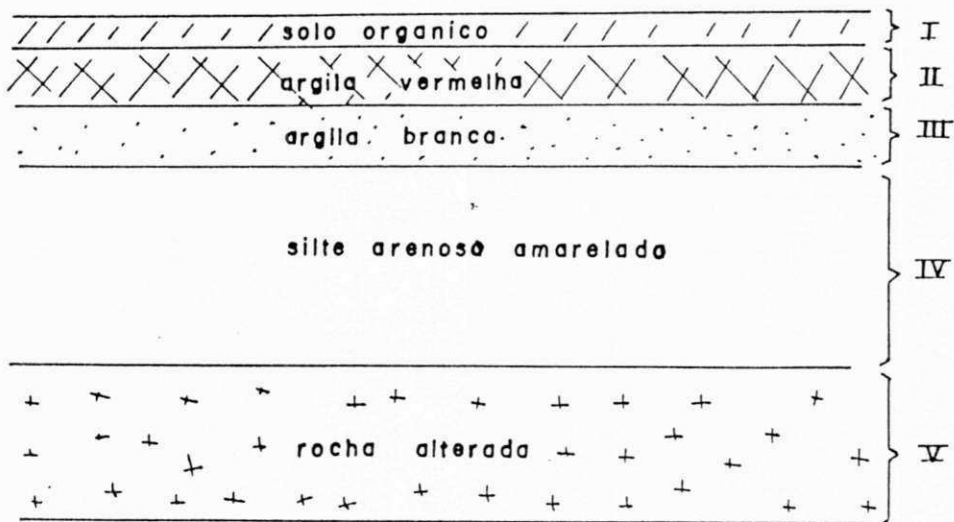
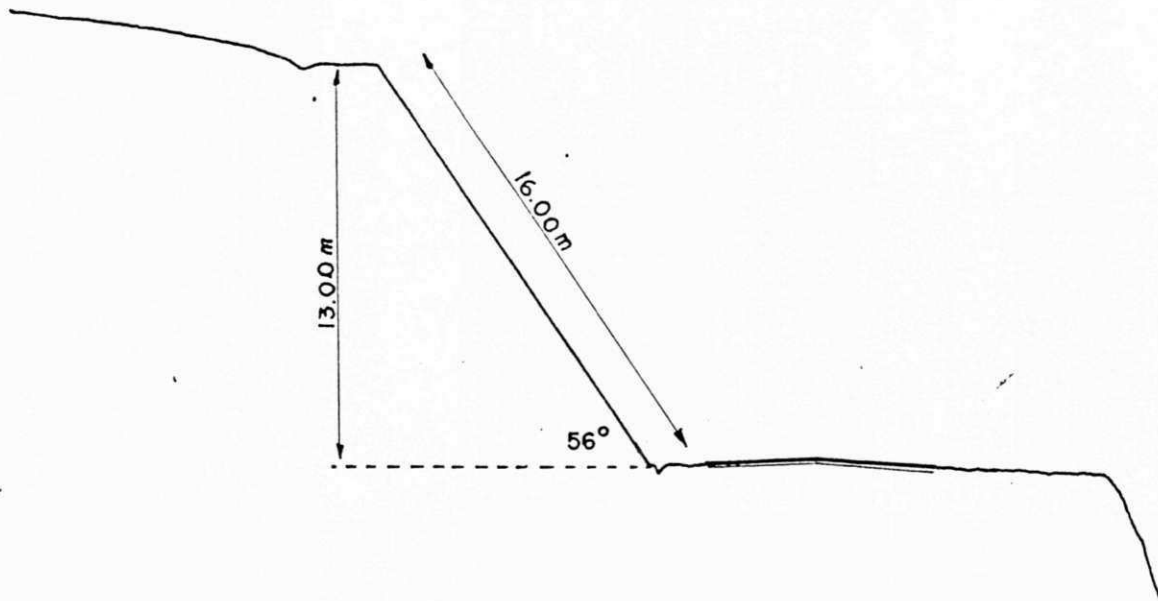


Figura 3.8 - Perfil da seção transversal do talude 3.

Figura 3.9 - Perfil esquematizado, dos horizontes do talude 3.



cie de taludes.

Com relação ao aspecto geológico, trata-se de um solo residual e as análises mineralógicas da rocha alterada, indicam que a rocha origem é o granito. O seu perfil é mostrado na Fig. 3.9 o qual é composto por cinco horizontes, os quais são solo orgânico, argila vermelha, argila branca, silte arenoso amarelado e a rocha alterada. Na rocha alterada foram encontrados grandes quantidades de feldspato potássico, (ortoclásio e microclina). Ocorrência de uma boa quantidade de micas brancas, razoável quantidade de quartzo e presença de anfibólios. Nos demais horizontes foram encontrados os minerais de caulenita (principalmente na camada III), ortoclásio, microclina e quartzo no horizonte VI, clorita e minerais de argila. As espessuras aproximadas dos horizontes, de cima para baixo são: 0,6 m, 2,5 m, 2,5 m, 4,0 m e 3,5 m.

Os dados climatológicos desta região são apresentados no quadro 3.2:

Meses	Prec. pluv. (mm)	Temperatura (°C)
jan.	29.6	25.7
fev.	34.9	25.9
mar.	62.6	25.6
abr.	127.9	24.5
mai.	183.7	24.0
jun.	170.7	23.2
jul.	154.7	22.8
ago.	103.3	22.9
set.	52.2	23.6
out.	26.9	24.4
nov.	21.1	24.4
dez.	23.6	25.0

Quadro 3.2 - Precipitação pluviométrica e temperatura da região do talude 3.

Os principais dados do quadro 3.2, são:

- Temperatura mínima anual 22.8°C
- " " máxima " 25.9°C
- " " média " 24.3°C
- Precipitação pluviométrica média anual total de 1004.9 mm.

O período correspondente a estes dados é de 1912/1967

3.3.3 - Talude 4

O aspecto geral do talude 4, é retratado nas Fig. 3.10. a, b e c. Estas fotos mostram que os tipos de erosão ocorrida são de ravinamento e laminar. O primeiro tipo, formação de pequenos sulcos, inicia-se na parte intermediária do talude e se estende até próximo à sua base. O segundo, ocorre um pouco acima de sua parte intermediária, onde juntamente, se tem solo jovem (solo intermediário entre a rocha alterada e o solo maduro). O processo de erosão ocorrida neste ponto, é análogo ao descrito no sub-item anterior, quando se referiu ao processo de erosão laminar. A Fig. 3.10 c, nos mostra um canal, com dimensões aproximadas de 2 m. de largura por 1.5m. de profundidade, feito pela água, na rocha alterada.

O perfil de sua seção transversal é mostrado na Fig. 3.11, onde se tem a ordem de grandeza de suas dimensões. Este talude não tem valeta de proteção de base. Sua valeta de crista está em perfeita condição de drenagem. Não tem proteção superficial, com exceção de pequenas partes onde ocorre uma vegetação natural.

Sob o aspecto geológico trata-se de um solo residual originado do guinaisse, conforme as análises mineralógicas. O perfil dos horizontes de solo e rocha que o compõe é ilustrado na Fig. 3.12. Os horizontes são: solo Orgânico, argila arenosa pouco vermelha, areia argilosa amarelada e a rocha alterada. Os principais minerais encontrados na rocha alterada foram: feldspato, quartzo e mica. Nos outros horizontes os minerais de maior ocorrência foram quartzo, minerais de caulim, micas e minerais de argila. As espessuras aproximadas, dos horizontes, de cima para baixo, são: 0,50 m, 4,0 m, 2,5 m, e 13,0 m.

A precipitação pluviométrica e as temperaturas médias mensais, no período de 1920 a 1967, desta região, tem os valores mostrados no quadro 3.3. O resumo climatológico da região é:

- Temperatura mínima anual 21.8°C
- " " máxima " 25.7°C
- " " média " 24.1°C
- Precipitação pluviométrica média anual total de 1429.6 mm.

Figura 3.10 a - Visão geral do talude 4.



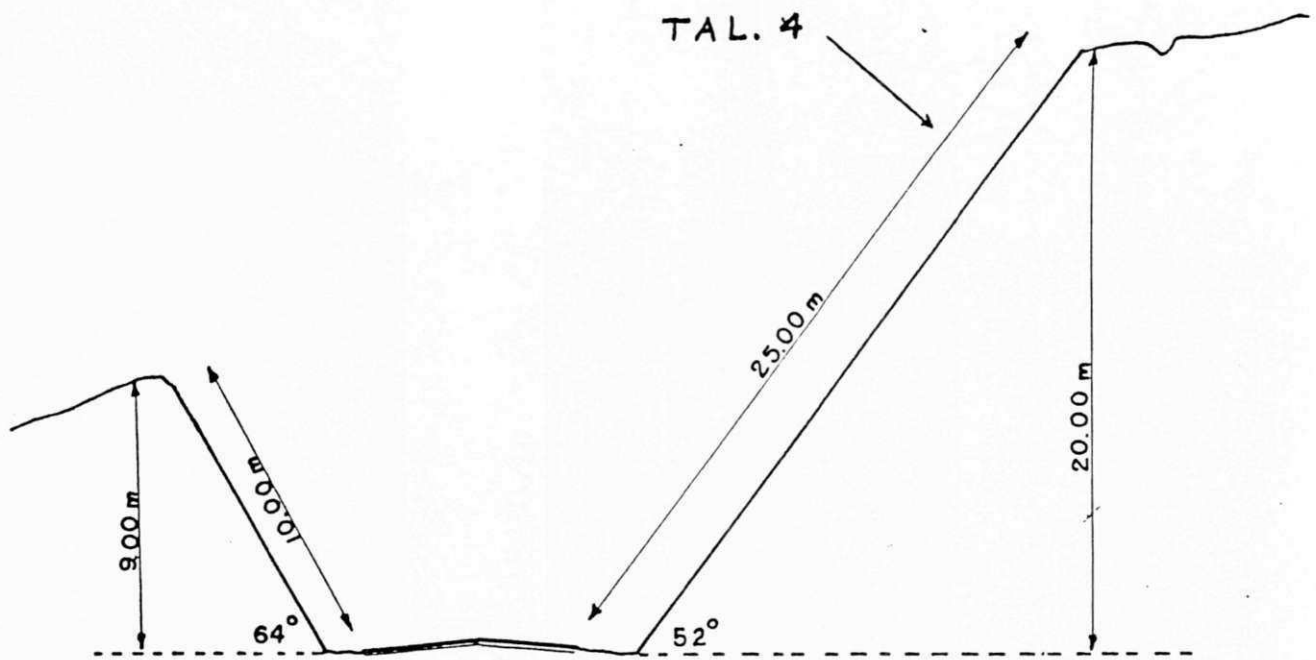
Figura 3.10.b - Aspecto da erosão na divisa de horizonte, entre a rocha alterada e o solo maduro, do talude 4.

Figura 3.10.c - Erosão em forma de Canais na rocha alterada do talude 4.



Figura 3.11 - Perfil da seção transversal do talude 4.

Figura 3.12 - Perfil esquematizado, dos horizontes do talude 4.



Meses	Prec. Pluv. (mm)	Temperatura (°C)
jan.	51.7	25.5
fev.	70.8	25.7
mar.	128.6	25.4
abr.	186.7	24.6
mai.	247.6	24.3
jun.	242.0	22.9
jul.	185.3	22.2
ago.	134.4	21.8
set.	72.4	23.0
out.	35.6	24.1
nov.	33.8	25.0
dez.	47.6	25.1

Quadro 3.3 - Precipitação pluviométrica e temperatura da região do talude 4.

3.3.4 - Talude 5

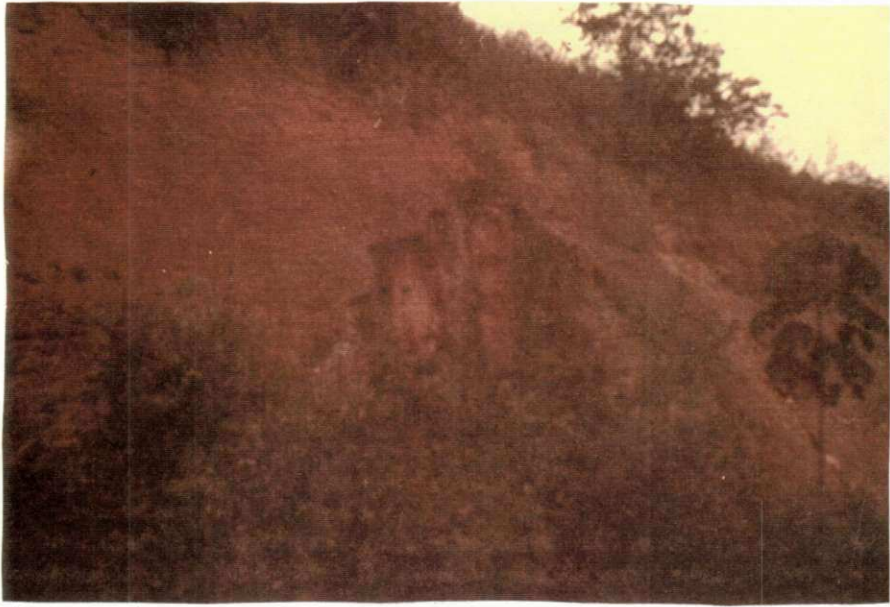
A situação deste talude é apresentada nas Fig. 3.13 a e 3.13.b, Este talude no aspecto geral não tem, atualmente grandes problemas com erosão. Ele tem dois tipos de erosão bastante diferentes. Na Fig. 3.13.a, tem-se um pequeno escorregamento, causado, possivelmente por escavações no pé do talude naquele lugar, e que atualmente a água está erodindo lentamente. Na Fig. 3.13.b, vê-se erosão do tipo laminar na região que é divisa entre o solo orgânico e o solo maduro, a qual se estende longitudinalmente ao longo de todo talude, com exceções de alguns pontos.

O perfil da seção transversal maior, é mostrado na Fig. 3.14. Como se vê, é um talude pequeno e de alta inclinação. Não apresenta problemas com drenagem, pois está servido com valeta de crista e sarjetas. Não tem nenhum tipo de proteção superficial

Geologicamente é um solo residual composto por três horizontes, conforme mostra a Fig. 3.15. Tem uma camada de silte argiloso amarelado, outra de argila vermelha e o solo orgânico. No horizonte II tem-se grande ocorrência de minerais de argila e minerais ferruginosos. Na camada III, tem ocorrência de micas, quartzo alguns feldspato. Possivelmente foi originado do granito. As espessuras aproximadas dos horizontes, de cima para baixo, são: 0,50m, 4,5 m. e 2,0 m.

Figura 3.13.a - Deslizamento provocado por escavações no pé do talude 5.

Figura 3.14.b - Erosão laminar, ao longo de todo talude 5.



O aspecto climatológico deste talude é análogo ao do talude 4, já que ambos se situam na mesma região em que foram colhidos os dados sobre precipitação e temperaturas.

3.3.5 - Talude 6

Este talude não apresenta problemas com erosão. como pode ser visto nas Fig. 3.16.a e 3.16.b. Trata-se de um talude não muito alto, mas de comprimento longitudinal, grande (aproximadamente 400 m). Em algumas partes encontra-se escavações, feitas por moradores da região, que indiscriminadamente retiram material do talude para fins diversos.

A Fig. 3.17, mostra o perfil de sua maior seção transversal. Sua inclinação é aproximadamente 90°; não tem sarjeta de proteção da base, mas apresenta valeta de crista. A superfície de sua face é desprovida de qualquer proteção.

O perfil de suas camadas é mostrado na Fig. 3.18. É composto por três camadas, sendo a primeira solo orgânico, a segunda uma argila vermelha e por fim um solo marrom com características lateríticas. De acordo com as análises geológicas, trata-se de um solo residual originado de uma rocha sedimentar pertencente ao grupo Barreiras ou formações pré-Barreiras. Os principais minerais que o compõe são: minerais ferruginosos e minerais argílicos, sendo o primeiro do tipo limonita. As espessuras aproximadas dos horizontes, de cima para baixo, são: 0,5 m, 5,0 m e 3,5 m.

A precipitação pluviométrica e temperaturas da região, tem os valores apresentados no quadro 3.4, correspondentes ao período de 1921 a 1953.

O resumo climatológico da região, pode ser assim resumido:

- Temperatura mínima anual 22.4°C
- " " máxima " 25.9°C
- " " média " 24.4°C
- Precipitação pluviométrica média anual total
1678.5 mm.

Figura 3.14 - Perfil da seção transversal do talude 5.

Figura 3.15 - Perfil esquematizado dos horizontes do talude 5.

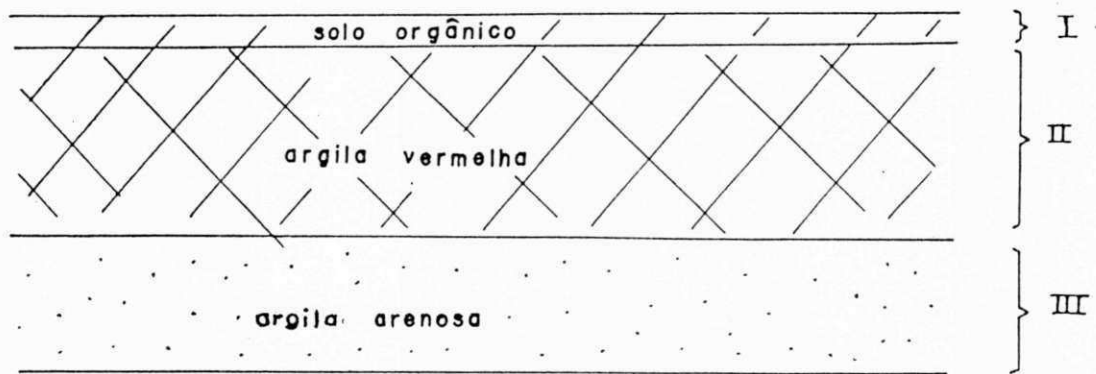
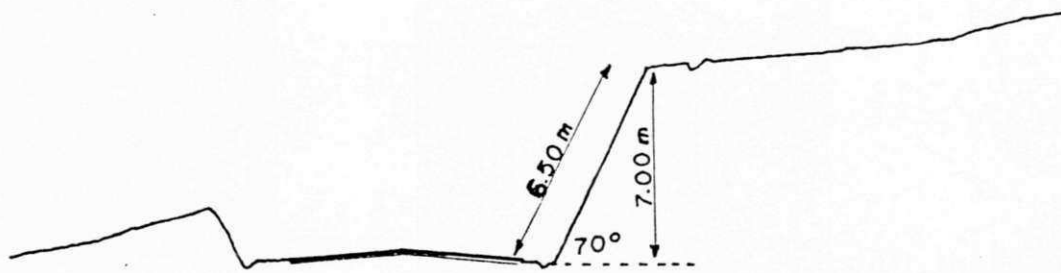


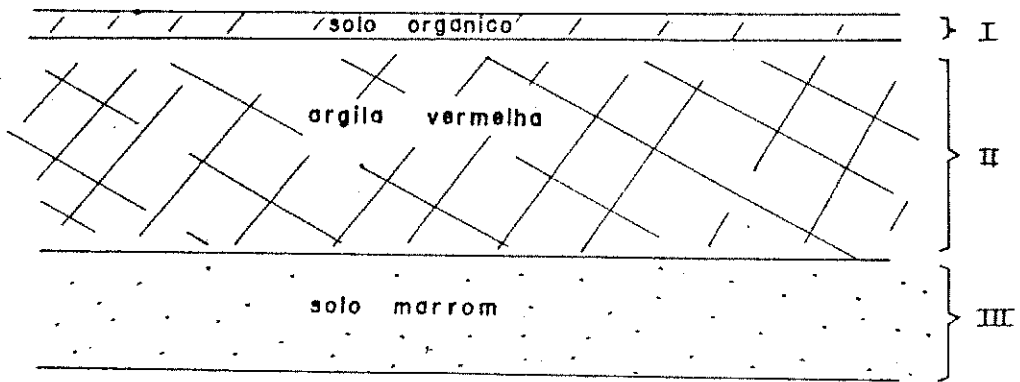
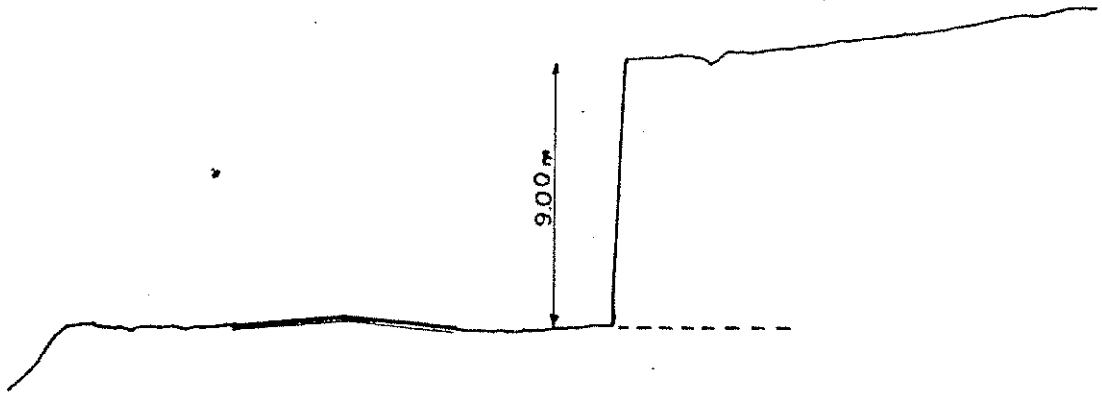
Figura 3.16.a - Visão geral do talude 6.

Figura 3.16.b - Visão parcial do talude 6, mostrando o seu estado atual.



Figura 3.17 - Perfil da seção transversal do talude 6.

Figura 3.18 - Perfil esquematizado, dos horizontes do talude 6.



Meses	Prec. pluv. (mm)	Temperatura (°C)
jan.	57.0	25.8
fev.	79.3	25.9
mar.	113.6	25.7
abr.	174.9	25.2
mai.	317.9	24.1
jun.	281.3	23.0
jul.	268.0	22.4
ago.	157.4	22.4
set.	96.1	23.2
out.	69.1	24.2
nov.	31.9	25.1
dez.	32.6	25.6

Quadro 3.4 - Precipitação pluviométrica e temperatura da região do talude 6.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS DE LABORATÓRIO

4.1 - Introdução

No campo da engenharia de solos, nada pode ser dito sem que haja conhecimento das propriedades elementares do solo. Para isto, é precisa a realização de ensaios que determinam os principais parâmetros e propriedades dos solos em estudo. Como a pretensão deste trabalho é de apresentar o problema da erosão superficial nos taludes de corte, com base nos tipos de solos encontrados na superfície do talude. Os ensaios realizados foram aqueles correntes nos estudos de solos, tais como granulometria, limites de Attenberg densidade real, etc. Além destes, o cisalhamento direto, foi executado já que o problema da erosão, estão intimamente ligados com a resistência do solo ao cisalhamento, além de outros fatores intrínsecos ao solo. O processo de execução a resultados das experiências realizadas em laboratórios serão apresentados a seguir.

4.2 - Retirada das amostras

Para cada talude, foram coletadas três amostras amolgadas e seis indeformadas. Com as amostras deformadas foram realizados os ensaios de granulometria, limites de Attenberg, densidade dos grãos e análise química, enquanto que as indeformadas foram

submetidas ao ensaio de cisalhamento direto. As amostras indeformadas foram coletadas em um mesmo horizonte e a escolha deste foi em função da intensidade de erosão. Sendo assim, as amostras indeformadas foram coletadas no horizonte mais erodido.

A coleta de amostras foram facilitadas, graças ao estado de compactação natural dos solos. Assim sendo, foi possível retirar, manualmente, as amostras da superfície do talude, com ferramentas dotadas de lâminas cortantes, pelo seguinte processo:

- 1 - Cortando-se o solo, cuidadosamente, até ser obtido, um bloco, ainda preso ao talude, com o formato de um paralelepípedo com 15 cm. de comprimento, 10 cm. de largura e 8 cm. de altura, sendo que esta, na direção normal à superfície do talude.
- 2 - Com uma caixa de madeira sem fundos e com as mesmas dimensões do bloco, este era deslocado do talude.
- 3 - Finalmente, com o bloco já encaixado, fazia-se o parafinamento e marcação da face correspondente à superfície do talude.

Cada amostra foi identificada por dois, números, onde o primeiro indica o talude e o segundo a sua ordem de coleta. Assim sendo, as amostras deformadas coletadas do talude A, tem a seguinte identificação: A.1.1; A.1.2; A.1.3. E as indeformadas: I.1.1; I.1.2; I.1.3; I.1.4; I.1.5 e I.1.6. As amostras amolgadas foram coletadas em sacos plásticos, evitando-se assim, possíveis alterações em sua umidade natural.

4.3 - Objetivos e tipos de ensaios

Todos ensaios realizados, têm como objetivo primordial a determinação dos parâmetros fundamentais os quais em combinação com os dados de campo, formarão um conjunto de elementos necessários às análises e discussões sobre o problema da erosão.

Os ensaios de laboratório foram os seguintes: granulometria, limite de liquidez e de plasticidade, densidade real dos grãos. Cisalhamento direto rápido e análise química. O ensaio granulométrico teve como objetivo, a classificação, pelo método trili-

near, do solo, fornecendo ao mesmo tempo as quantidades de areia, silte e argila na composição do solo.

A determinação dos limites de Atterberg, objetivam a determinação das propriedades de plasticidade, as quais ditam a consistência dos solos. A densidade real além de contribuir na interpretação de outros valores obtidos em campo ou em laboratório, é de fundamental importância na determinação de outros índices físicos, tais como: índice de vazios e grau de saturação da amostra. A evidência de cisalhamento dos grãos do solo pela água no fenômeno da erosão, nos levaram a execução dos ensaios de cisalhamento direto rápido, nas amostras indeformadas. Finalmente as análises químicas, têm por finalidade a complementação de dados nas discussões sobre o fenômeno da erosão.

As análises granulométricas dos solos, foram realizadas obedecendo as normas do Método Brasileiro (MB-32), compreendendo análise por peneiramento e por sedimentação. Os resultados são apresentados mais adiante. A determinação do limite de liquidez bem como do limite de plasticidade foram executados de acordo com o método Brasileiro, respectivamente MB-30 e MB-31. A densidade real dos grãos foi determinada pelo Método Brasileiro, MB-28, cujos resultados são apresentados no item 4.4. Para cada amostra de solo foram executados dois ensaios de densidade real, sendo considerado a média dos valores obtidos.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em duas séries por talude, sendo cada série com três amostras. Na primeira série o solo foi cisalhado na unidade natural e a outra série com o solo em condições de saturação correspondente a 24h de submersão em água. As dimensões das caixas, nas quais as amostras eram confinadas, são 6 cm. X 6 cm. X 2,52 cm, tendo assim uma área de quadrado de 36cm². Devido as grandes dificuldades que aparecem no ato de confecção das amostras, nem sempre foi possível obter uma área com exatamente 36cm² e estas áreas efetivas foram calculadas tomando-se com um paquímetro três medidas em cada dimensão e depois com a média destas, a obtenção da área real.

Para que não houvesse falhas nos resultados, os vazios que normalmente apareciam entre as amostras e a caixa de máquinas, foram preenchidos com material fino do mesmo solo. Para determinar

near, do solo, fornecendo ao mesmo tempo as quantidades de areia, silte e argila na composição do solo.

A determinação dos limites de Atterberg, objetivam a determinação das propriedades de plasticidade, as quais ditam a consistência dos solos. A densidade real além de contribuir na interpretação de outros valores obtidos em campo ou em laboratório, é de fundamental importância na determinação de outros índices físicos, tais como: índice de vazios e grau de saturação da amostra. A evidência de cisalhamento dos grãos do solo pela água no fenômeno da erosão, nos levaram a execução dos ensaios de cisalhamento direto rápido, nas amostras indeformadas. Finalmente as análises químicas, têm por finalidade a complementação de dados nas discussões sobre o fenômeno da erosão.

As análises granulométricas dos solos, foram realizadas obedecendo as normas do Método Brasileiro (MB-32), compreendendo análise por peneiramento e por sedimentação. Os resultados são apresentados mais adiante. A determinação do limite de liquidez bem como do limite de plasticidade foram executados de acordo com o método Brasileiro, respectivamente MB-30 e MB-31. A densidade real dos grãos foi determinada pelo Método Brasileiro, MB-28, cujos resultados são apresentados no item.4.4. Para cada amostra de solo foram executados dois ensaios de densidade real, sendo considerado a média dos dois valores obtidos.

O ensaio de cisalhamento direto foi realizado em duas séries por talude, sendo cada série com três amostras. Na primeira série o solo foi cisalhado na umidade natural e a outra série com o solo em condições de saturação correspondente a 24h de submersão em água. As dimensões das caixas, nas quais as amostras eram confinadas, são 6 cm. X 6 cm. X 2,52 cm, tendo assim uma área de quadrado de 36cm^2 . Devido as grandes dificuldades que aparecem no ato de confecção das amostras, nem sempre foi possível obter uma área com exatamente 36cm^2 e estas áreas efetivas foram calculadas tomando-se com um paquímetro três medidas em cada dimensão e depois com a média destas, a obtenção da área real.

Para que não houvesse falhas nos resultados, os vazios que normalmente apareciam entre as amostras e a caixa de máquinas, foram preenchidos com material fino do mesmo solo. Para determinar

os três pontos necessários ao traçado da curva tensão de cisalhamento versus tensão normal, as forças normais foram de 17,73; 35,92 e 53,64 Kgf. O cálculo da tensão normal aplicada em cada amostra, foi em função de sua área efetiva. A velocidade do ensaio foi de 0,0118 cm/min.

4.4 - Apresentação dos resultados experimentais

O resumo dos resultados dos ensaios de granulometria limites de Atterberg e densidade real, é apresentado no quadro 4.1. Neste quadro, a primeira coluna 1, corresponde aos taludes e a segunda as amostras de cada talude. Da terceira coluna à sétima, corresponde a classificação granulométrica de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, (A.B.N.T); onde se tem percentagem de argila, silte, areia fina, média e grossa de cada solo. A classificação de solo que é mostrado na última coluna, foi classificado pelo método trilinear adotado pelo M.S.Bureau of Soils. O termo "lema" que corresponde a "loam", em inglês, significa uma mistura em proporções variadas de partículas de areia, silte e argila, que popularmente é conhecido por barro. As colunas 8,9,10, dão o limite líquido, plástico e o índice de plasticidade, respectivamente. Finalmente a décima primeira coluna, mostra a densidade real dos solos. As curvas granulométricas, correspondente às amostras indicada neste quadro, estão representados nas Fig. 4.1 à 4.6.

Como já foi dito, os ensaios de cisalhamento direto rápido, foram realizados em duas séries, para cada talude, sendo uma na umidade natural e a outra em condições de saturação. Para cada série um conjunto de três amostras, submetidos às tensões normais de aproximadamente 0,50 e 1,00 e 1,50 Kg/cm², cujos valores exatos, serão oportunamente referidos.

Durante o ensaio, foram determinadas as unidades das amostras (após cisalhadas) e o peso específico aparente úmido. As amostras foram saturadas na câmara de vácuo, durante 3 h, o que corresponde a uma submersão natural de 24 h. O grau de saturação foi determinado em função do peso específico das partículas do solo, peso específico do solo seco e de sua umidade.

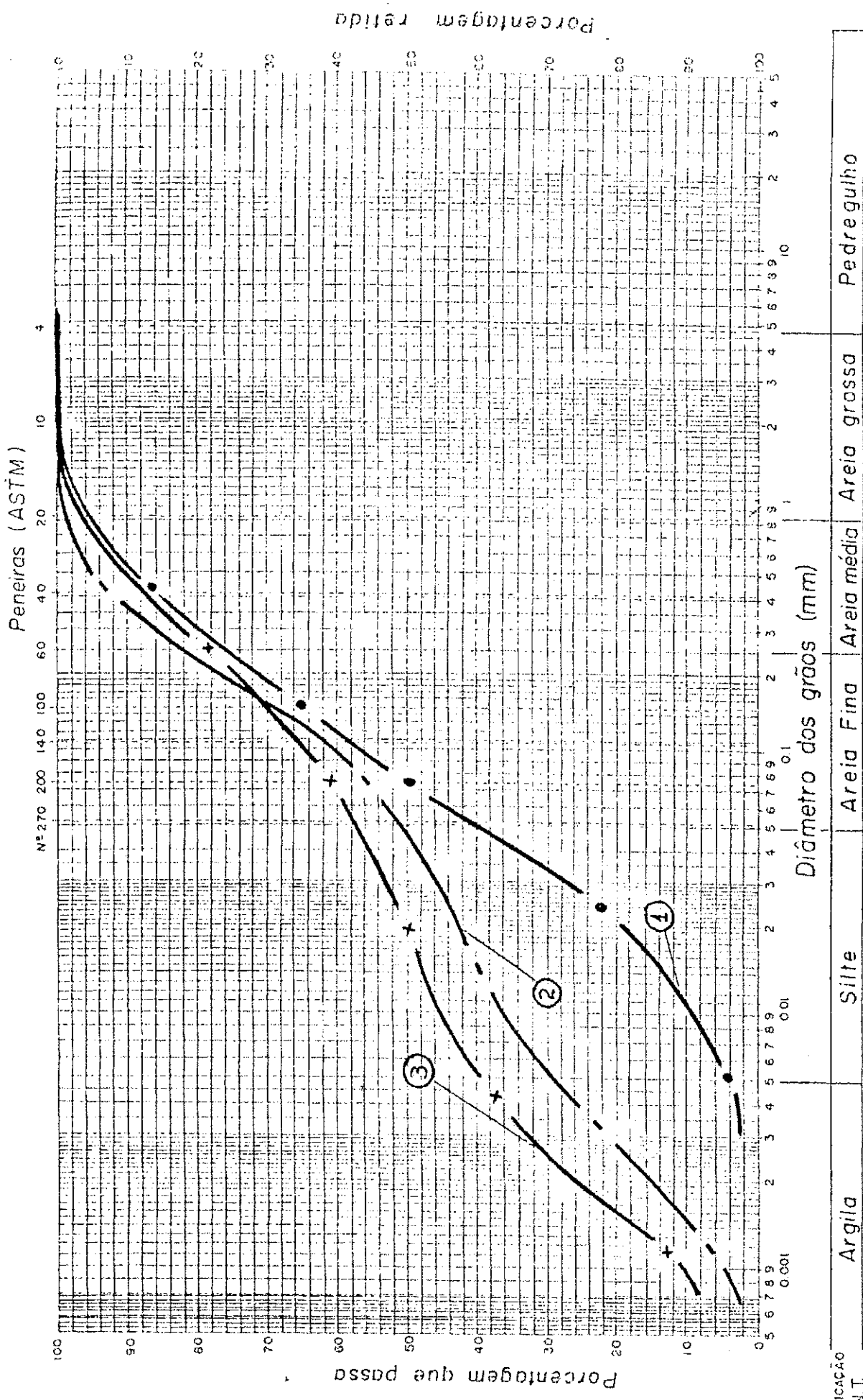
Nos gráficos, correspondentes às Fig. 4.7 à 4.24.b, estão os resultados dos ensaios de cisalhamento das amostras, dos se

Tabela	Amostragem	Granulometria (%)					Limite de Atterberg			Dens. real (g/cm ²)	Tipo de Solo
		argila	silte	areia fina	areia média	areia grossa	L.L	L.P.	I.P		
1	1	4.0	36.0	36.0	21.5	21.5	-	-	-	2.67	lemo arenoso lemo argiloso argila
	2	29.0	22.0	31.0	17.0	1.0	38.3	47.5	9.2	2.66	
	3	39.5	18.0	20.5	19.0	3.0	29.4	39.0	9.6	2.65	
2	1	37.0	16.5	15.5	19.5	11.5	47.0	58.1	11.1	2.79	argila lemo arenoso lemo arenoso
	2	13.5	27.5	39.5	16.5	3.0	-	-	-	2.71	
	3	16.0	29.0	38.5	14.5	2.0	-	-	-	2.71	
3	1	50.0	19.5	13.5	11.0	6.0	39.4	57.0	17.6	2.66	argila lemo arenoso argila lemo arenoso
	2	5.0	21.5	30.5	19.5	20.5	-	-	-	2.58	
	3	21.5	1.0	19.0	21.5	36.0	38.4	40.3	1.9	2.72	
4	1	12.0	15.5	38.0	21.5	13.0	-	-	-	2.69	lemo arenoso argila pouco arenosa areia argilosa
	2	34.5	10.5	32.0	20.0	12.0	32.0	45.1	13.1	2.69	
	3	33.0	3.0	37.5	22.5	4.0	41.0	53.6	12.6	2.71	
5	1	23.0	36.0	20.5	10.5	10.0	50.3	56.5	6.2	2.57	lemo argiloso argila argila
	2	37.0	9.0	12.5	16.5	24.0	32.3	45.7	13.4	2.64	
	3	36.5	12.0	17.0	27.5	16.0	48.0	66.7	18.7	2.43	
6	1	13.0	9.0	23.0	31.5	23.5	27.0	30.1	3.1	2.67	lemo arenoso lemo arenoso argila
	2	6.0	23.5	31.5	26.0	13.0	-	-	-	2.62	
	3	37.5	13.5	24.5	19.5	5.0	32.0	44.3	12.3	2.64	

Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de granulometria, Limites de Atterberg e densidade real.

Figura 4.1 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 1.

GRANULOMETRIA



CLASSIFICAÇÃO A.B.N.T.

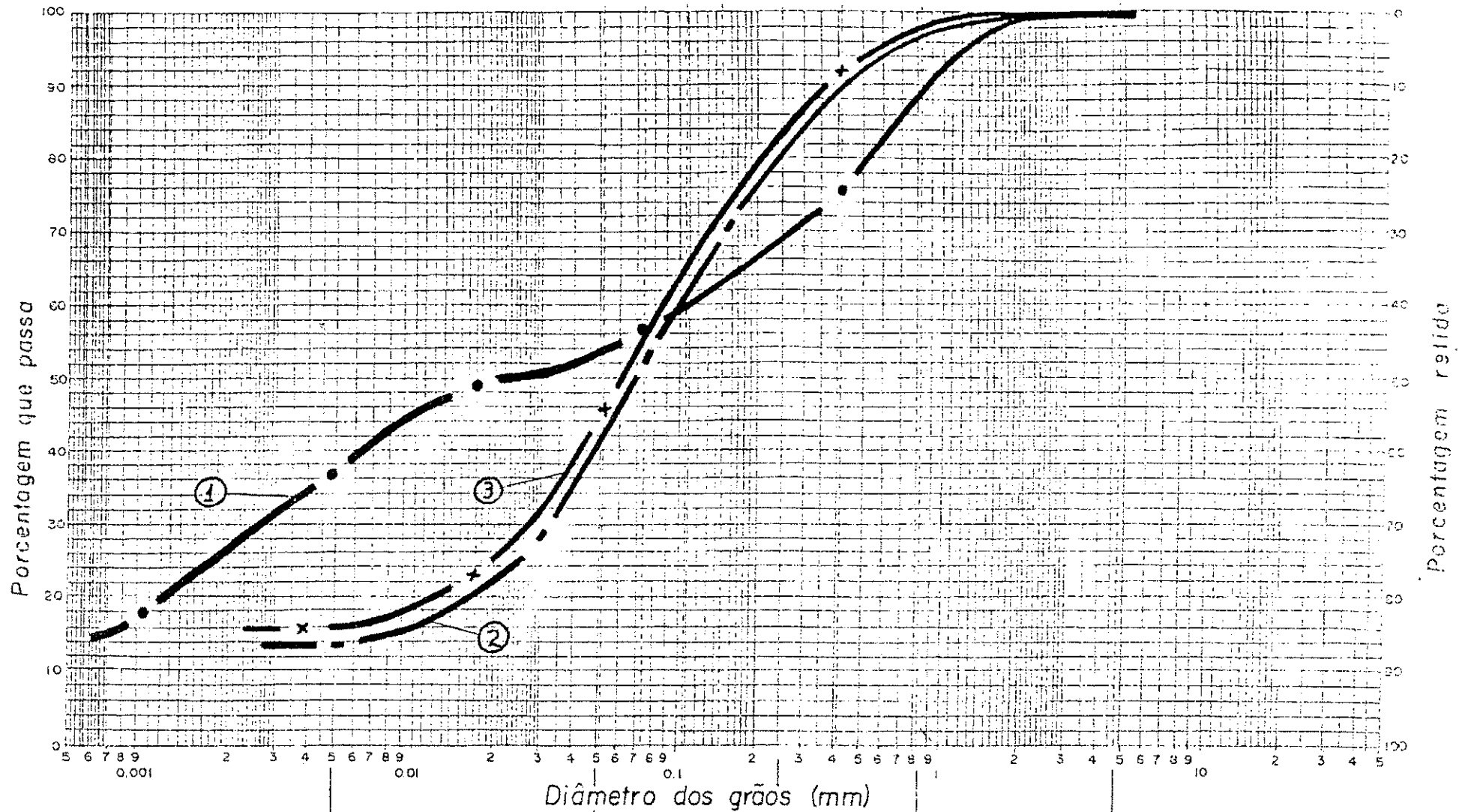
UFPb - C.C.T. - DEC

Figura 4.2 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 2.

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



CLASSIFICAÇÃO
A.B.N.T.

Argila

Silte

Areia Fina

Areia média

Areia grossa

Pedregulho

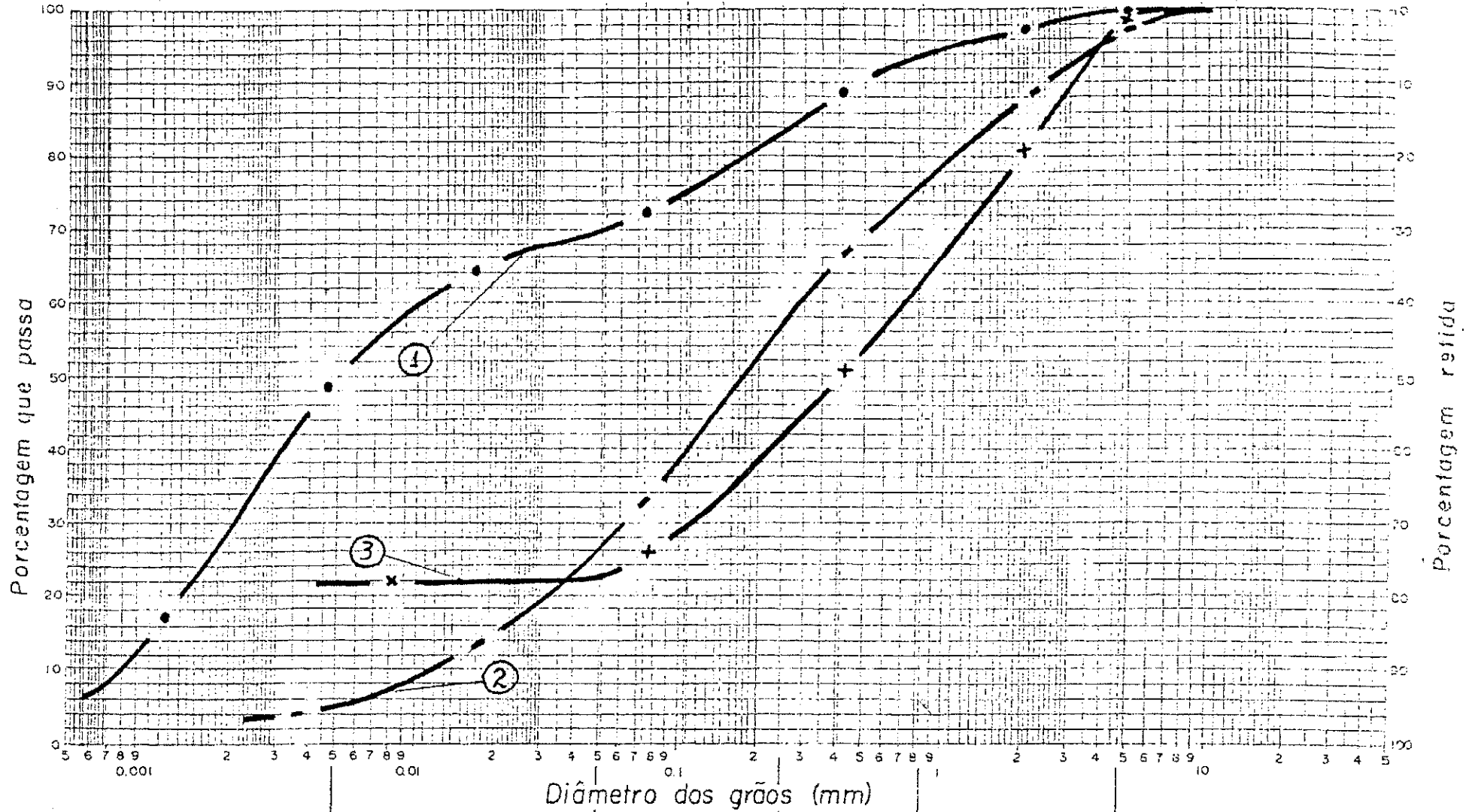
UFPb - C.C.T. - DEC

Figura 4.3 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 3.

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



CLASSIFICAÇÃO
A.B.N.T.

Argila

Silte

Areia Fina

Areia média

Areia grossa

Pedregulho

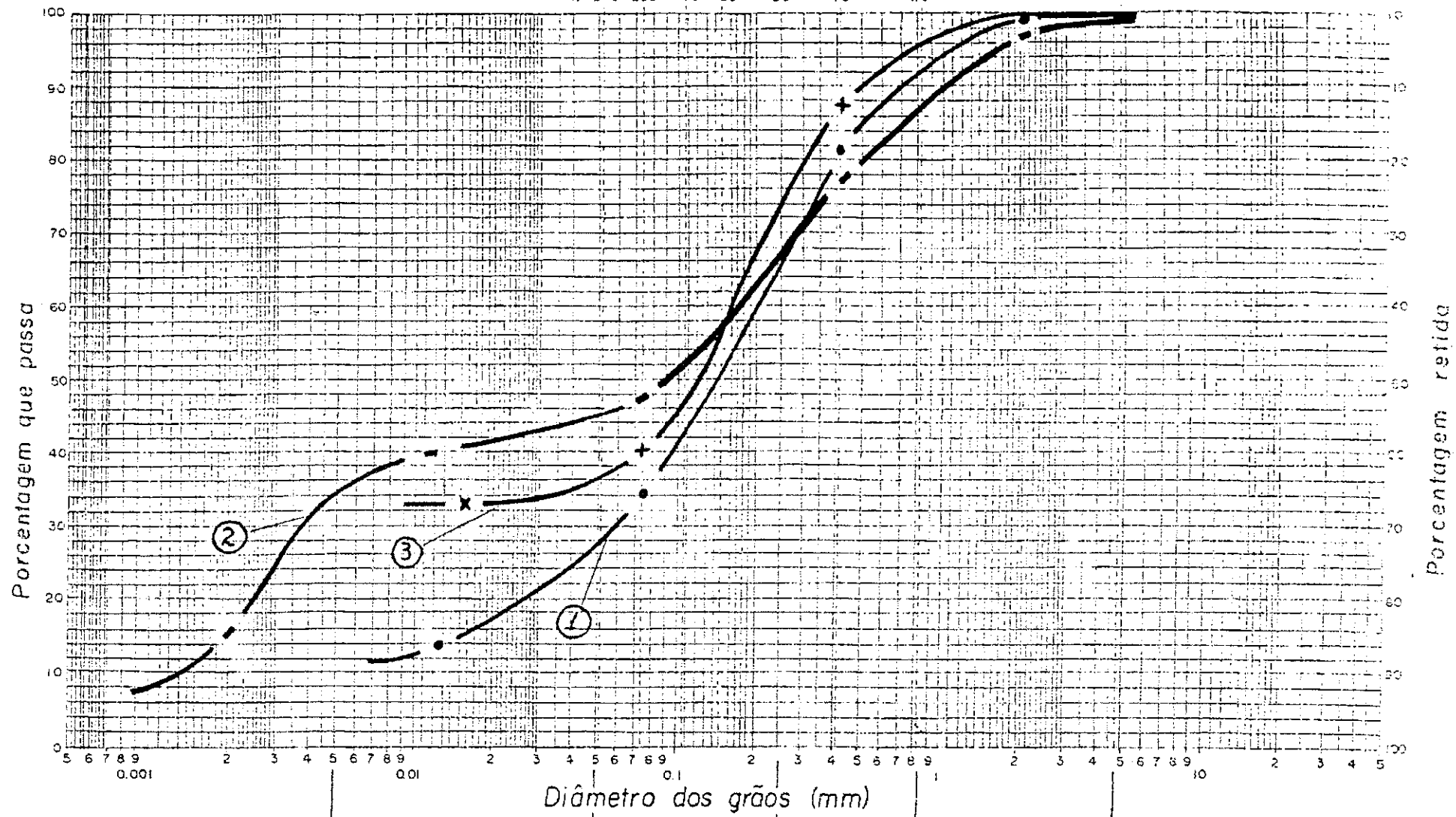
UFPb - C.C.T. - DEC

Figura 4.4 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 4.

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



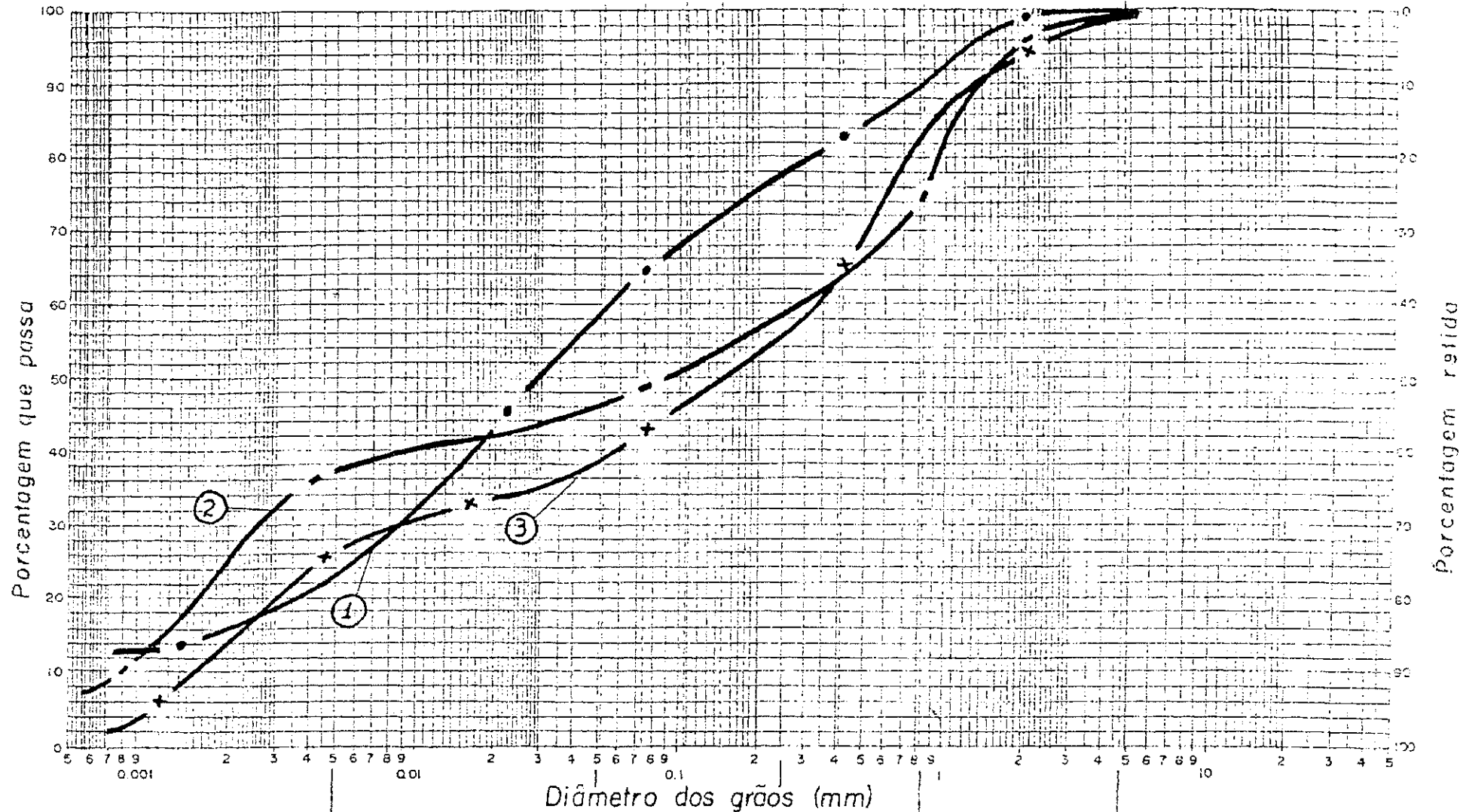
CLASSIFICAÇÃO A.B.N.T.	Argila	Silte	Areia Fina	Areia média	Areia grossa	Pedreguiho
------------------------	--------	-------	------------	-------------	--------------	------------

Figura 4.5 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 5.

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



CLASSIFICAÇÃO A.B.N.T.

Argila

Silte

Areia Fina

Areia média

Areia grossa

Pedregulho

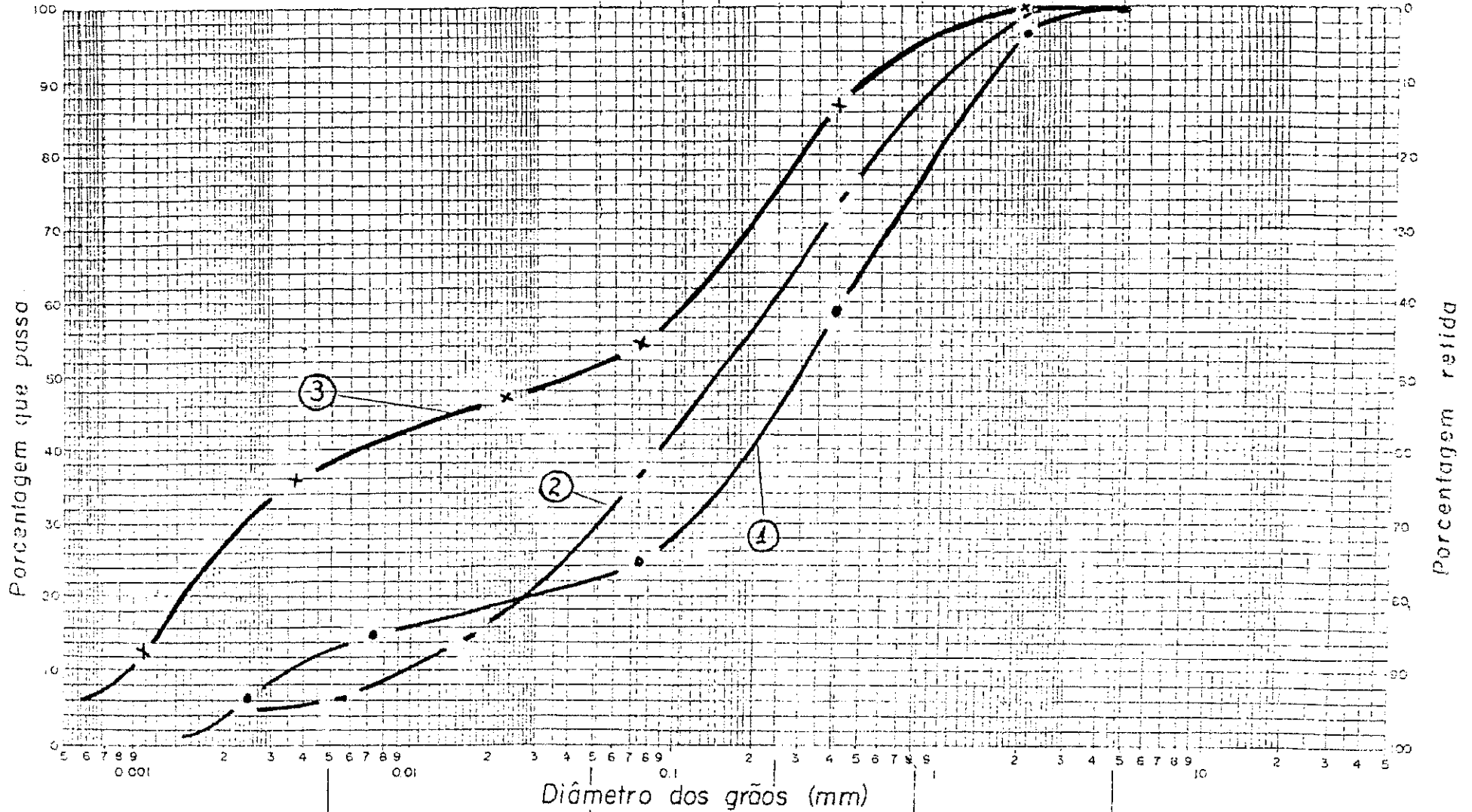
UFPb - C.C.T. - DEC

Figura 4.6 - Curvas de granulometria das três amostras coletadas no talude 6.

GRANULOMETRIA

Peneiras (ASTM)

Nº 270 200 140 100 60 40 20 10 4



CLASSIFICAÇÃO
SOLICITAÇÃO

Argila

Silte

Areia Fina

Areia média

Areia grossa

Pedregulho

is taludes pesquisados. Para cada amostra cisalhada foram determinada as seguintes relações: Deformação horizontal versus deformação vertical; deformação horizontal versus tensão de cisalhamento e por fim tensão normal versus tensão máxima de cisalhamento.

As Fig. 4.7 e 4.9.a, mostram os resultados obtidos com as amostras do talude 1 na umidade natural. As tensões normais aplicadas, umidade do solo, peso específico aparente úmido bem como os valores obtidos de coesão e ângulo de atrito interno, são os indicados nos referidos gráficos. Para o mesmo solo, nas condições de saturação, os resultados obtidos, são os apresentados nas Fig. 4.8 e 4.9.b. O grau de saturação foi de 84,1%. Analogamente os resultados para os demais taludes são os seguintes:

Talude 2, Fig. 4.10 e 4.12.a, para o solo na umidade natural e as Fig. 4.11 e 4.12.b, para o solo com um grau de saturação de 80,5%.

Talude 3, Fig. 4.13 e 4.15.a, para o solo na umidade natural e as Fig. 4.14 e 4.15.b, para o solo saturado com um grau de saturação de 69,7%.

Talude 4, Fig. 4.16 e 4.18.a, com o solo na umidade natural e as Fig. 4.17 e 4.18.b, solo saturado com grau de saturação 83,5%.

Talude 5, Fig. 4.19 e 4.21.a, para o solo na umidade natural, e as Fig. 4.20 e 4.21.b, solo com um grau de saturação de 83,6%.

Talude 6, Fig. 4.22 e 4.24.a, para o solo na umidade natural e as Fig. 4.23 e 4.24.b, para o solo com um grau de saturação de 95,64%.

Todos estes resultados serão analisados e discutidos no capítulo seguinte.

Os resultados das análises química, são os indicados no quadro 4.2. A coluna 1, corresponde aos taludes.

Tal.	Fósforo (p.p.m)	Potássio (p.p.m)	Ca+Mg (me %)	Alumínio (me %)	Fe (me %)	pH
1	1.2	26	1.2	0.8	1.6	4.9
2	1.5	28	1.0	1.0	1.7	4.7
3	1.5	97	1.9	0.1	0.8	6.6
4	30.0	126	3.1	0.4	1.0	5.7
5	0.1	33	1.2	1.9	1.4	4.8
6	0.7	30	0.7	1.2	2.5	4.2

Quadro 4.2 - Resultados das análises químicas, dos solos dos taludes.

Figura 4.7 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 1, na umidade na tural.

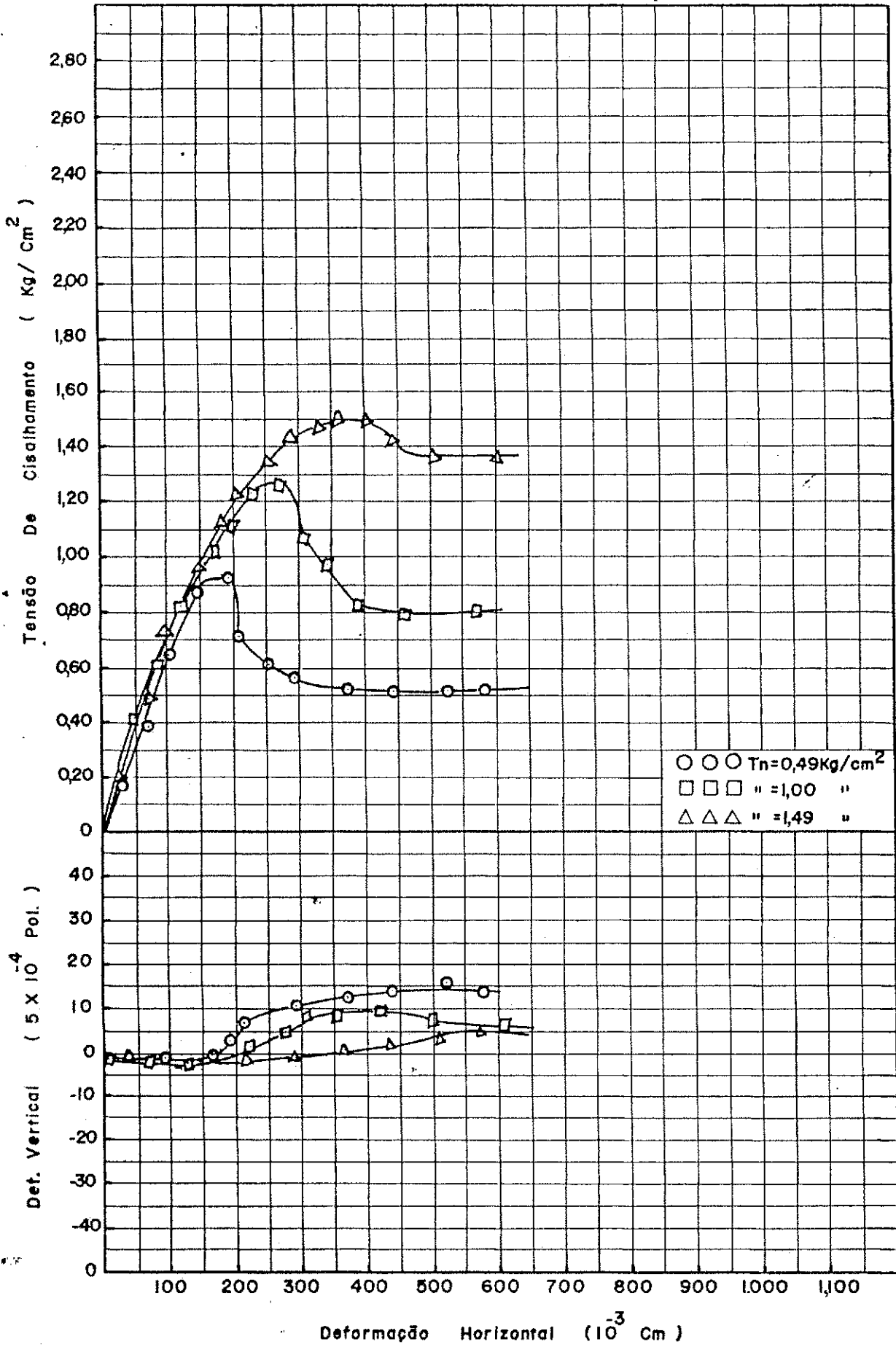


Figura 4.8 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 1, saturado.

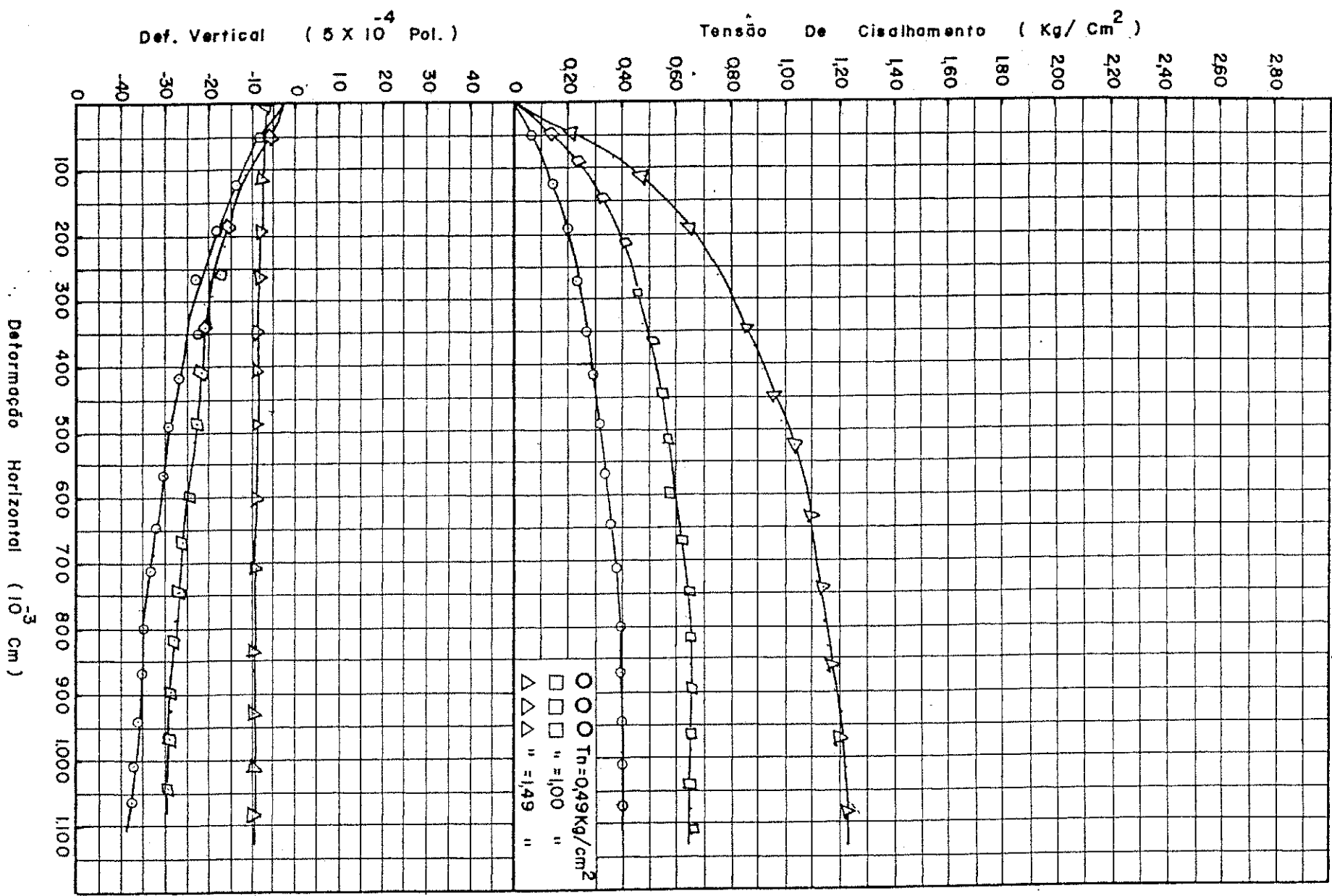


Figura 4.9.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 1, na umidade natural.

Figura 4.9.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 1, com um grau de saturação de 84,1%.

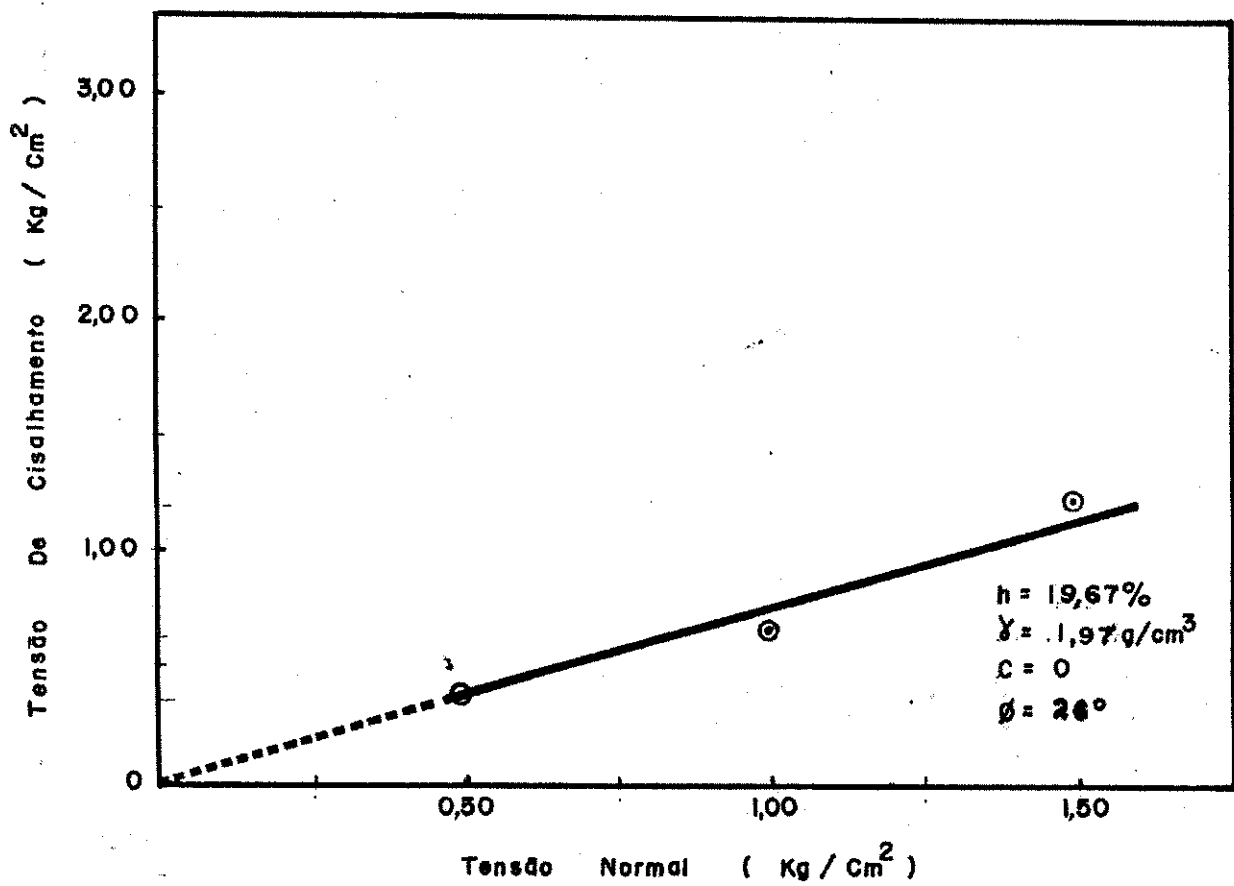
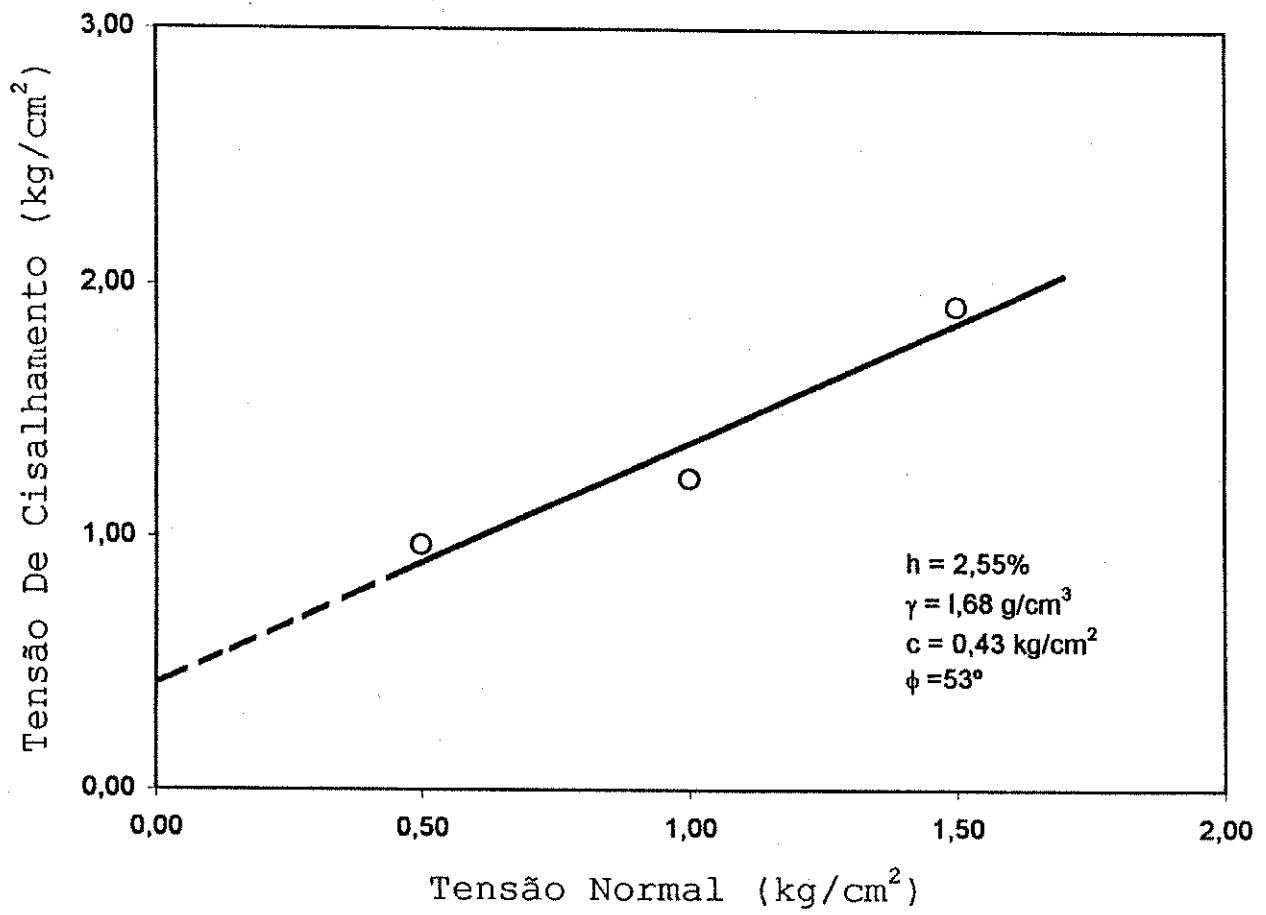


Figura 4.10 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 2, na umidade na tural.

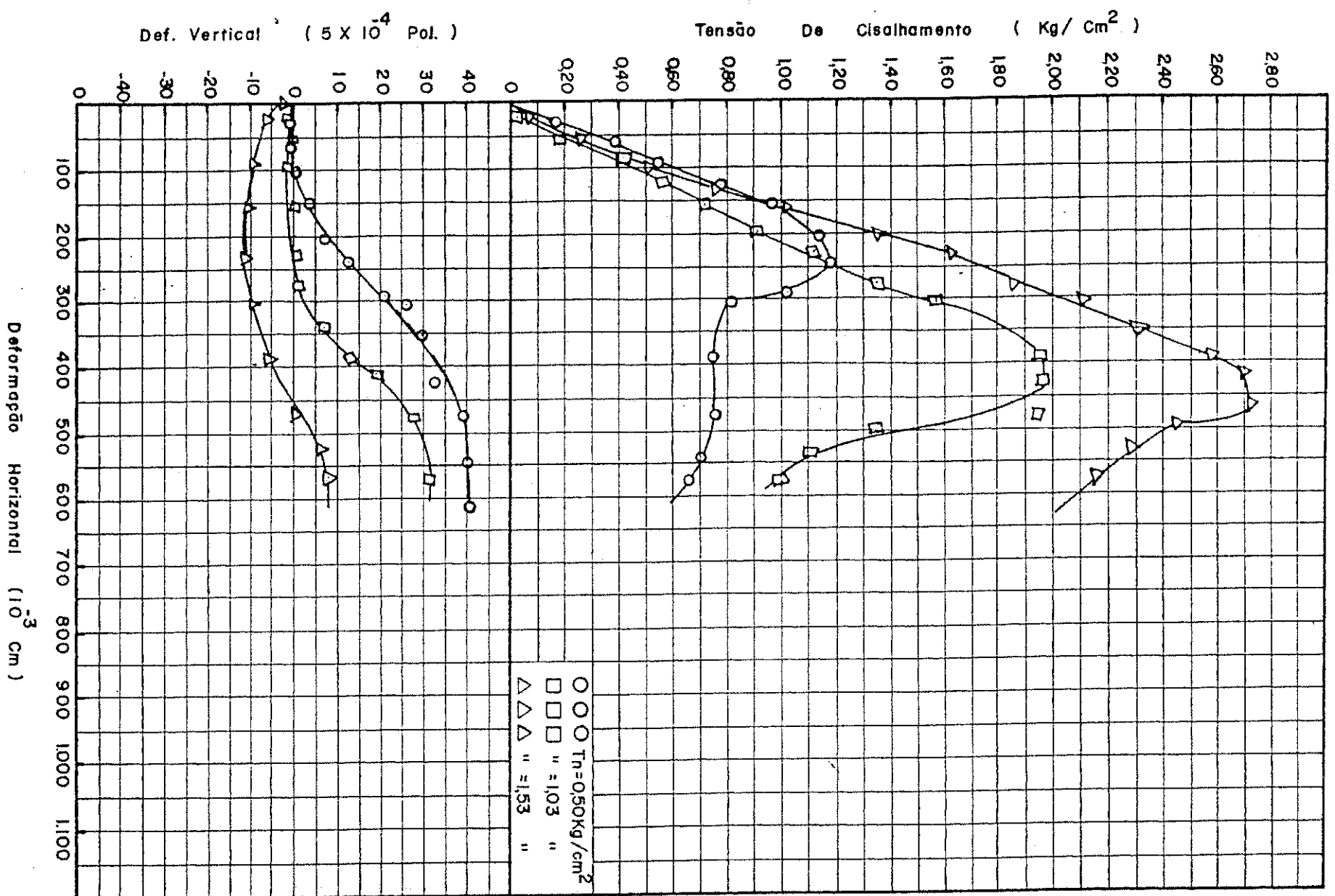


Figura 4.11 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 2, saturado.

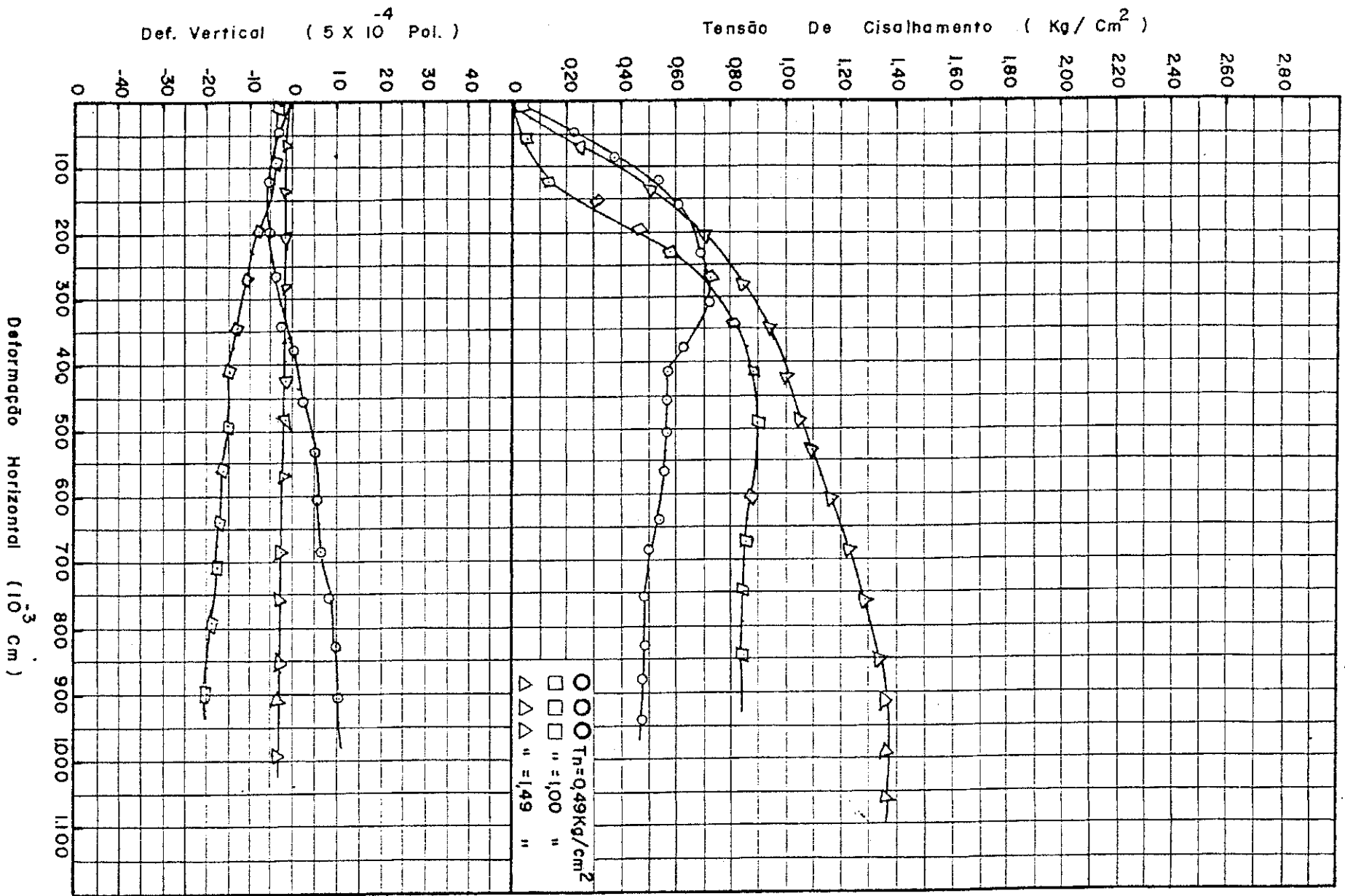


Figura 4.12.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 2, na umidade natural.

Figura 4.12.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 2, com um grau de saturação de 80,5%.

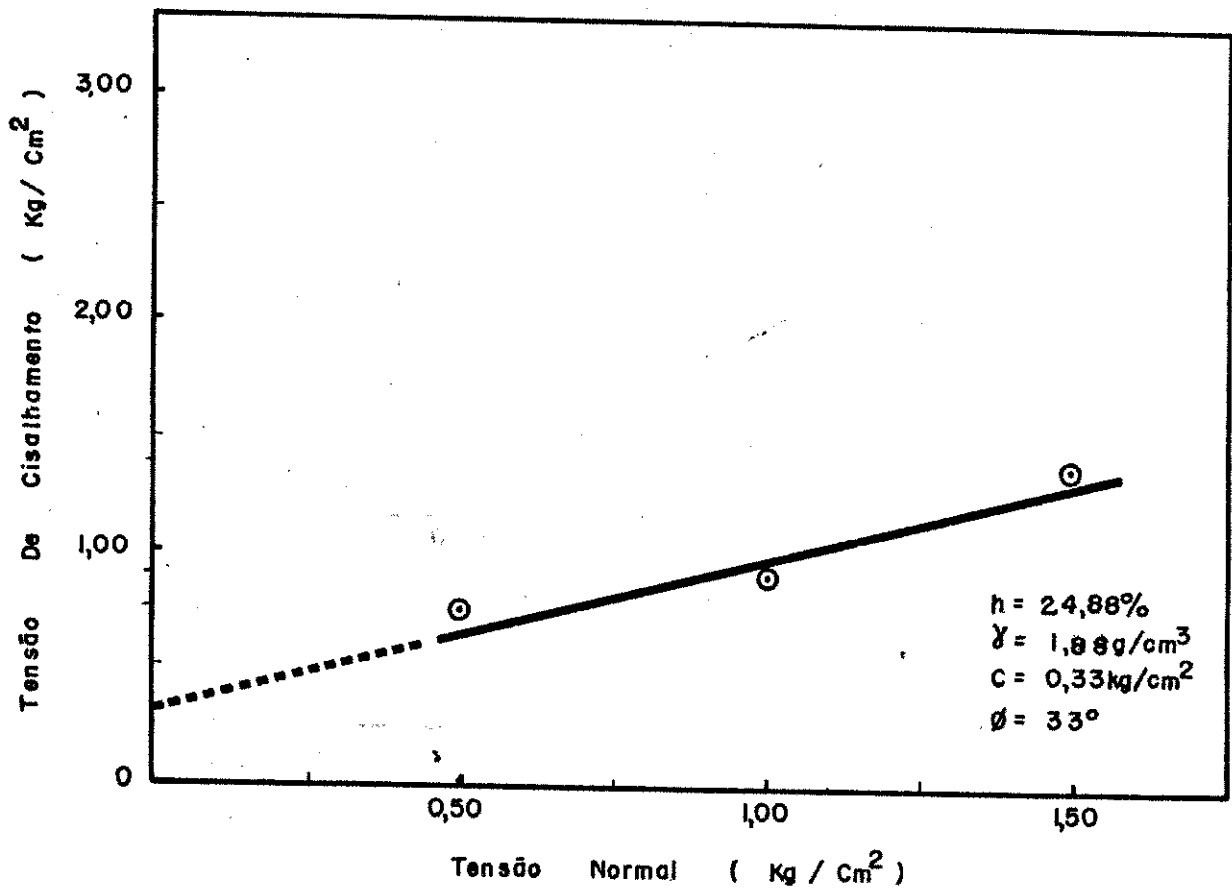
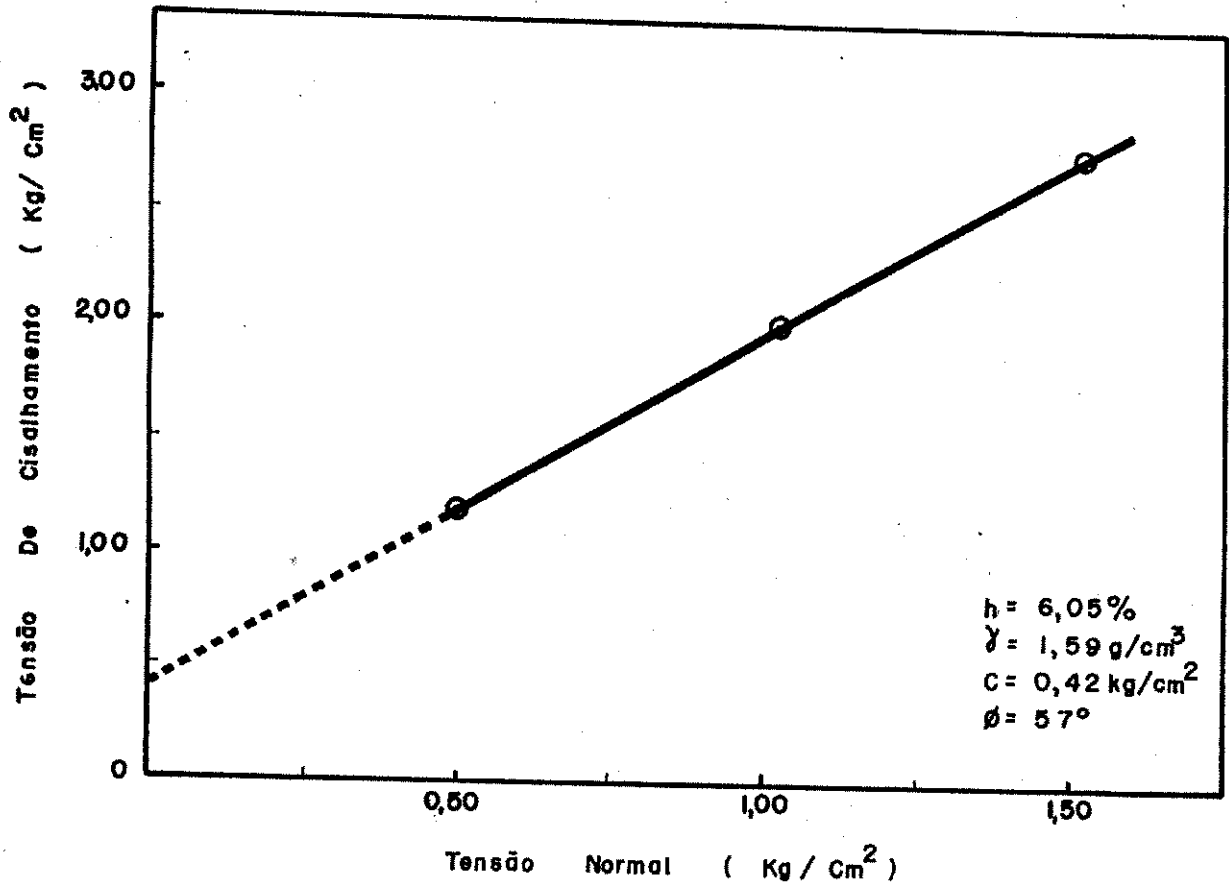


Figura 4.13 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 3, na umidade natural.

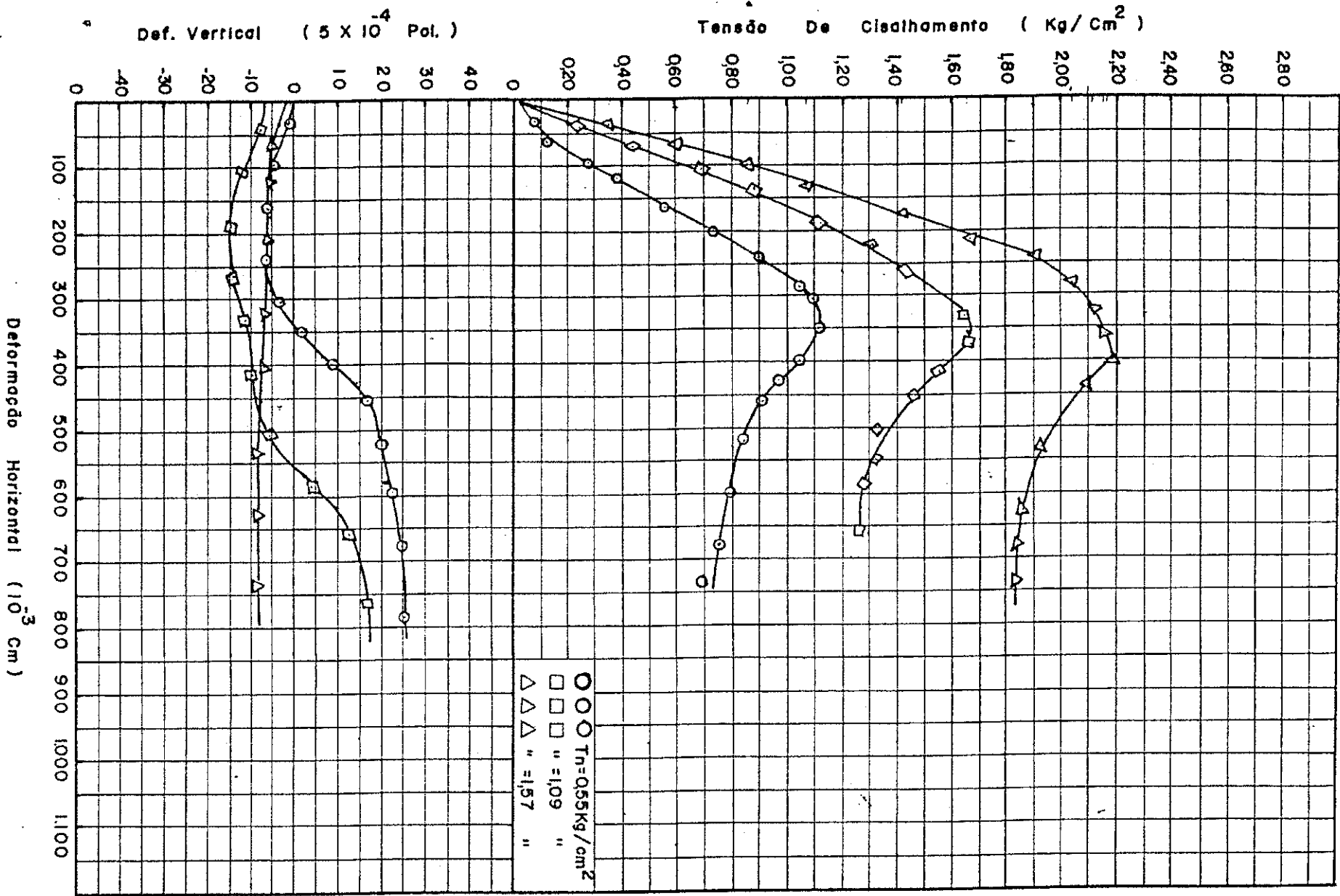


Figura 4.14 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 3, saturado.

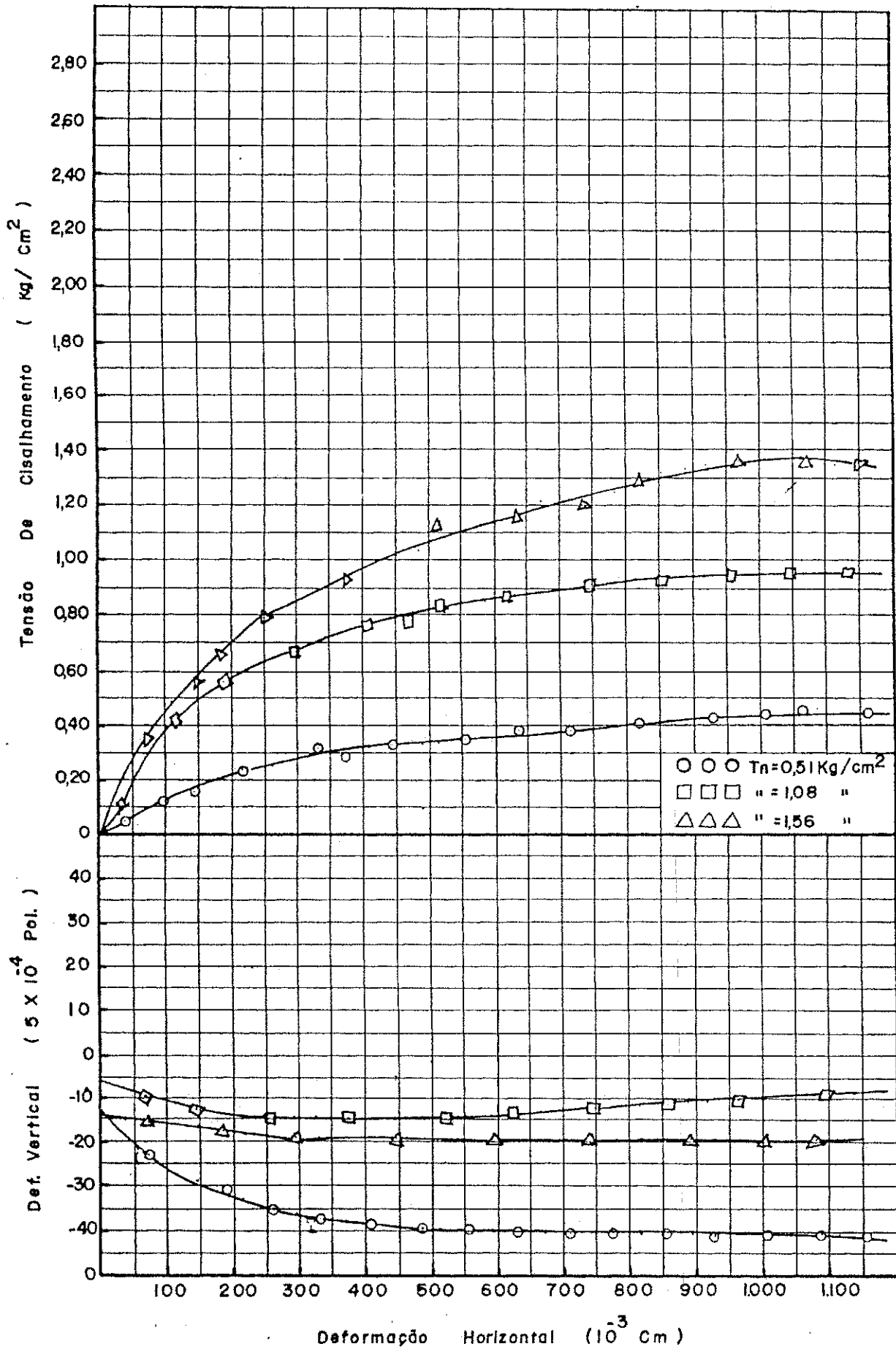


Figura 4.15.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 3, na umidade natural.

Figura 4.15.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 3, com um grau de saturação de 69,7%.

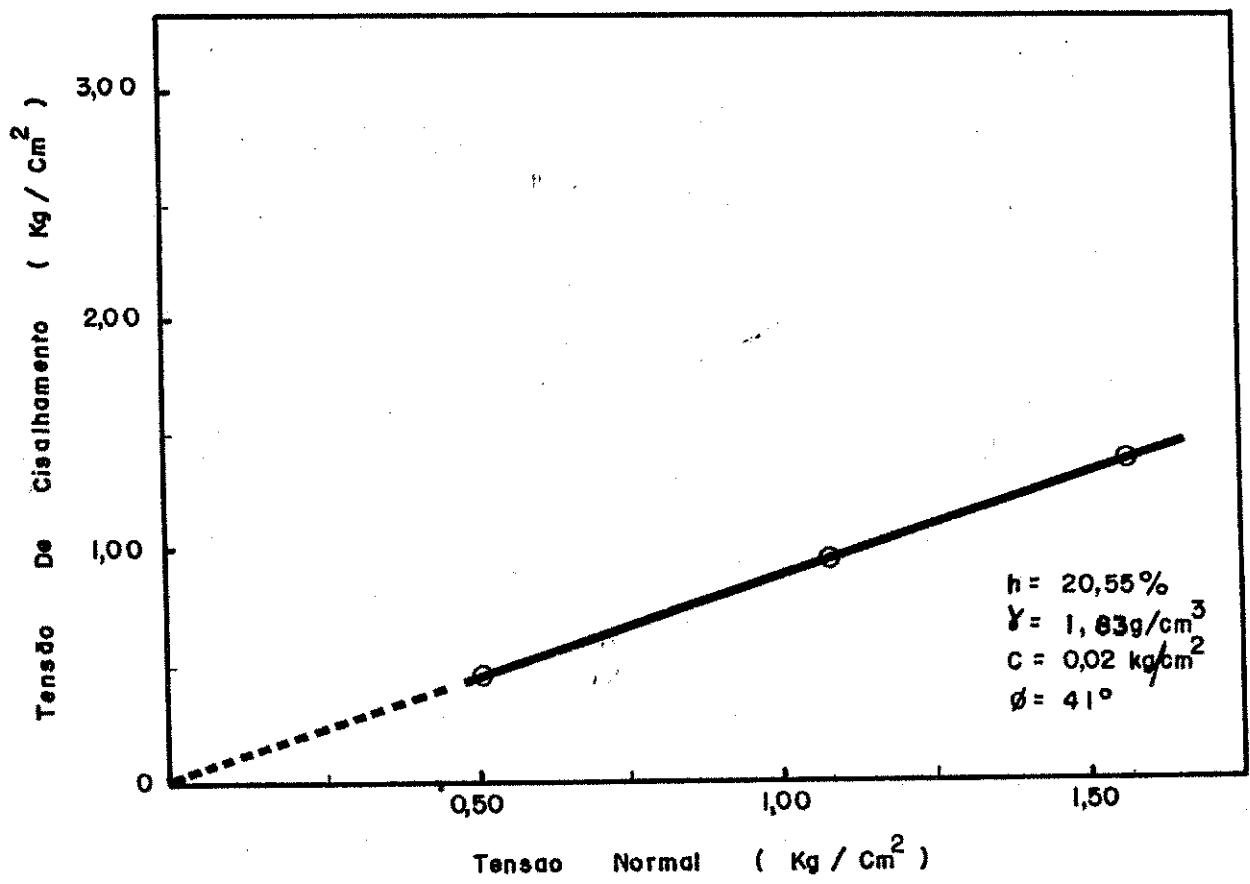
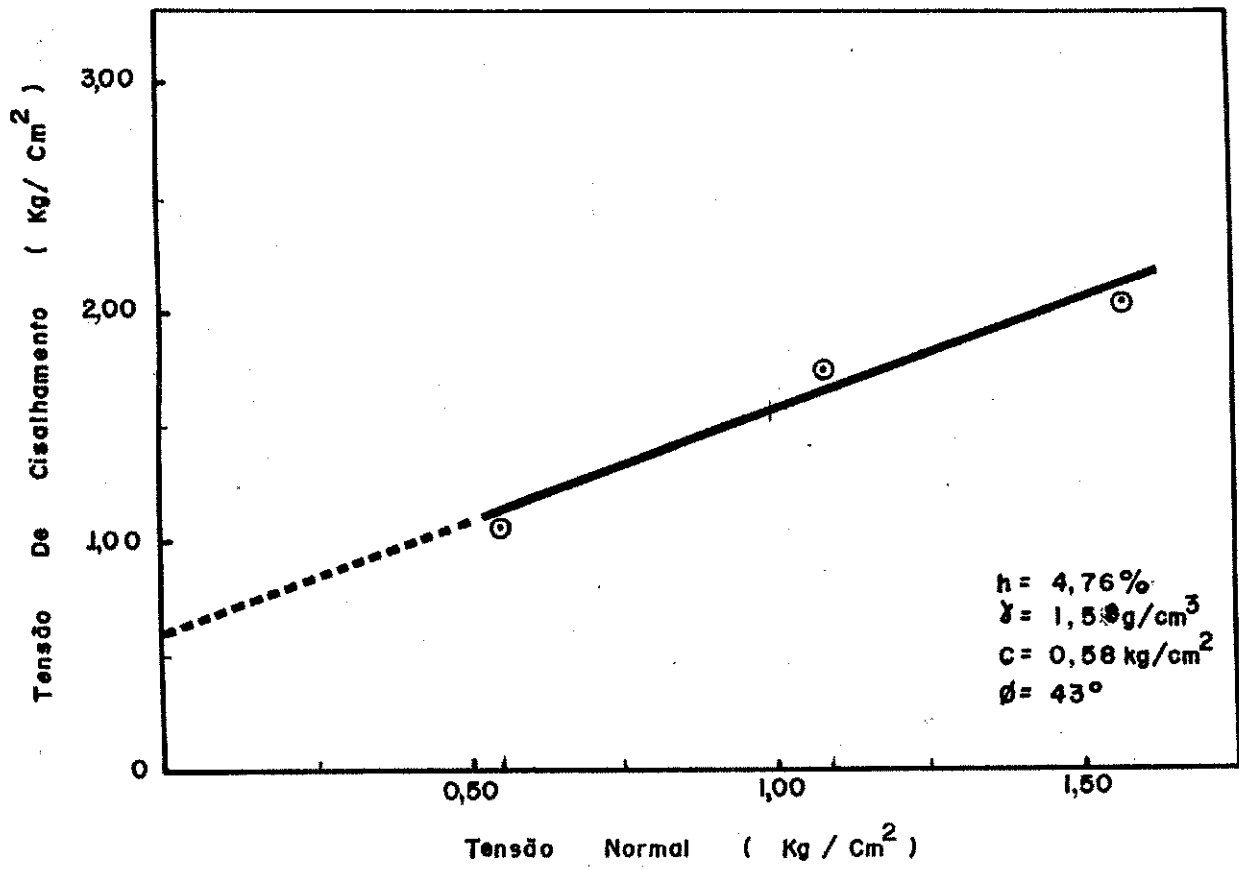
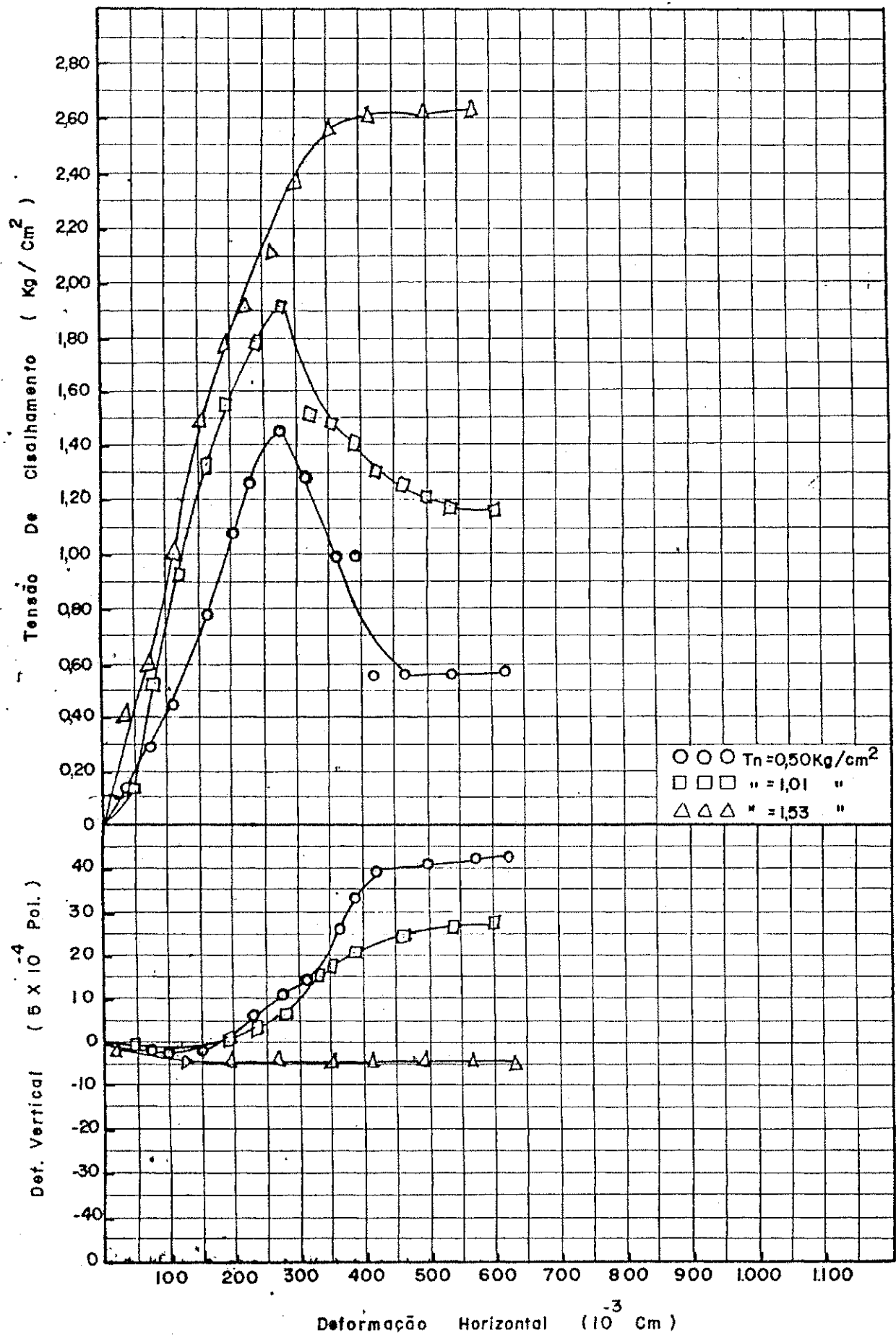


Figura 4.16 - Gráficos que relacionam deformação horizontal versus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 4, na umidade natural.



4.17 - Gráficos que relacionam deformação horizontal versus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 4, saturado.

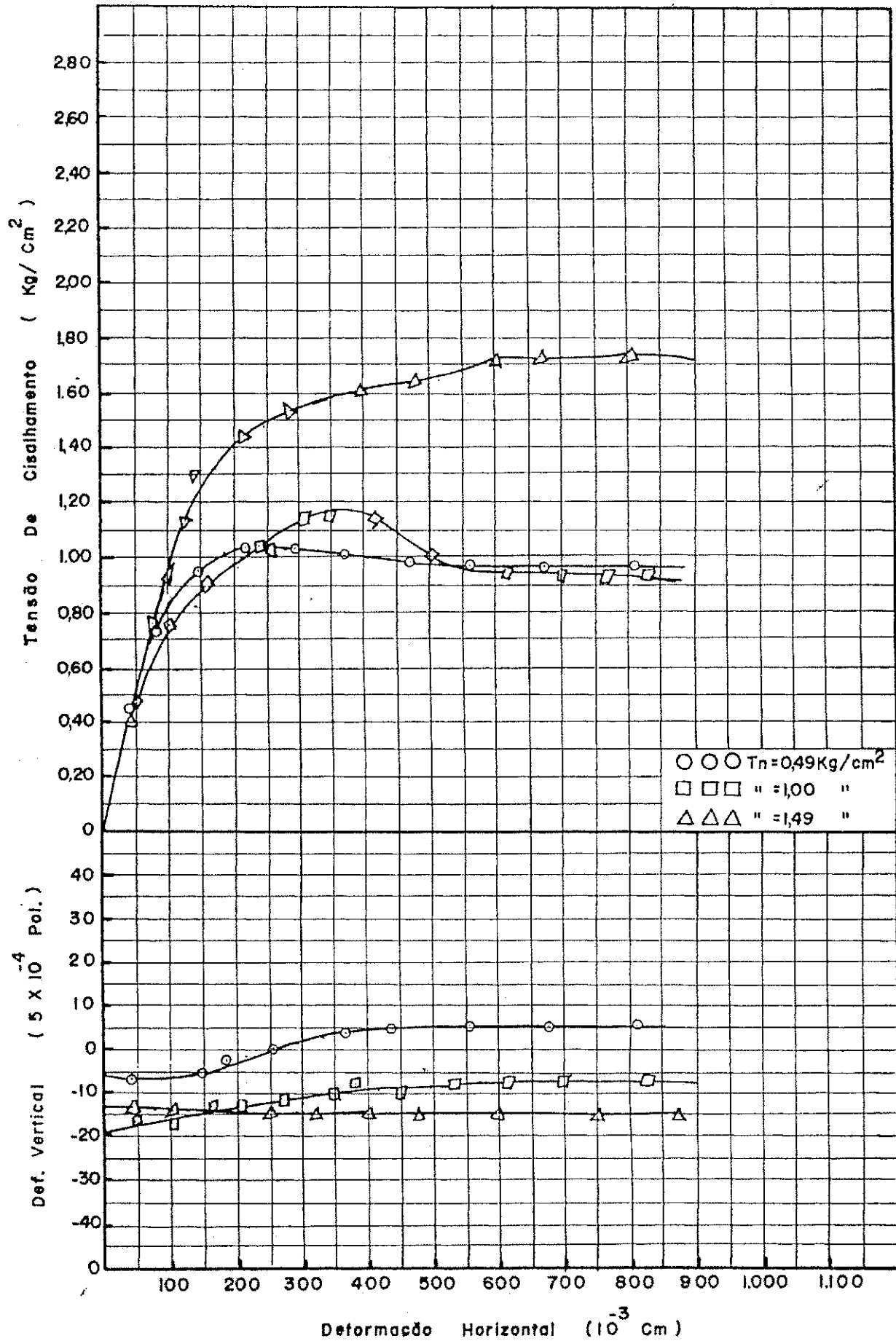


Figura 4.18.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 4, na umidade natural.

Figura 4.18.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talu de 4, com um grau de saturação de 83,5%.

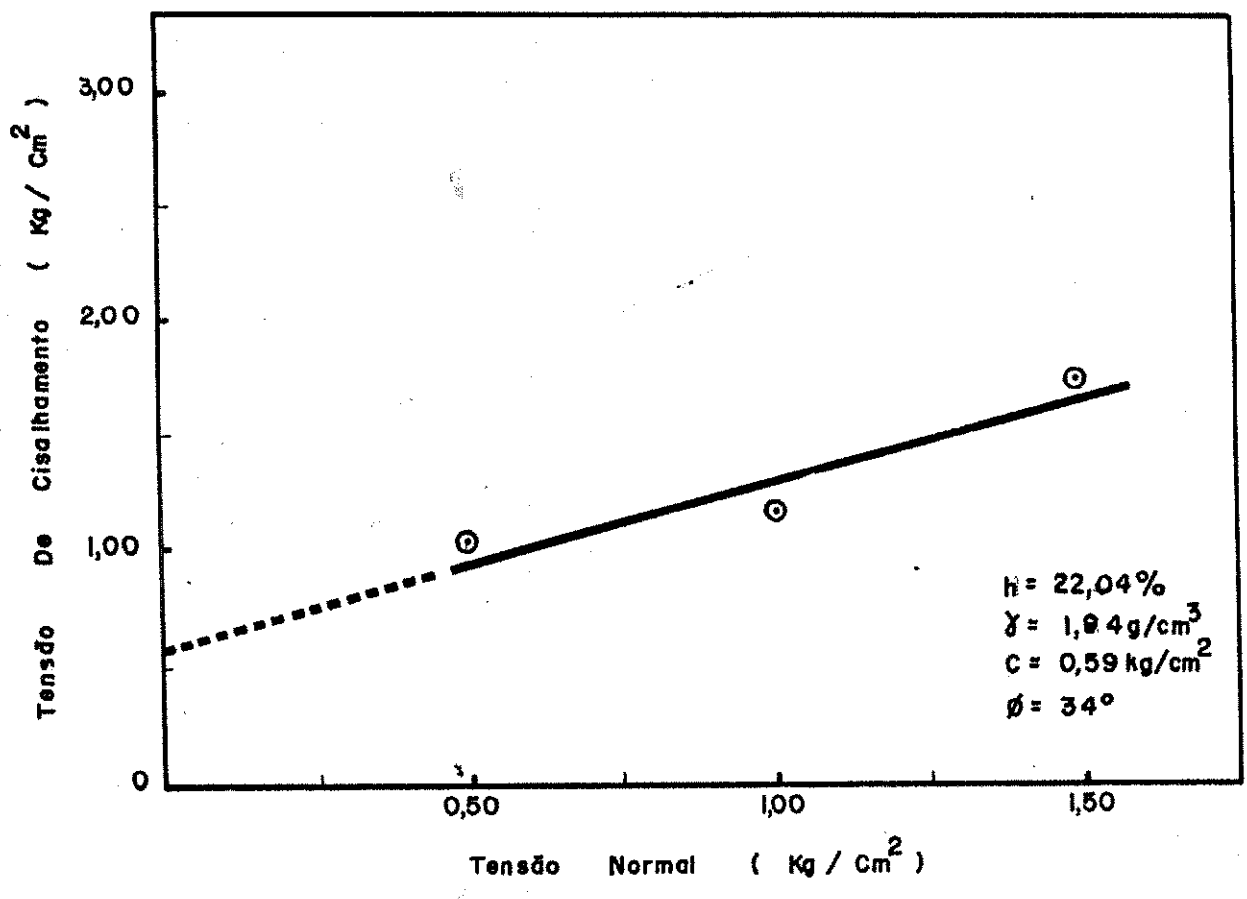
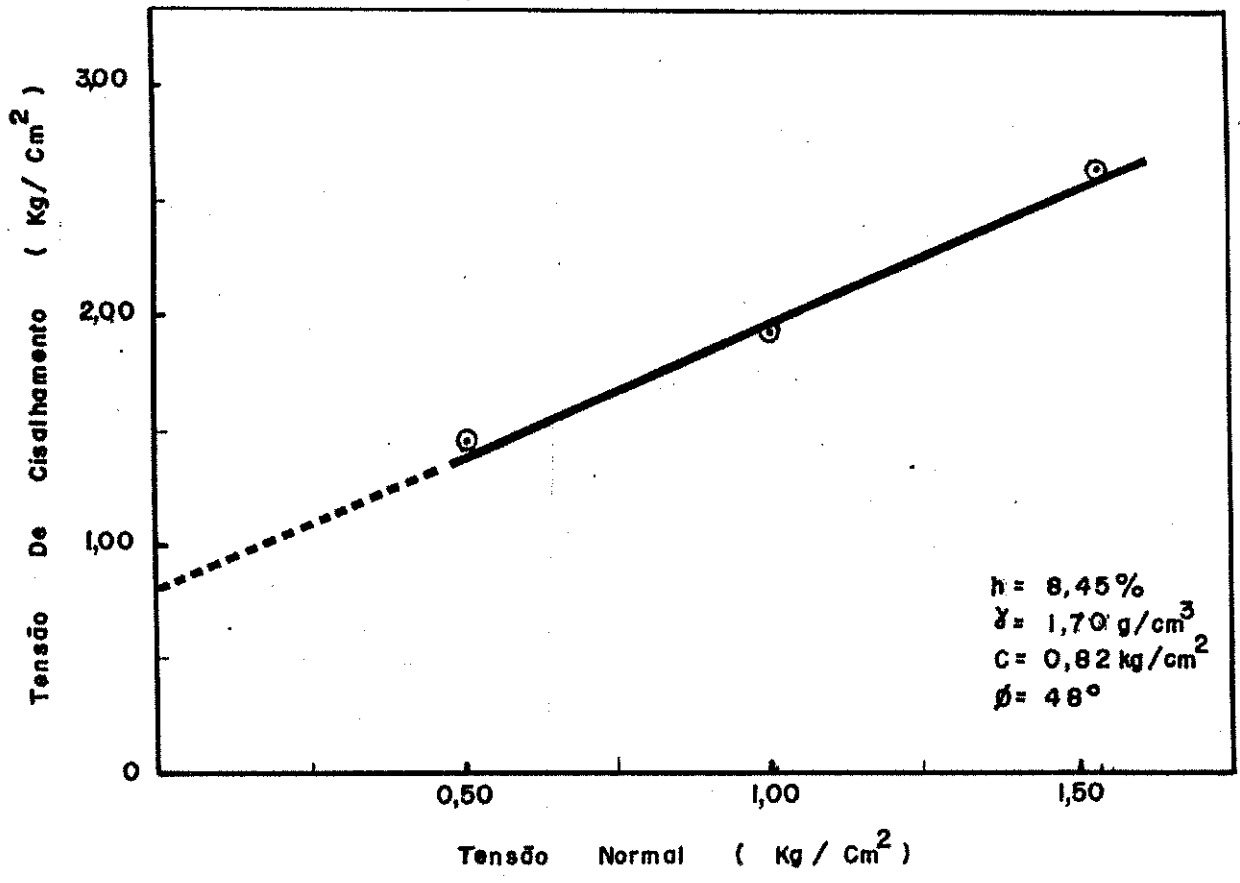


Figura 4.19 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 5, na umidade natural.

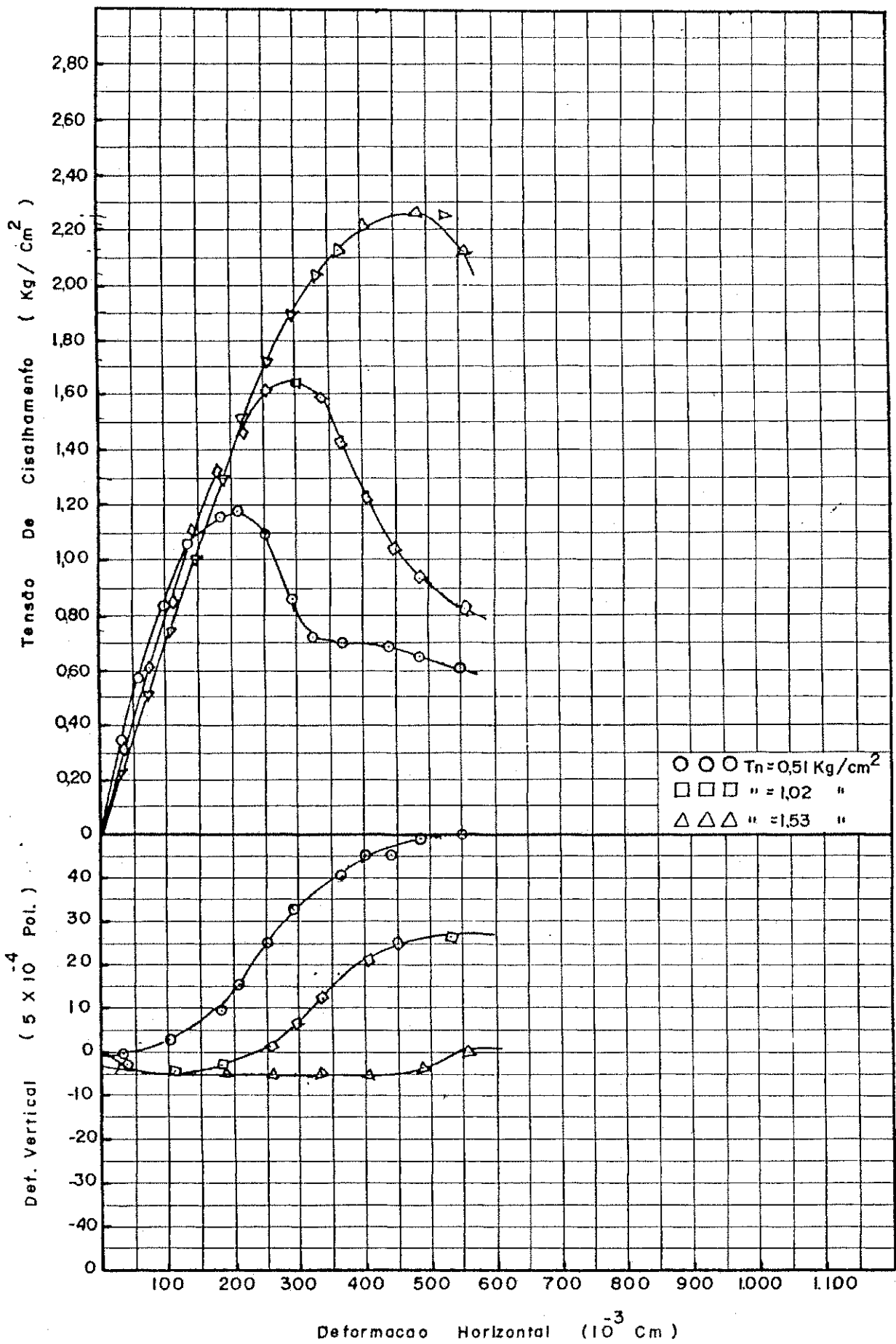


Figura 4.20 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 5, saturado.

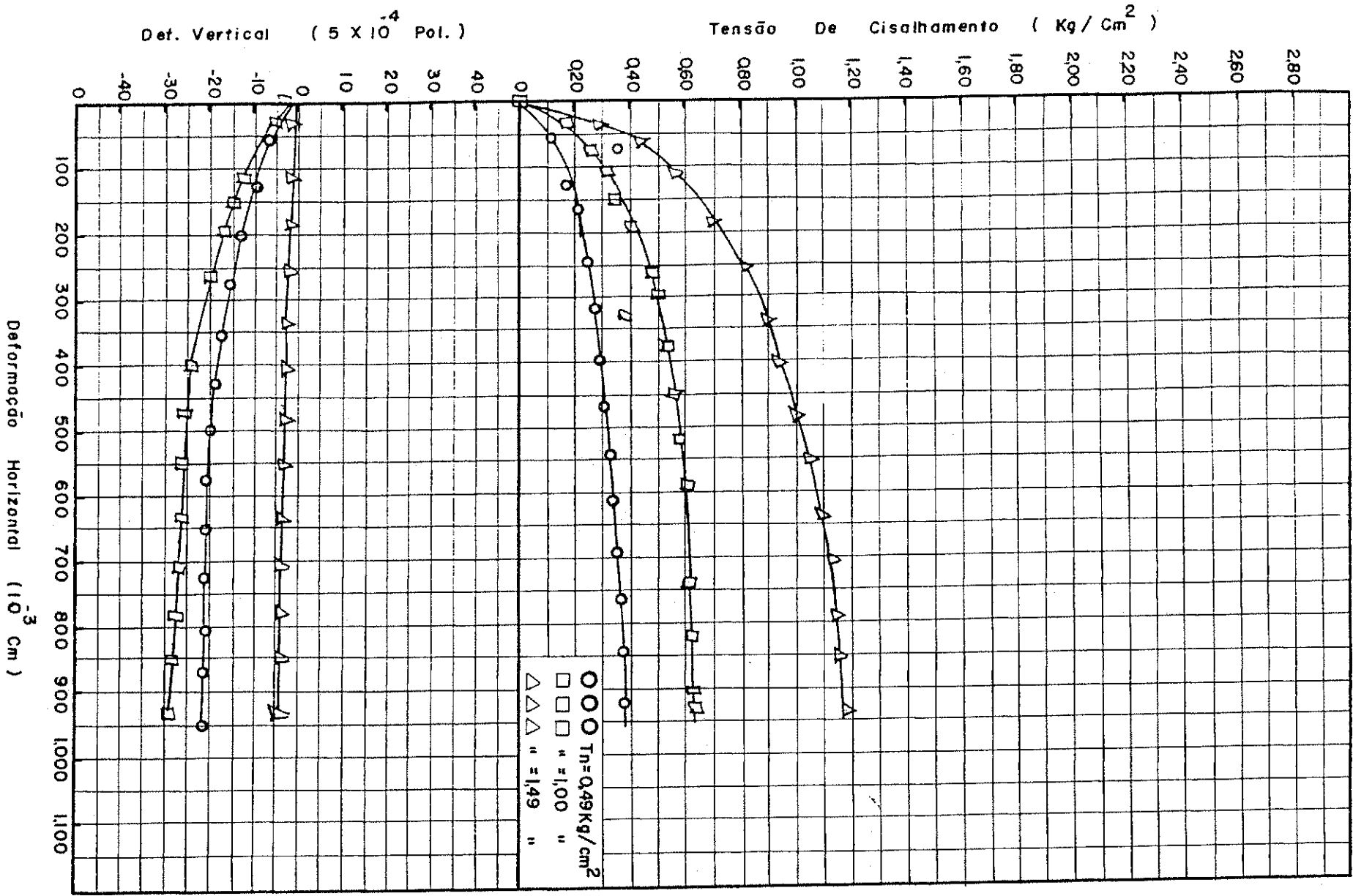


Figura 4.21.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 5, na umidade natural.

Figura 4.21.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 5, com um grau de saturação de 83,6%.

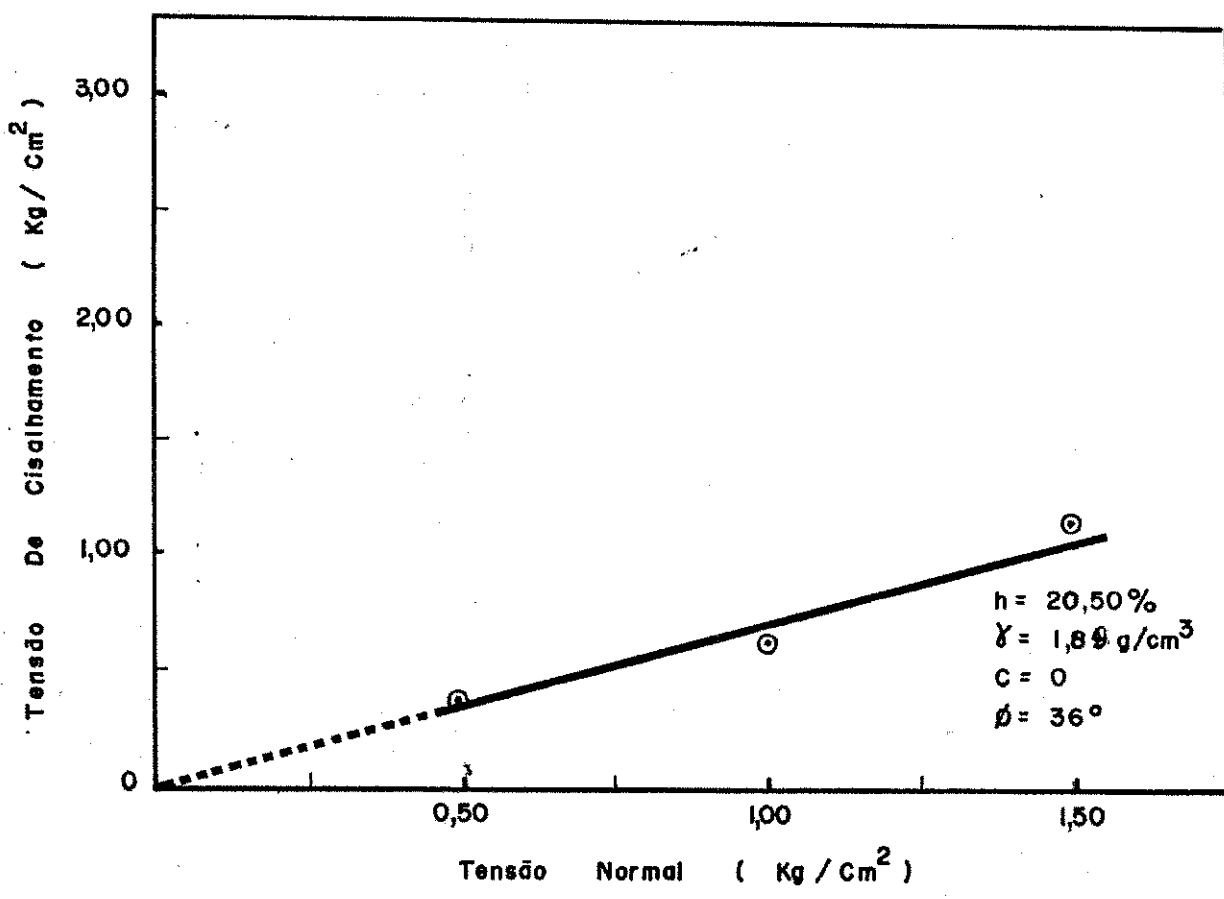
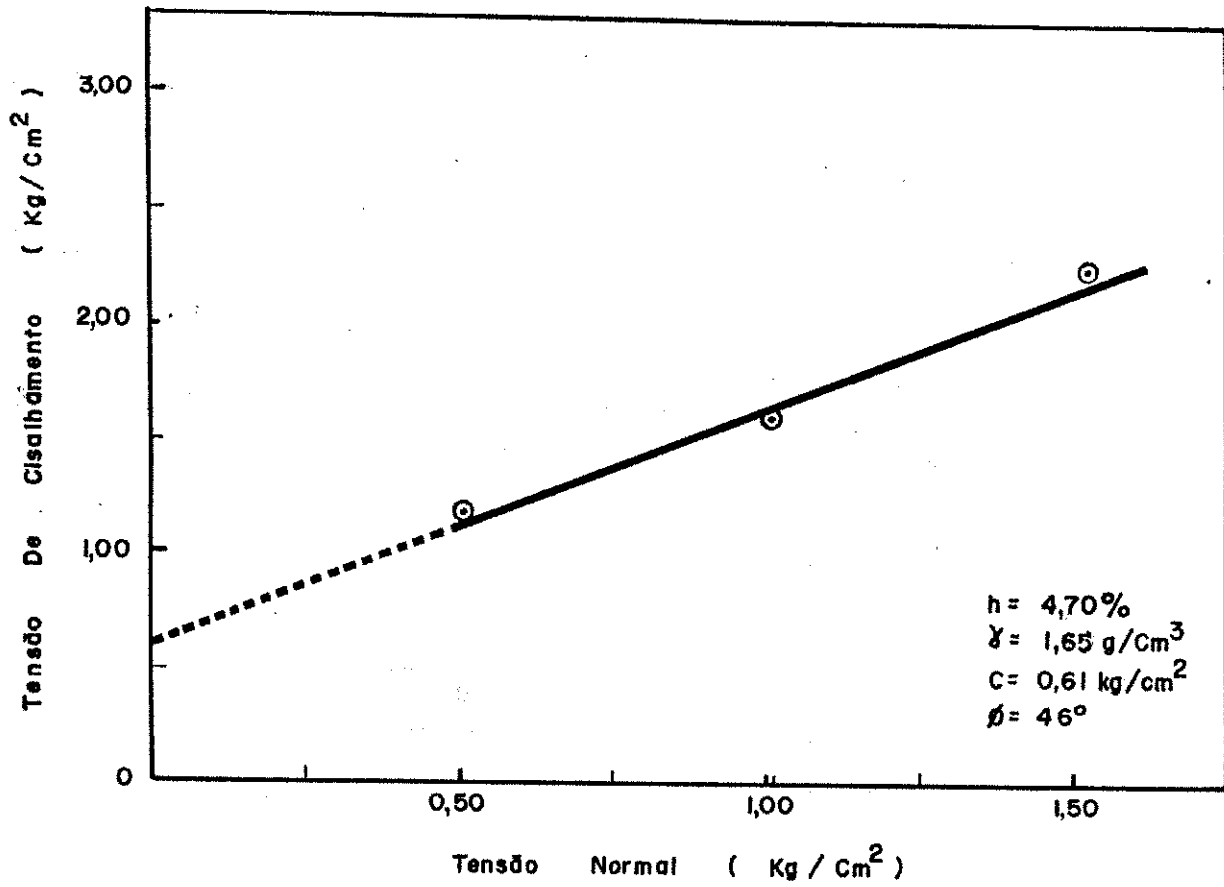


Figura 4.22 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 6, na umidade natural.

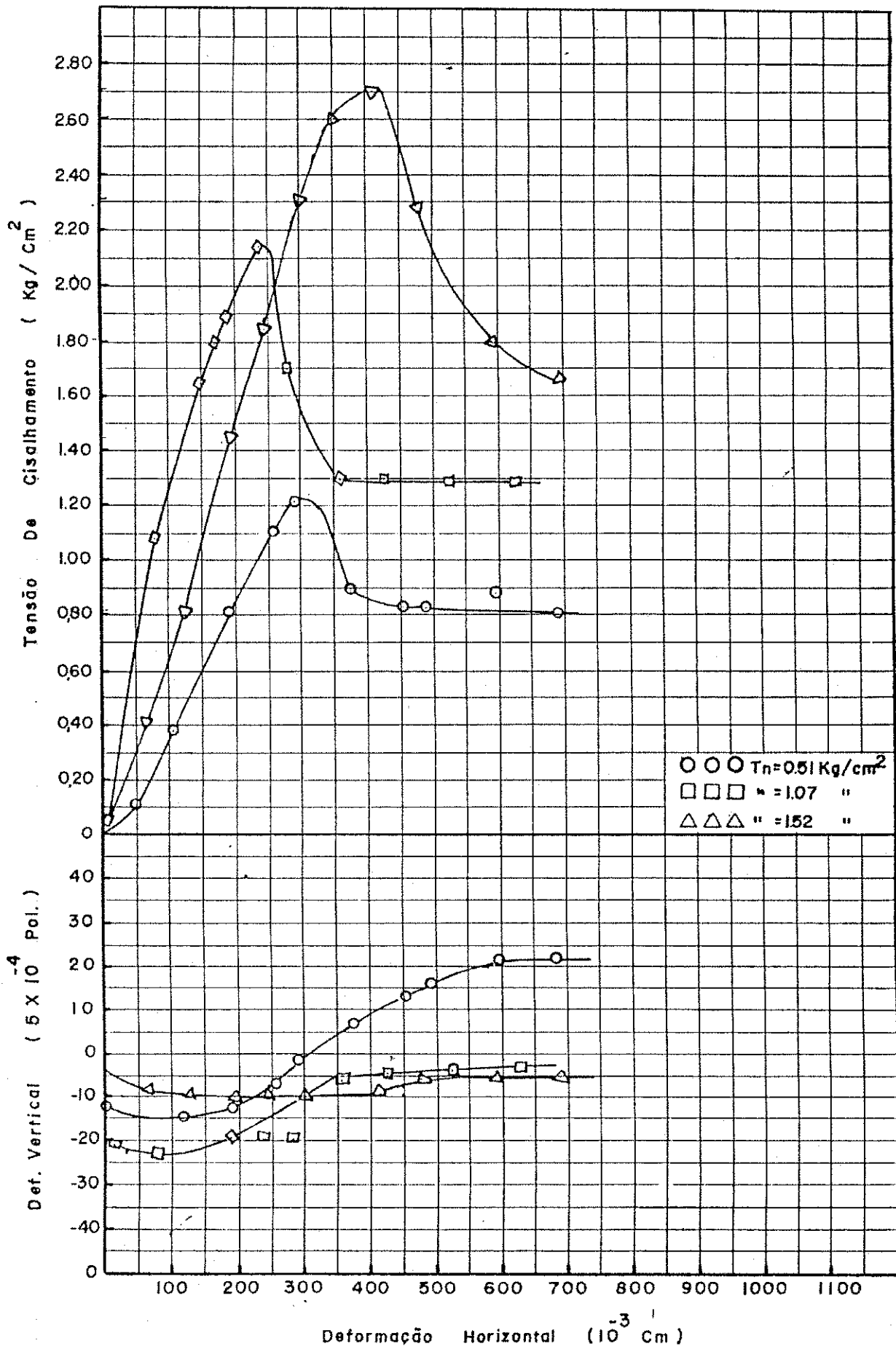


Figura 4.23 - Gráficos que relacionam deformação horizontal ver sus deformação vertical e tensão de cisalhamento, correspondentes ao solo do talude 6, saturado.

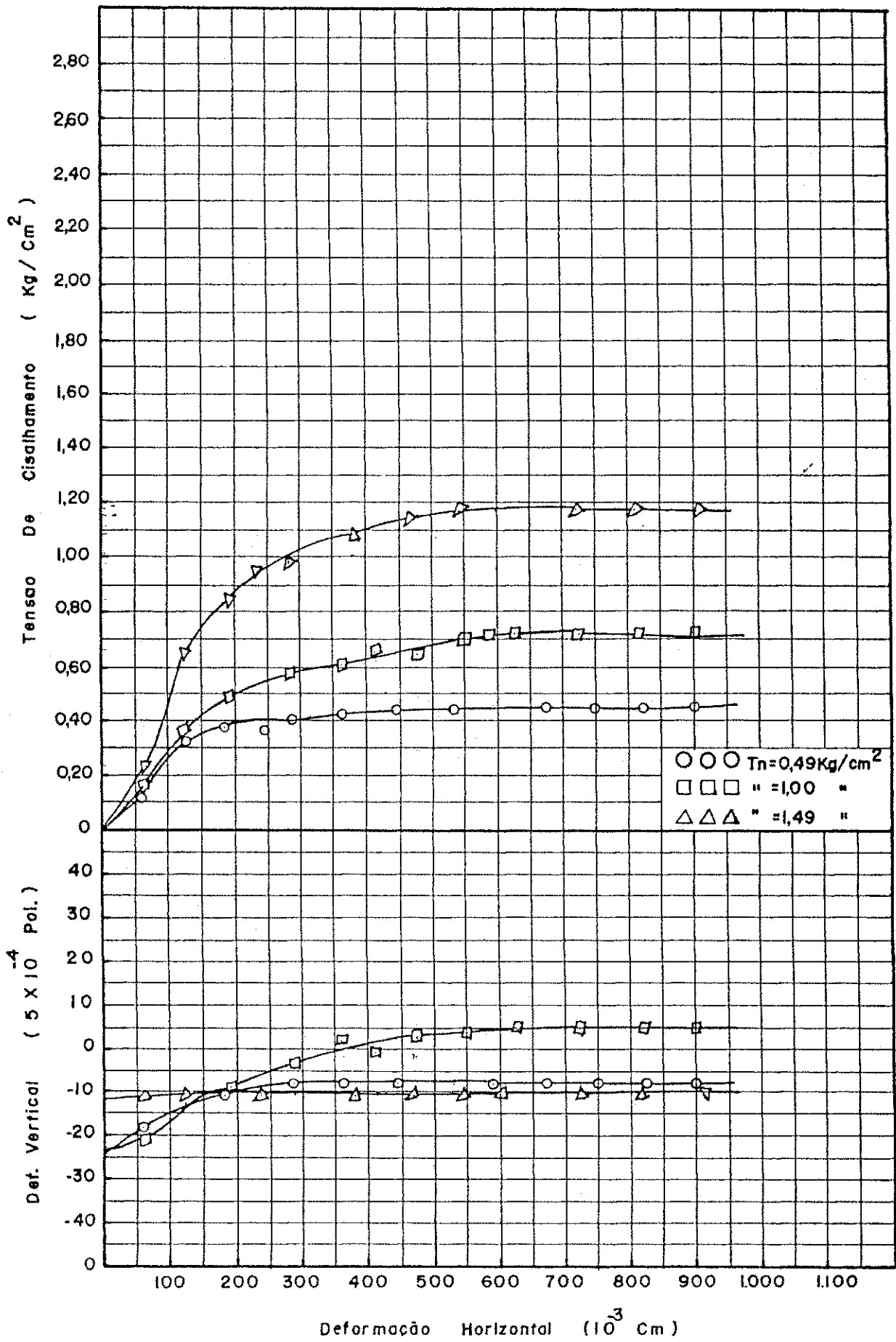
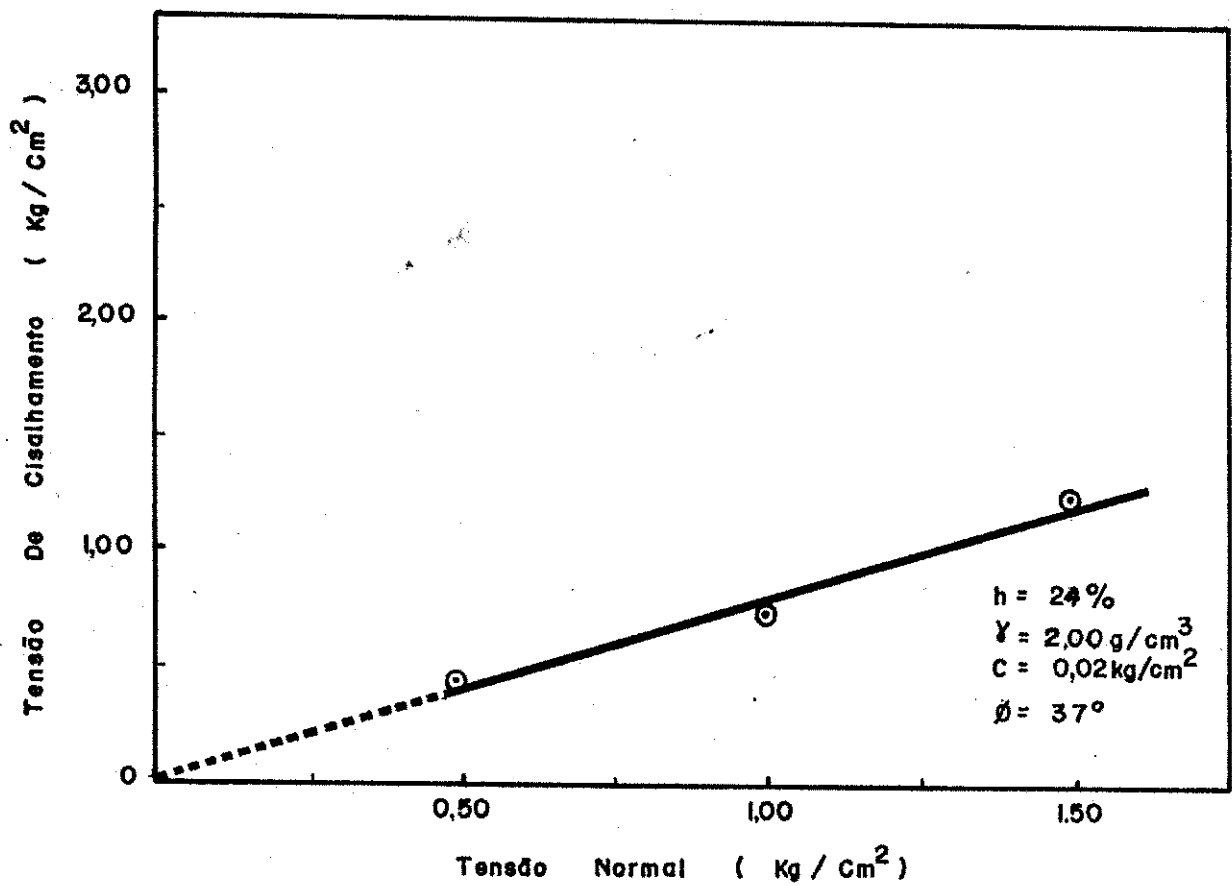
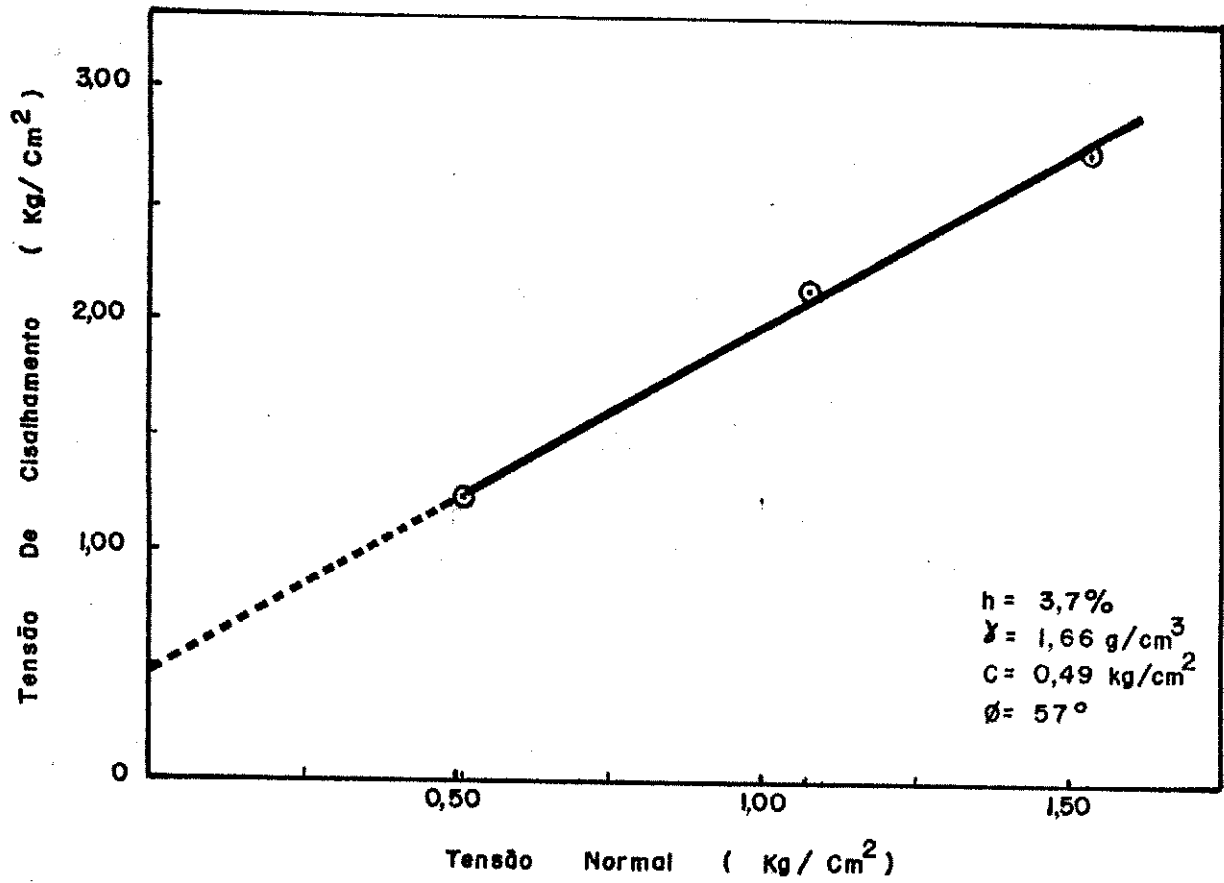


Figura 4.24.a - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 6, na umidade natural.

Figura 4.24.b - Gráfico relacionando tensão normal versus tensão crítica de cisalhamento do solo do talude 6, com um grau de saturação de 95,6%.



CAPÍTULO 5

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 - Aspecto geral

Os fatores que positivamente influenciam no fenômeno da erosão são divididos em dois grupos: os fatores externos e os internos. No primeiro grupo, destacam-se a chuva, vento, topografia, temperatura; e no segundo grupo são: granulometria, consistência do solo, compactação, permeabilidade, tipo e quantidade do mineral componente do solo, natureza do flúido dos poros, estrutura e teor de matéria orgânica.

a Existem casos de erosão, cujas causas compreendem a maioria dos fatores externos e internos já citados, porém, as observações de campo nos levam a crer que, a erosão em alguns casos é função de um ou dois fatores, podendo ser internos, externos ou ambos. Neste capítulo, os problemas de erosão sob este aspecto serão amplamente discutidos.

Os resultados das experiências de laboratório em conjunto com os dados de campo nos permitirão discutir e analisar os taludes sem e com problemas de erosão. Porém não são suficientes para afirmar com exatidão as causas do fenômeno estudado, já que existem os fatores intrínsecos ao solo, tais como: natureza do

flúido dos poros, tipo de mineral de argila, etc., que têm fortes influências no problema da erosão, conforme os resultados dos trabalhos realizados por Arumungam (10) e Arulandan (11), e que não foram determinados por razões diversas.

5.2 - Observações de campo

Os seis taludes selecionados podem ser observados sob dois aspectos gerais. O primeiro aspecto reside no fato de que as regiões em que estão localizados têm climatologias semelhantes. E o outro, com respeito às idades dos taludes. Os taludes 1, 2 e 3 são novos em relação aos outros, visto que, eles se situam numa estrada - (BR-104), recentemente inaugurada, cuja existência é de aproximadamente 2 anos e meio. Já os taludes 4, 5 e 6 têm uma existência de 25 anos. Sob estes aspectos os problemas de erosão também serão discutidos.

O terreno que fica acima do talude 1 tem um comprimento de 300 m (aprox.) e uma inclinação não menos inferior de 20°. O escoamento das águas da chuva sobre este terreno ocorre com alta velocidade, quando a precipitação pluviométrica é forte. Com isto, parte desta água não é contida pela valeta de crista ali existente, e o escoamento se realiza sobre a face do talude. O mesmo ocorre com o talude 2 (pertencente ao mesmo corte), como pode ser observado na fig. 3.1. Os solos destes dois taludes apresentam uma boa compactação natural.

O talude 3 apesar de ser composto por solos de pouca consistência (em sua maioria), e tendo uma altura e ângulo de inclinação bastante consideráveis, como pode ser visto nas figs. 3.6 e 3.7, não tem banquetas com canaletas de drenagem, que servem para diminuir a inclinação como a suavizar o escoamento das águas que caem sobre a face do talude.

O talude 4, também não tem patamares, ou seja, banquetas como canaletas. Como também não tem sarjeta em sua base. As partes mais erodidas estão na divisa entre a rocha alterada e o solo jovem. Conforme as suas dimensões, mostradas na fig. 3.10, as banquetas acima referidas são indispensáveis ao seu sistema de drenagem.

Quanto ao talude 5, a erosão mostrada na foto da

fig. 3.12.a, parece ser fruto de escavações em seu pe. A erosão causada pela chuva, só ocorre na camada que se situa logo abaixo do solo orgânico.

O talude t, dista uns 5m de margem de estrada. Este fato nos leva a crer que, há tempos passados, ocorreram pequenos deslizamentos das camadas que formavam sua face. A sua inclinação vertical deve-se ao fato da ocorrência de camadas de solos concrecionados. Ele tem boa drenagem e não apresenta problemas de erosão.

5.3 - Resultados dos ensaios de laboratório

O resumo dos resultados dos ensaios de granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e densidade real dos grãos, são os apresentados no quadro 4.1 do capítulo 4. Os resultados do ensaio de cisalhamento direto rápido é apresentado no quadro 5.1. A coluna 1 deste quadro corresponde aos taludes. Na coluna 2, tem-se o estado das amostras. As colunas 3 e 4 correspondem à umidade e peso específico aparente úmido, respectivamente. Nas colunas 5 e 6, tem-se o grau da saturação e o tipo de solo, correspondentes às amostras, respectivamente, e finalmente as colunas 7 e 8 indicam os resultados do ensaio, dando a erosão e o ângulo de atrito interno.

Neste quadro pode ser observado que os solos dos taludes 1, 3, 5 e 6, perdem a coesão, ou seja, tem coesão nula, quando estão com graus de saturação correspondentes aos indicados no quadro 5.1. O mesmo não ocorre para os solos dos taludes 2 e 4.

Os resultados experimentais apresentados no quadro 4.1, nos permite observar que os solos componentes dos taludes 1 e 2 são bastante semelhantes, isto é, solos arenosos e de média plasticidade. O talude 3 é composto de uma pequena camada altamente argilosa e duas outras de características arenosas, conforme os resultados de laboratório. No talude 4, há predominância de argila arenosa, (na parte superior do talude) e terreno arenoso. Nos taludes 5 e 6, a predominância é de argila, sendo que o solo lemo arenoso do talude 6 tem características lateríticas.

5.4 - Análise e discussão dos dados e resultados experimentais.

Tal.	Est. de umid. do solo	Peso esp. Apar. úmido (g/cm ²)	h(%)	Coesão (kg/cm ²)	Ang. de atrito	Grau de sat.	Tipo de Solo
1	natural	1.68	2.55	0,43	17°	-	lema argiloso
	saturado	1.97	19.67	0.00	13°	84.1	
2	natural	1.59	6.05	0.42	30°	-	lema arenoso
	saturado	1.88	24.88	0.33	14°	80.5	
3	natural	1.58	4.76	0.58	20°	-	lema arenoso
	saturado	1.83	20.55	0.02	17°	69.7	
4	natural	1.70	8.45	0.82	23°	-	argila pouco arenosa
	saturado	1.94	22.04	0.59	14°	83.5	
5	natural	1.65	4.70	0.61	21°	-	lema argiloso
	saturado	1.89	20.50	0.00	14°	83.6	
6	natural	1.66	3.70	0.49	28°	-	lema arenoso
	saturado	2.00	24.00	0.02	17°	95.6	

Quadro 5.1 - Resumo dos resultados do ensaio de cisalhamento direto rápido.

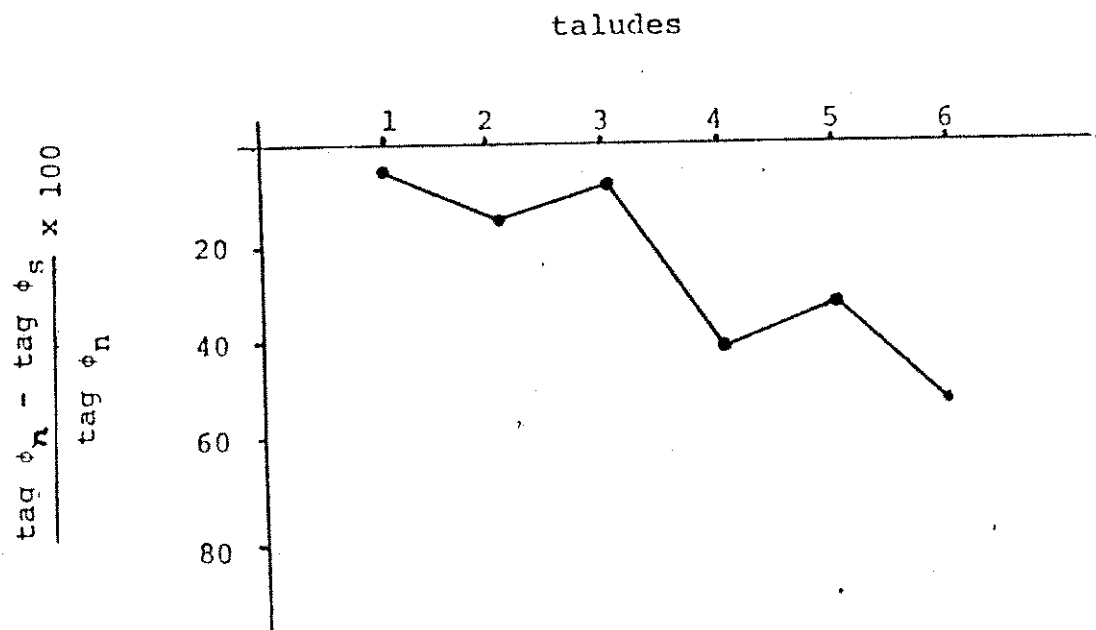
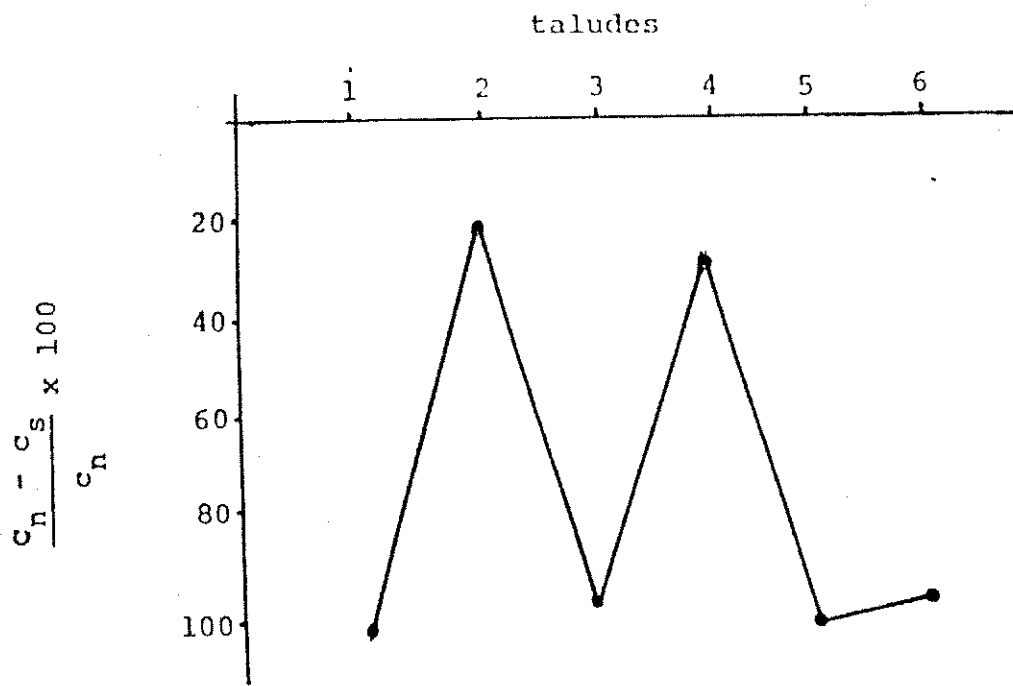
Todos os gráficos apresentados no capítulo 4, que correspondem aos resultados do ensaio de cisalhamento direto rápido, confirmam que a resistência do solo ao cisalhamento reduz quando esta está saturado. Esta redução de resistência pode ser grande para alguns solos e pequenos para outros. Os solos dos taludes 1, 3, 5 e 6 tiveram a coesão reduzida a zero, com redução também do ângulo do atrito interno. Por outro lado, os solos dos taludes 2 e 4 não apresentaram reduções significantes na coesão, mas o atrito interno destes solos foram reduzidos como os demais.

As figs. 5.1 e 5.2 mostram a variação da coesão e do coeficiente do ângulo de atrito interno dos solos dos taludes quando saturados, respectivamente. Estes gráficos nos mostram, de uma forma geral, que estes solos sofrem maiores reduções na coesão do que no coeficiente de atrito interno (tag.). A fig. 5.1 mostra que os solos dos taludes com e sem problemas de erosão sofrem grandes perdas de coesão, quando saturados (taludes 1,3,5 e 6), como também pequenas reduções na coesão (taludes 2 e 4). O mesmo fato é verificado para o atrito interno do solo, conforme mostra a Fig. 5.2. De forma que, perdas de coesão e atrito interno do solo com problemas de erosão, quando saturado, não são elementos suficientes para explicar problemas de erosão superficial nos taludes.

Os solos que compõem os taludes 1 e 2 são semelhantes conforme os resultados experimentais apresentados no quadro 4.1. Para o talude 1, tem-se: lemo arenoso (ou barro arenoso), lemo argiloso e argila. O talude 2 é composto de lemo arenoso, e argila. De acordo com os resultados das experiências realizadas por Nascimento (3), dos solos que têm percentagens maior de silte e areia fina, são mais susceptíveis à erosão. Assim sendo, o lemo arenoso do talude 2 é mais erodível do que o lemo argiloso do talude 1. Mas, os resultados do cisalhamento direto mostram que a coesão do lemo argiloso foi reduzida a zero quando saturado, enquanto que a coesão do lemo arenoso do talude 2 teve, apenas uma variação de 0,42 a 0,33 Kg/cm² na coesão quando este foi saturado. Então, neste caso, o lemo argiloso seria mais erodível visto que sua coesão se anula, quando este é saturado. As observações de campo mostram que os solos do talude 2 são bastantes compactos, e isto certamente tem influência na pequena redução da coesão, quando estes saturados. No cômputo geral, o solo do talude 2 tem maior

Figura 5.1 - Redução de coesão com a saturação dos solos. estu
dados, versus taludes.

Figura 5.2 - Redução do atrito interno dos solos, com a sat
uração, versus taludes.



susceptibilidade à erosão do que o solo do talude 1, já que este é medianamente plástico, enquanto que aquele é arenoso. Mas, a justificativa mais razoável está na topografia local, conforme já foi referida, anteriormente. Conforme a fig. 3.1, conclui-se que a quantidade de água que escoar sobre a superfície do talude 1, é muitas vezes maior que no talude 2; daí a razão pela qual o talude 1, ter problemas de erosão e o talude 2 não ter.

Os estudos geológicos sobre a formação dos solos afirmam que os solos residuais, devido aos intemperismos físicos - químicos, apresentam estruturas que não têm relacionamento físico algum com a rocha de origem. A estrutura de um solo residual está ligada ao grau de intemperismo sofrido por ele. Como as argilas representam o último produto do intemperismo das rochas, elas esboçam uma estrutura mais estável que os solos jovens, os quais normalmente são arenosos.

Os resultados dos ensaios de laboratório das amostras do talude 3, indicam que a classificação geotécnica dos solos que aparecem no perfil mostrado na fig. 3.7, é a seguinte: o silte arenoso amarelado, trata-se de um lemo arenoso sem plasticidade; a argila branca corresponde a um solo argilo lemo arenoso de baixíssima plasticidade (I.P. = 1,9) e a argila vermelha é um solo argiloso de alta plasticidade (I.P. = 17,6%). O ensaio de cisalhamento direto realizado com amostras de solo lemo arenoso (muito abundante), indicam uma grande perda de coesão, quando este está saturado. Resultado que difere do encontrado no lemo arenoso do talude 2. Os quadro geotécnico e geológico deste talude apresentam uma pequena camada argilosa logo abaixo do solo orgânico e duas camadas de solos bastante arenosos intercaladas entre a camada de argila e a rocha alterada. Estas camadas arenosas abrangem, aproximadamente, 60% do talude e, geologicamente são classificados por solo jovem, onde os minerais principais ali encontrados, tais como: ortoclásio, microlina e caulim, ainda estão em fase de transformação em outros minerais, pelo processo do intemperismo químico. Com base nestes dados e resultados experimentais acima mencionados, é fácil concluir que a estrutura deste solo é pobre em cimentações entre grãos e conseqüentemente tem frágil estrutura. Solos como estes tornam-se altamente estáveis quando ocorre um corte nas camadas (no caso o corte da estrada). Além destes fatores, somam-se a grandeza de

suas dimensões geométricas, as quais não correspondem ao tipo de solo. Uma pequena falha na drenagem de crista, foi o suficiente para provocar os escorregamentos e as erosões profundas ali ocorridas.

As fotografias das figuras 3.9.a, b e c, nos mostram que o perfil do talude 4, começa (de baixo para cima) com a rocha sã, depois a rocha alterada em seguida o solo jovem e por fim o solo maduro. Estas duas últimas camadas são compostas por lemo arenoso, areia argilosa e argila, pouco arenosa, conforme os resultados experimentais. Estes solos argilosos, têm plasticidade média e contém 65% de areia, sendo que 32% é a areia fina. Tem coesão no estado natural de $0,82 \text{ Kg/cm}^2$ e quando saturada esboça uma coesão de $0,59 \text{ Kg/cm}^2$, o que denota ter uma boa consistência. Este talude tem uma altura de 20m e uma inclinação de 52° , conforme a fig. 3.10. A água da chuva que o atinge e escorre pela sua face, alcança, naturalmente, uma velocidade alta, provocando, assim, fortes cisalhamentos superficiais. Devido aos intemperismos físicos e químicos, os grãos de minerais da rocha alterada estão fracamente ligados entre si. Com o cisalhamento causado pela água que escoar sobre o cisalhamento causado pela água que escoar sobre a face do talude, estes minerais são camadas, havendo, desta forma, a formação de pequenos e médios canais na própria rocha, conforme mostra as fotos acima referidas. Os problemas mais sérios de erosão neste talude, ocorrem numa região que divide o solo maduro da rocha alterada. Este solo, individualmente, certamente não teria problema de erosão, mas ele sofre uma descontinuidade de estrutura, na divisa com a rocha alterada, onde ocorre a predominância do lemo arenoso, o qual é possuidor de um esqueleto granular e de acordo com Richard (5), solos que têm esqueleto granular são mais susceptíveis à erosão. Daí a possível razão da maior ocorrência de erosão naquela zona do talude.

De acordo com os estudos realizados por Arulandan (11) e Arumungam (10), a erosão em um solo aumenta com a taxa de absorção de sódio, deste solo, onde esta taxa de absorção de sódio é dada pela fórmula:

$$TAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{1}{2} [(Ca^{++}) + (Mg^{++})]}}$$

cujo significado de cada componente é dado no capítulo 2. Em resu mo pode ser dito, que a taxa de absorção de sódio é função direta da concentração de Na e função inversa de concentração do cálcio mais magnésio.

O talude 5 é composto por argilas de alta e média plasticidade e por um lemo argiloso. Os ensaios de cisalhamento ' sobre amostras de lemo argiloso, indicam uma boa coesão como também um razoável ângulo de atrito, já apresentados no capítulo' 4. A alta plasticidade das camadas argilosas que compõem 90% do talude parece ser responsável, pela sua integridade, excetuando-se a parte logo abaixo do solo orgânico, onde ocorre problemas de erosão em quase toda extensão longitudinal. Os resultados da aná- lise química apresentada no quadro 4.2, do capítulo 4 indicam que o solo deste talude tem baixa concentração de cálcio mais magnê - sio (Ca + Mg). A erosão que se desenvolve na parte inferior do solo orgânico (veja fig. 3.12.b), possivelmente tem relacionamen- to com taxas de absorção de sódio, proveniente da matéria orgâni- ca. Tendo o solo uma baixa concentração de Ca mais Mg, ele terá u ma alta taxa de absorção de sódio e consequentemente mais suscep- tível à erosão. Porém, é necessário um estudo mais detalhado da constituição íntima deste solo, para se ter uma conclusão mais fundamentada.

Possivelmente a boa drenagem de uma inclinação de aproximadamente 90%, como também a alta compactação natural e al- ta constituição ferruginosa do talude 6, são os elementos funda - mentais na ausência de erosão neste talude. A alta inclinação evi- ta que a face do talude seja atingida cessantemente pelas águas provenientes da chuva. E a drenagem não permite o escoamento de água sobre sua face.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 - Conclusões

Os dados e as observações de campo, bem como os resultados experimentais de laboratório formam em conjunto de elementos dependentes entre si, nas análises e discursões dos problemas de erosão. Os dados de campo e as observações são capazes de explicar alguns problemas específicos de erosão, em combinação com os conhecimentos de geologia e mecânica dos solos. Porém, não são elementos suficientes para explicar os problemas gerais de erosão. Os resultados dos ensaios de laboratório são indispensáveis aos dados de campo, nas discursões e análises dos problemas específicos e genéricos.

As análises e discursões sobre os problemas de erosão nos taludos selecionados, nos levam às seguintes conclusões:

- 1 - Aa granulometria, os limites líquidos e plástico de um solo, em combinação com os dados de campo são elementos capazes de identificar as causas da erosão em alguns casos.
- 2 - O ensaio de cisalhamento direto rápido determinam tensões cisalhantes no solo, as quais não

correspondem exatamente às tensões provocadas pela água nas partículas de solo da superfície do talude. Possivelmente, esta é a razão pela qual, o resultado deste ensaio para os solos do talude 4 não corresponde ao observado em campo. Os resultados de laboratório indicam que a coesão dos solos do talude 4 tem uma pequena redução na coesão, quando isto não deveria ocorrer, já que este talude apresenta problemas com erosão no solo examinado.

- 3 - Os taludes novos são mais erodidos do que os velhos. Isto porque a erosão ocorre em maiores quantidades, quando a estrutura do solo é perturbada. O processo erosivo diminui à medida que o solo adquire uma estrutura mais estável.
- 4 - Taludes compostos por camadas espessas de solos arenosos são muito susceptíveis à erosão.
- 5 - A descontinuidade de camadas em solos residuais é fator preponderante nos problemas de erosão nestes solos. Nos taludes de solo residual, em que ocorre a divisa de camadas entre a rocha alterada e o solo jovem, a erosão é maior nesta divisa.
- 6 - Para os solos residuais em que o processo de intemperismo é recente, existe maior probabilidade de ocorrência de erosão.
- 7 - A ausência de banquetas em taludes, tais como o talude 3 e 4 é uma das causas principais dos problemas de erosão.
- 8 - Análise de elementos intrínsecos ao solo são necessários para explicar erosão do tipo mostrada no talude 5.

6.2 - Recomendações

Para um estudo mais detalhado do fenômeno de erosão em taludes de corte de estradas, as recomendações são as seguintes:

- a - Fazer um estudo comparativo da erosão em taludes de solo residual com os taludes em solo sedimentar.
- b - Estudar o grau de intemperismo físico-químico dos taludes de solo residual.
- c - Realizar ensaios de laboratório que determinam as tensões de cisalhamento provocadas pela água nas partículas do solo, pelo processo do cilindro rotativo ou pelo método da calha.
- d - Fazer análise química que determine a natureza do flúido existente nos vazios do solo.
- e - Determinar as quantidades de erosão nos solos lemo arenosos compactos e as argilas, quando submetidos ao mesmo fluxo d'água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - ARULANANDAN, K.; SARGUNAM, A.; LOGANATHAN, P.; KRONE, R.B. Application of Chemical and Electrical parameters to prediction of Erodibility - Special Report Nº 135, Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control; Highway Research Board, 1973. 141 p.
- 02 - ARUMUNGAM, K.; ARULANANDAN, K. Hydraulic Erosion of Cohesive Soils, Highway Research Record Nº 423, 1972.
- 03 - CHRISTENSEN, R. W. e DAS, M.B. Hidraulic Erosion of Remolded Cohesive Soils - Special Report Nº 135, Erosion on Soil, Highway Research Board, 1973. 141 p.
- 04 - GRISSINGER, E.H. Resistance of Selected Clay Systems to Erosion by Water - Water Resources Research, vol. 2, Nº 1, pp. 131 - 138, 1966.
- 05 - MASCH, F.D.Jr.; ESPEY, W. H. Jr.; MOORE W. L. Measurements of the Shear Resistance of Cohesive Sediments Agr. Res. Service, Pub. 970, 1965.
- 06 - MEADE, R. H. Factors Influencing the Early stages of the Compaction of Clays and Soils - Jour. Sedimentary Petrology, vol. 36, Nº 4, Dec. 1966.
- 07 - MITCHELL, J.R. Fundamental Aspects of thixotropy on Soils Jour. Soil Mech and Found. Division, Proc. ASCE, Proc. Paper 2522, June 1960.
- 08 - NASCIMENTO, U. Estudo da Regularização e Proteção das Barrancas de Luanda - L.N.E.C., Publicação Nº 30, 1952.
- 09 - PRASWELL E. ROBERT Causes and Mechanisms of Cohesive Soil Erosion: the state of art - Special Report, Nº 135, Erosion on Soil, Highway Research Board, 1973. 14 p.

- 10 - PARTHENIADES, E e PAASWELL, R.E. Erodibility of Channel with Cohesive Boundary - Jour. Hydraulics Division, Proc. ASCE, N° Hys, pp. 755 - 771, 1970.
- 11 - SMALLEY, J. IAN Cohesion of Soil Particles and the Intrinsic Resistance of simple Soil Systems to wind Erosion The Journal of Soil Science, vol. 21, N° 1, March 1970.
- 12 - WINTERKORN, F. HANS Experimental Study of the Attack of Water on Dry Cohesive Soil Systems - Special Report, N° 135, Erosion on Soil, Highway Research Board, 1973. 141 p.
- 13 - WISCHMEIER, H. W. e MEYER, L.D. Soil Erodibility on Construction Areas - Special Report, N° 135, Erosion on Soil, Highway Research Board, 1973. 141 p.



A G R A D E C I M E N T O S

O autor agradece ao Professor GUNTHER E. BAUER, a cuja orientação e estímulo, deve a realização deste trabalho. Aos Professores VAJAPYAM S. SRINIVASAN e ABEL T. CAVALCANTE, pelo apoio e orientação na conclusão deste trabalho.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação, bem como professores do CTEC/U.F.AL e CCT/U.F.PB, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meu reconhecimento.

Aos datilógrafos César Lemos Figueirêdo e Margarida (Secretária do CTEC), como também aos laboratoristas, a minha gratidão.