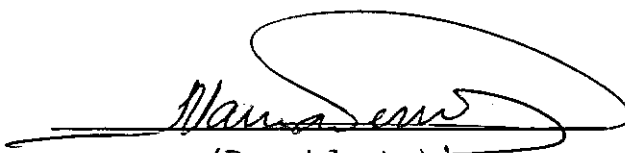
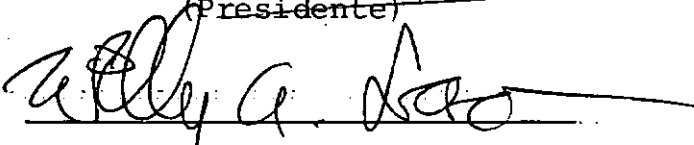
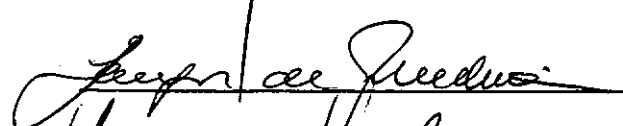
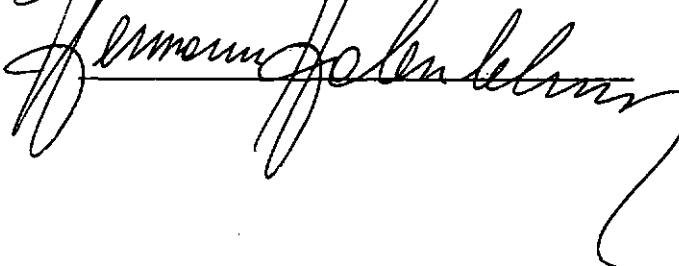


EROSÃO SUPERFICIAL EM TALUDES DE CORTE EM  
SOLO RESIDUAL DE GNAISSE

JALVES JOSÉ VERÇOSA DO REGO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVER  
SIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS RE  
QUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

  
(Presidente)  
  
  


RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1978.

DEDICATÓRIA

À Ginà, minha esposa

## AGRADECIMENTOS

- IPR-Instituto de Pesquisas Rodoviárias do DNER
- TRAFECON-Consultoria e Projetos de Engenharia Ltda.
- CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- Aos tecnólogos Menalca Alexis Belmonte Ramos, Imaculada Conceição da Silva e Sergio Iório
- Aos desenhistas Roberto da Costa Faria e Sergio Trotta
- Às datilógrafas Marilene Ferrari, Elizabeth Soliva Flores e Nei de Tavares Pinho
- Aos colegas Anna Margarida, Jaime Catroli, Mário Marcio Alvarenga e Francisco José Casanova
- Ao professor Mauro Lúcio Guedes Werneck pelo incentivo e orientação prestados durante a realização deste trabalho
- Aos professores Willy Alvarenga Lacerda, Jacques de Medina e Hermann Haberlehner, membros da banca examinadora, pela revisão dos originais
- A todos os colegas e funcionários da TRAFECON, COPPE e IPR que de forma direta ou indireta contribuíram na realização deste trabalho

## RESUMO

Este trabalho visa ao estudo da Erosão Superficial em Taludes de Corte. Pode-se dividi-lo em duas partes.

A primeira consiste de um estudo em laboratório, onde através de resultados de ensaios procurou-se comparar a erodibilidade relativa dos diferentes horizontes dos solos Residuais de Gnaiss. Ainda nesta parte tentou-se correlacionar a erosão observada nos ensaios com outras propriedades dos solos.

A segunda consta de observações IN SITU em vários taludes e coleta de dados sobre Erosão e Precipitação em duas Áreas-Teste. Estes dados possibilitaram a determinação de um Índice de Erodibilidade (I.E) que relaciona perda de solo com quantidade de chuva.

Paralelamente às duas partes acima citadas, fez-se uma revisão da bibliografia consultada.

## ABSTRACT

This thesis aims at the study of superficial erosion of cut slopes. It is divided into two parts.

The first part consists of a laboratory investigation where, by means of test results, the relative erodibility of various layers of gneissic residual soils was compared. Also in this part, an attempt was made to correlate the relative erodibility observed in the tests with other soil properties.

The second part deals with field observations in various slopes and the measurement of erosion and rainfall in two trial cuts. The data obtained permitted the determination of an Erodibility Index (IE) relating soil loss to height of rainfall.

In addition to the above mentioned parts, a bibliographic review on the subject is also presented.



## Í N D I C E

I	-	INTRODUÇÃO	1
II	-	OBJETIVOS	3
III	-	CONSIDERAÇÕES SOBRE A EROSÃO	5
		III.1 - PRELIMINARES	6
		III.2 - CLASSIFICAÇÃO DA EROSÃO	6
		III.3 - ÁGUA COMO AGENTE EROSIVO	8
		III.4 - DESAGREGAÇÃO E TRANSPORTE DO MATERIAL SÓLIDO	11
IV	-	ATIVIDADES DE CAMPO	21
		IV.1 - PRELIMINARES	22
		IV.2 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS ENSAIADAS	23
V	-	ENSAIO DE EROSÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	29
		V.1 - OBJETIVOS	30
		V.2 - DESCRIÇÃO DO ENSAIO E EQUIPAMENTO USADO	30
		V.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	31
		V.4 - APÊNDICE - ENSAIO DE EROSÃO - METODOLOGIA	33
VI	-	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39
		VI.1 - GENERALIDADES	40
		VI.2 - ANÁLISE DOS ENSAIOS DE EROSÃO COMO UM TODO	40
		VI.3 - ANÁLISE DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A EROSÃO	42
		VI.3.1 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO NA EROSÃO	42
		VI.3.2 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA INCLINAÇÃO DA RAMPA NA EROSÃO	44

VI.3.3	- INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DA AMOSTRA NA ERO-SÃO	45
VI.3.4	- INFLUÊNCIA SOBRE A EROÇÃO DO CICLO ENSAIO-SECAGEM-ENSAIO	49
VI.3.5	- VAZÃO CRÍTICA DE ENSAIO PARA A EROÇÃO DOS SOLOS E SUA DE TERMINAÇÃO	50
VII	- TENTATIVA DE CORRELAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS ESTUDADOS COM PARÂMETROS OBTIDOS EM OU TROS ENSAIOS DE LABORATÓRIO	73
VII.1	- COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA	74
VII.2	- GRANULOMETRIA	74
VII.3	- LIMITES DE CONSISTÊNCIA	78
VII.3.1	- ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	78
VII.3.2	- LIMITE DE PLASTICIDADE (LP)	79
VII.3.3	- LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) E LI MITE DE CONTRAÇÃO (LC)	79
VII.4	- PERCENTAGEM DE MATÉRIA ORGÂNICA	80
VII.5	- EXPANSIBILIDADE "LNEC"	80
VII.6	- ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO	81
VII.7	- LIMITE DE ABSORÇÃO	83
VIII	- RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES E COLETA DE DADOS NO CAMPO	100
VIII.1	- EROÇÃO DAS ÁREAS-TESTE	101
VIII.2	- OBSERVAÇÕES NO CAMPO	102
VIII.3	- ÍNDICE DE ERODIBILIDADE (IE)	103
VIII.4	- CORRELAÇÃO ENTRE A EROÇÃO E A PRECI PITAÇÃO	103
IX	- CONCLUSÕES E SUGESTÕES	111
	BIBLIOGRAFIA	114





## I - INTRODUÇÃO

A pesquisa Estabilidade de Taludes faz parte do programa do governo federal para o período 1975/1979 na área do desenvolvimento tecnológico (pesquisas), estando sob os auspícios do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) do DNER.

Faz parte desta pesquisa o estudo da Erosão Superficial dos Solos, assunto que não obstante o grande interesse prático para o setor rodoviário, caracteriza-se pela escassez de trabalhos específicos em nosso meio técnico.

O estudo da erosão superficial reveste-se de grande importância, não apenas no contexto rodoviário, como também, nas atividades agrícolas e urbanas.

O enfoque dado ao estudo da erosão superficial dos Taludes deve ser diferente dos utilizados para a erosão sob o ponto de vista da agricultura e para a erosão dos canais.

No primeiro caso, a erosão tem que ser estudada ao longo de todo o talude de corte e sob condições de escoamento das águas de precipitações pluviométricas. No segundo caso, (agricultura) a preocupação principal é a perda parcial ou total por erosão, dos nutrientes das plantas no manto superficial do solo. Finalmente, a erosão dos canais é feita sob condições de escoamento totalmente diversa daquelas que ocorrem na superfície dos Taludes.

Para este trabalho fez-se estudos de observações em Taludes ao longo da BR-116 (Rodovia Presidente Dutra), trecho do estado do Rio de Janeiro, incluindo instalações de duas Áreas-Teste nos taludes dos kms 25 e 29,5 lado esquerdo. Paralelamente às observações de campo, executaram-se ensaios de laboratório em amostras coletadas nos taludes do km 25, lados direito e esquerdo, e do km 29,5, lado esquerdo.



## II - OBJETIVOS

Em nosso país, diversos fatores contribuem para a geração de um grave problema como o da EROSÃO DOS SOLOS. Dentre tais fatores, podemos citar os climáticos e os geológicos que, juntamente com as atividades humanas, são os principais responsáveis pelo desenvolvimento do processo erosivo. Este processo por vezes atinge enormes regiões, acarretando sérios prejuízos, tanto no setor viário, como nas atividades agrícolas e urbanas.

Nos taludes de corte e de aterro, o fenômeno erosivo age de forma a tornar suas superfícies irregulares, chegando até mesmo a modificar suas geometrias originais e causar constantes desmoronamentos e/ou deslizamentos.

Apesar disto, o quase completo desconhecimento da mecânica do fenômeno, pelo nosso meio técnico, dificulta seu equacionamento e provável quantificação. Para que isso aconteça, necessário se faz um estudo detalhado, a fim de definir-se um índice de erodibilidade dos solos através de ensaios de laboratório específicos ou não, comparando-o com observações e medidas de erosão no campo.

Este trabalho objetiva, assim, determinar uma metodologia de ensaios, capaz de definir esse índice de erodibilidade, em função das características ou propriedades intrínsecas do solo, e servir de base para a adoção de medidas preventivas contra a erosão.

Assim, é que, através do ensaio específico de erosão (Indertbitzen), estamos tentando quantificar a susceptibilidade a erosão relativa, dos diferentes horizontes do solo residual de gnaiss, e também a influência da temperatura, ângulo de inclinação da rampa (talude) e vazão, no processo erosivo.



### III - CONSIDERAÇÕES SOBRE A EROSÃO

#### III.1 - PRELIMINARES

O fenômeno erosão de a muito vem preocupando grande número de técnicos em diversos países, notadamente aqueles ligados aos problemas de conservação do solo e do meio ambiente. Já na década de 30, Middleton<sup>54</sup> e Peele<sup>73</sup>, dentre outros, desenvolveram trabalhos de pesquisa, tanto no sentido de melhor conhecer o mecanismo do fenômeno e seu consequente equacionamento, como alertar para suas graves consequências.

No Brasil a erosão conta com um fator agravante que é o clima tropical. As constantes precipitações pluviais favorecem sobremaneira o processo erosivo.

Neste capítulo, tenta-se fazer de maneira sucinta e objetiva, um resumo da bibliografia pesquisada, procurando-se adaptar os diferentes aspectos da erosão às nossas condições climáticas e geológicas.

#### III.2 - CLASSIFICAÇÃO DA EROSÃO

De forma geral a erosão é classificada em 2 grupos principais: Erosão Geológica e Erosão Acelerada.

##### a) Erosão Geológica -

É um processo natural ou normal que se verifica sem nenhuma interferência do homem; isto é, quando o solo se encontra em seu meio ambiente natural, com as vegetações e condições topográficas primitivas. Este tipo de erosão tem contribuído para a formação dos solos e sua distribuição na superfície da Terra;

##### b) Erosão Acelerada -

É aquela provocada principalmente pela água e pelo vento, depois que o meio ambiente é de alguma forma modificado pelo homem. Como exemplo de tais modificações, temos: eliminação ou substituição da cobertura vegetal

primitiva, alteração das condições naturais de equilíbrio dos maços através de cortes e aterros, dentre outros. Dependendo da forma e do agente causador, a erosão pode ser subdividida em:

A - Erosão Superficial	{	Laminar Ravinamento Canais profundos ou Voçorocas
------------------------	---	---

B - Erosão Subterrânea (piping)

No decorrer desse trabalho, trataremos apenas da erosão superficial. Detalharemos a seguir as 3 diferentes formas de erosão.

#### - EROSÃO LAMINAR

É caracterizada pela perda aproximadamente uniforme do solo em finas camadas em uma certa área. É causada pela ação conjunta do pingo de chuva e escoamento. No início da precipitação, a ação direta dos pingos contra os grãos, desagrega-os de forma uniforme, permitindo seu posterior carreamento pelo escoamento superficial. Este tipo de erosão raramente ocorre nos taludes de estradas.

Segundo Braun<sup>16</sup>, a erosão laminar é mais comum em terrenos de declives uniformes, de baixa inclinação e sem depressões. Ele diz ainda que devido à perda uniforme do solo, dificilmente é percebida pelos agricultores, que somente são alertados para o fato pela diminuição das colheitas.

#### - EROSÃO POR RAVINAMENTO

É aquela que ocorre principalmente quando há concentração de fluxos d'água em determinados pontos, formando a partir daí ravinas ou canaletas bem definidas. Esta erosão é facilmente perceptível no seu início e bastante frequente nos taludes de estradas, ver fotos 1, 2, 3 e 4.

Quando não tratada em seu estágio inicial, este tipo de erosão tende a aumentar, tanto em largura como em profundidade, vindo a formar em seguida a erosão em canais profundos ou voçorocas. O aumento nas dimensões das ravinas, verifica-se quase sempre, após fortes chuvas, quando cria-se alta velocidade de escoamento, provocando, tanto a queda das paredes laterais das canal<sup>u</sup>tas, como aumentando sua profundidade.

No horizonte de solo em que aparece a orientação da rocha matriz (saprolito), nota-se uma tendência das ravinas acompanharem essa orientação (observar parte inferior da foto 3).

#### - EROSÃO EM CANAIS PROFUNDOS OU VOÇOROCAS

É um estágio avançado da erosão por ravinamento. Dependendo de suas dimensões e forma, a aparência pode ser, de um buraco, uma caverna ou mesmo um canal profundo. Esta erosão pode assumir proporções tais, que venha a instabilizar grande parte de um maciço do solo ou então de um talude.

Observações feitas em taludes de corte em solo residual de gnaiss ao longo da BR-116, trecho Rio de Janeiro - São Paulo, mostram claras evidências de predominância deste tipo de erosão, no horizonte IC (saprolito) do perfil de intemperismo de solo residual (\*). Para ilustração, ver fotos 5, 6 e 7.

#### III.3 - ÁGUA COMO AGENTE EROSIVO

Apesar de serem a água e o vento os principais agentes causadores da erosão, vamos estudar apenas a ação da água que no nosso caso é o fator primordial.

A erosão pela água é a remoção e o transporte das partículas do solo, tanto pelo impacto das gotas (pingos de chuva), como pelo seu escoamento.

---

(\*) Classificação de Deere e Patton<sup>23</sup>



O escoamento das águas de chuva aparece como fator decisivo na erosão superficial. Sendo mantidas constantes todas as outras variáveis envolvidas na erosão dos solos, quanto maior o escoamento, maior será a energia disponível para proporcionar a erosão. Um estudo feito durante 8 anos, pelo serviço de conservação de água e solo dos Estados Unidos, em Carolina do Norte, mostra a variação do escoamento, em função da quantidade e da intensidade de chuva. Ver figura III.1. Segundo Wischmeier e Smith<sup>100</sup> figura III.2, quanto maior a intensidade da chuva, maior a energia disponível para iniciar a erosão.

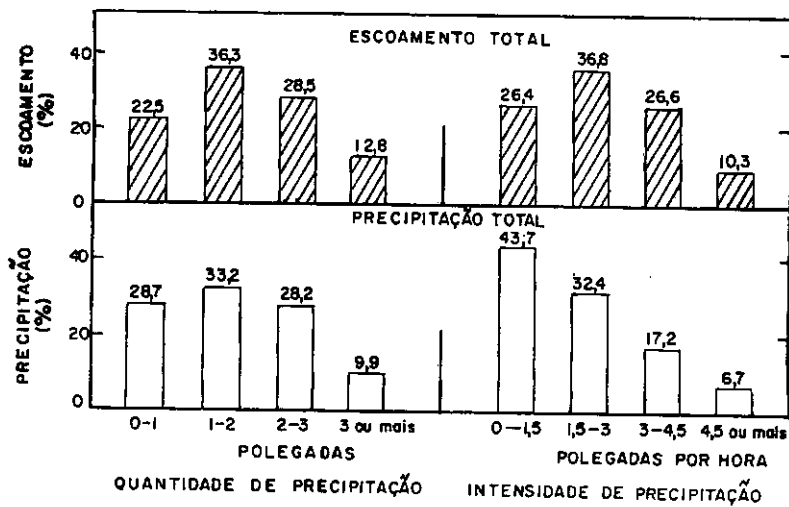


FIG. III.1 - RELAÇÃO ENTRE O ESCOAMENTO, A QUANTIDADE E A INTENSIDADE DA PRECIPITAÇÃO TOTAL. (COPIADO DA "REDRAW FROM NORTH CAROLINE AGR. EXP. STA. BULL. 347, 1944")

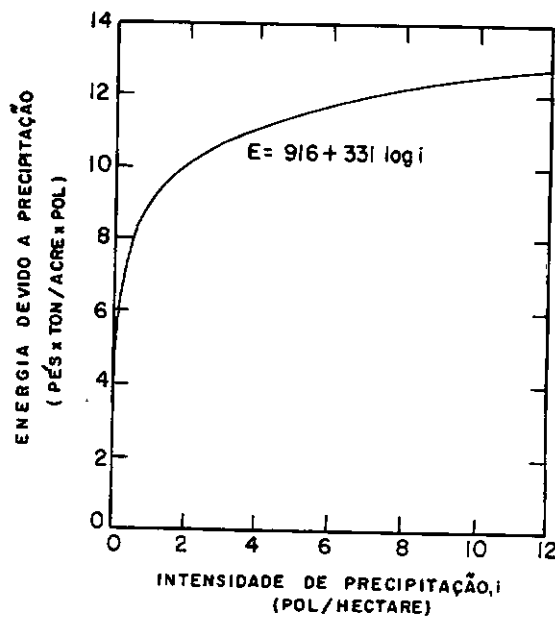


FIG. III.2-ENERGIA DEVIDO A PRECIPITAÇÃO (COPIADO DE WISCHMEIER AND SMITH, 1958)

Observações de campo (fotos 1 e 2) mostram que, em condições normais, os taludes começam a ser erodidos na sua parte inferior, onde a energia devido ao escoamento é maior que aquela da parte superior.

Além do escoamento, o pingo da chuva é outro fator importante na erosão. Primeiro porque sua ação se dá por igual em toda a área superficial do talude, segundo porque seu impacto tanto desagrega as partículas do solo como modifica o escoamento das águas de um regime laminar para um turbulento, tornando-o mais prejudicial à erosão. Citado por Schwab<sup>86</sup>, o impacto das gotas de chuva contra a superfície do solo pode jogar os grãos superficiais a uma distância de até 0,6m de altura, e 1,5m lateralmente do ponto de impacto da gota, obviamente dependendo do tamanho da gota e da partícula do solo.

#### - FATORES QUE AFETAM A EROSÃO PELA ÁGUA

É sabido que o escoamento é uma das principais causas da erosão do solo, portanto, tudo aquilo que o modifica o faz também na erosão.

São vários os fatores que influenciam a erosão pela água, a saber: clima, solo, cobertura vegetal e topografia. Destes fatores, o clima é o que mais foge ao controle do homem. Solo e topografia (geometria) podem em algumas oportunidades ser controlados. Já a vegetação pode ser integralmente controlada.

**CLIMA** - Contribui com a precipitação e sua intensidade para aumentar ou diminuir o volume e velocidade do escoamento, a temperatura e o vento nos efeitos da evaporação e transpiração. Convém ressaltar ainda que o vento pode alterar a velocidade e o ângulo de impacto das gotas.

**SOLO** - Influi através de suas propriedades físicas, tais como: estrutura, porosidade, permeabilidade, teor de matéria orgânica, etc. Estas propriedades afetam a capacidade de infiltração da água no solo, alterando o escoamento e consequentemente a erosão.

COBERTURA VEGETAL - É o fator decisivo no controle da erosão. Ela age de diversas maneiras, ou seja:

- a) aumentando a resistência do solo superficial, pela maior agregação das partículas, através das suas raízes;
- b) absorvendo os impactos das gotas, diminuindo sua ação erosiva;
- c) pela transpiração, diminuindo a umidade do solo e consequentemente aumentando-lhe a resistência;
- d) retardando a erosão pela diminuição da velocidade de escoamento.

Chama-se atenção, entretanto, para o fato de ser a vegetação dependente de vários outros fatores, como clima, solo, topografia, estações do ano, etc.

TOPOGRAFIA - Contribui com ângulo e altura dos taludes, tamanho e forma das bacias de contribuição.

#### III.4 - DESAGREGAÇÃO E TRANSPORTE DO MATERIAL SÓLIDO

Como já foi dito anteriormente, o processo erosivo caracteriza-se pela desagregação e transporte das partículas sólidas do solo. Schwab <sup>86</sup>, caracteriza a facilidade de desagregação e transporte das partículas do solo como desagregabilidade e transportabilidade, respectivamente. Estas características em geral, são funções do tamanho das partículas do solo. Quanto maior o tamanho das partículas, maior sua desagregabilidade, e quanto menor seu tamanho, maior sua transportabilidade. Em vista disto, pode-se dizer que as argilas são mais facilmente transportadas que as areias, e as areias mais facilmente desagregadas que as argilas. Ainda sobre isto, Nascimento <sup>61</sup>, relaciona a desagregabilidade (destacabilidade) com a coesão e a transportabilidade com a granulometria.

Considerando a erodibilidade apenas como um parâmetro do solo, várias têm sido as tentativas, no sentido de correlacionar

algumas das propriedades físicas e/ou químicas do solo, como um índice indicativo da sua susceptibilidade a erosão.

Peele<sup>73</sup> cita os trabalhos de Bennett (1926) que determinou que a relação sílica - sesquióxido dos solos de clima úmido tropical e úmido temperado, associava-se com sua resistência à erosão e de Middleton (1930), que investigou as propriedades físicas e químicas de diversos solos e concluiu que, aqueles resistentes à erosão, apresentavam baixa razão de dispersão, baixa razão sílica - sesquióxido e alta razão de colóides para umidade equivalente, (\*). Estes parâmetros são conhecidos como parâmetros de Middleton. André e Anderson<sup>7</sup>, em seu trabalho citam estudos feitos por Baver (1932) que concluiu ser a erodibilidade dos solos variável diretamente com a facilidade de dispersão e inversamente com a permeabilidade, agregação e tamanho das partículas. Mais recentemente, estudos conduzidos por Santos e Castro<sup>80</sup>, mostraram que entre as diversas propriedades dos solos, Expansibilidade (LNEC) (\*\*) e o parâmetro granulométrico a (\*\*\*), foram os mais indicativos no comportamento quanto à erosão dos solos por eles estudados. O trabalho concluiu que os solos com comportamento Bom ou Regular sob as ações erosivas apresentaram:

$$\text{Exp (E)} \leq 11\%$$

$$0,52 \leq a \leq 0,92$$

No processo erosivo, entretanto, as propriedades dos solos não são os únicos fatores a serem levados em consideração. De modo mais amplo, a abordagem da questão erodibilidade, deve levar em conta todos os fatores ou agentes envolvidos no processo. Esses fatores podem ser grupados da seguinte maneira:

a - agentes externos

b - agentes internos

---

(\*) - Umidade equivalente centrífuga é a umidade final de uma amostra de solo inicialmente saturada, submetida durante 10 minutos a uma força centrífuga igual a mil vezes a aceleração da gravidade (13).

(\*\*) - Vide bibliografia Nº 18.

(\*\*\*) - Vide bib. Nº 81 a =  $\frac{\%Y}{100n}$  onde Y é a percentagem dos grãos passando nas peneiras de nºs 7, 14, 25, 52, 100 e 200 da curva granulométrica, N é igual a 6.

No caso a estão a água, o vento, a gravidade e o gelo. Para a nossa Região a água é o fator mais importante. No caso b, está o próprio solo, ou mais precisamente, suas propriedades.

Analisando de forma geral os agentes a e b, conclui-se que, se por um lado os agentes externos causam a erosão, por outro lado, os agentes internos influenciam a capacidade de o solo resistir à erosão ou retardar os seus efeitos.

Difícil porém se torna a quantificação da erosão, quando se quer correlacionar todos os fatores que a influenciam. Em primeiro lugar e principalmente, devido à dificuldade e, às vezes, impossibilidade na obtenção de dados que traduzam com exatidão o seu grau de influência no processo erosivo. Depois, pelas interdependências entre os próprios agentes.

Pesquisas executadas por Smith e Wischmeier (1957, 1962) citados por Schwab<sup>86</sup>, os levaram a um modelo empírico de previsão de perda de solo (erosão) conhecida como Equação Universal de Perda de Solo, onde estão correlacionados os 6 fatores, que representam tanto os agentes internos quanto os externos. Esta equação, de maior uso na área da agricultura, é assim escrita:

$$E = K R L S C P \quad (3.1)$$

onde:

- E = perda de solo média anual (ton/acre)
- K = chamado fator de erodibilidade do solo, representa a influência do tipo de solo, expresso em ton/acre por unidade de R
- R = índice de erosividade EI, e representa o potencial erosivo da precipitação para uma dada chuva
- E = energia cinética da precipitação ( $\frac{\text{pé} \times \text{ton}}{\text{acre}}$ )
- I = intensidade máxima em 30 min (pol/hora)
- L e S = fatores adimensionais, que indicam os efeitos do comprimento (l) e inclinação (s) do talude respectivamente
- C = descreve a efetividade (tipo) de cobertura e téc

nicas de controle da área  
 P = prática de conservação do solo.

Segundo Wischmeier e Meyer<sup>105</sup>, a elaboração do modelo para previsão de perda de solo, derivou da análise estatística de dados sobre perda de solo e escoamento, coletados durante 40 anos pelo Serviço de Pesquisa de Agricultura do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e pelo Centro de Dados, da Universidade de Purdue. Ainda neste trabalho os autores citam, que os fatores K e LS presentes na equação, foram determinados empiricamente, para uma condição específica de Talude com comprimento  $l = 72,6$  pés e inclinação  $s = 9\%$ . Eles ainda discutem as limitações sofridas pelo modelo para previsão de perda de solo.

Visando a dar maior ênfase à erosão superficial sob o ponto de vista de Taludes de estrada, é importante um estudo mais detalhado da influência no processo erosivo do solo (propriedades), condições geométricas do talude e precipitações pluviométricas, para as nossas condições.



Foto 1 - Erosão por ravinamento com maior volume  
na parte média inferior do talude



Foto 2 - Erosão por ravinamento (estágio mais avan  
çado) com concentração na parte média in  
ferior do talude

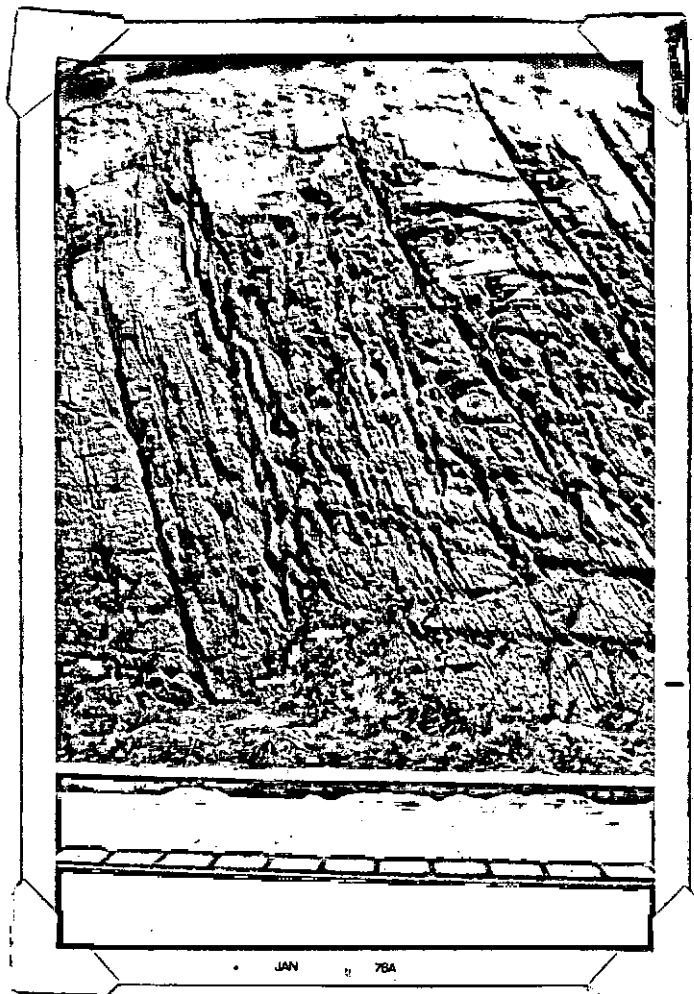


Foto 3 - Erosão por ravinamento, com as ravinas na direção da foliação da rocha matriz



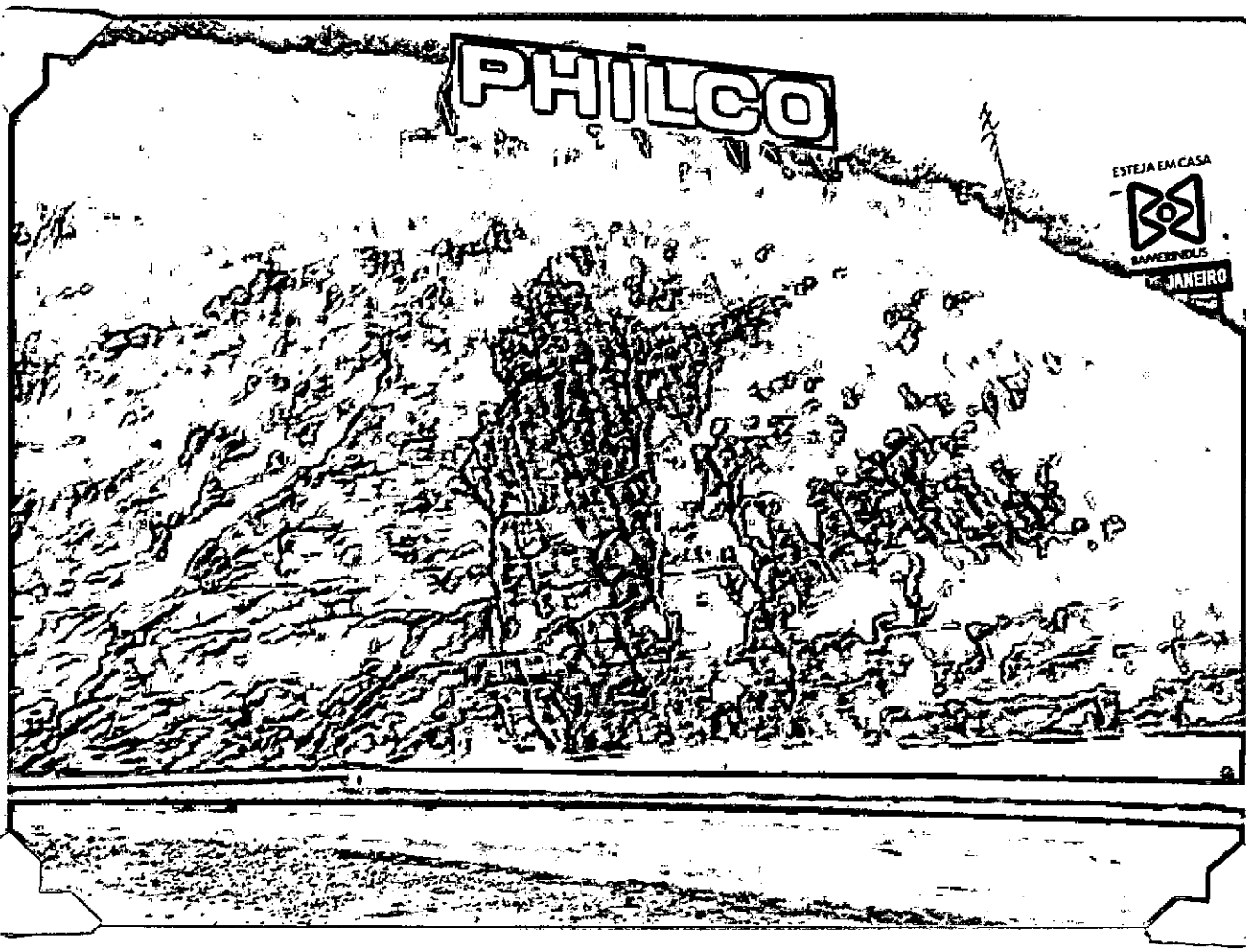


Foto 4 - Erosão por ravinamento ao longo  
de toda superfície do talude

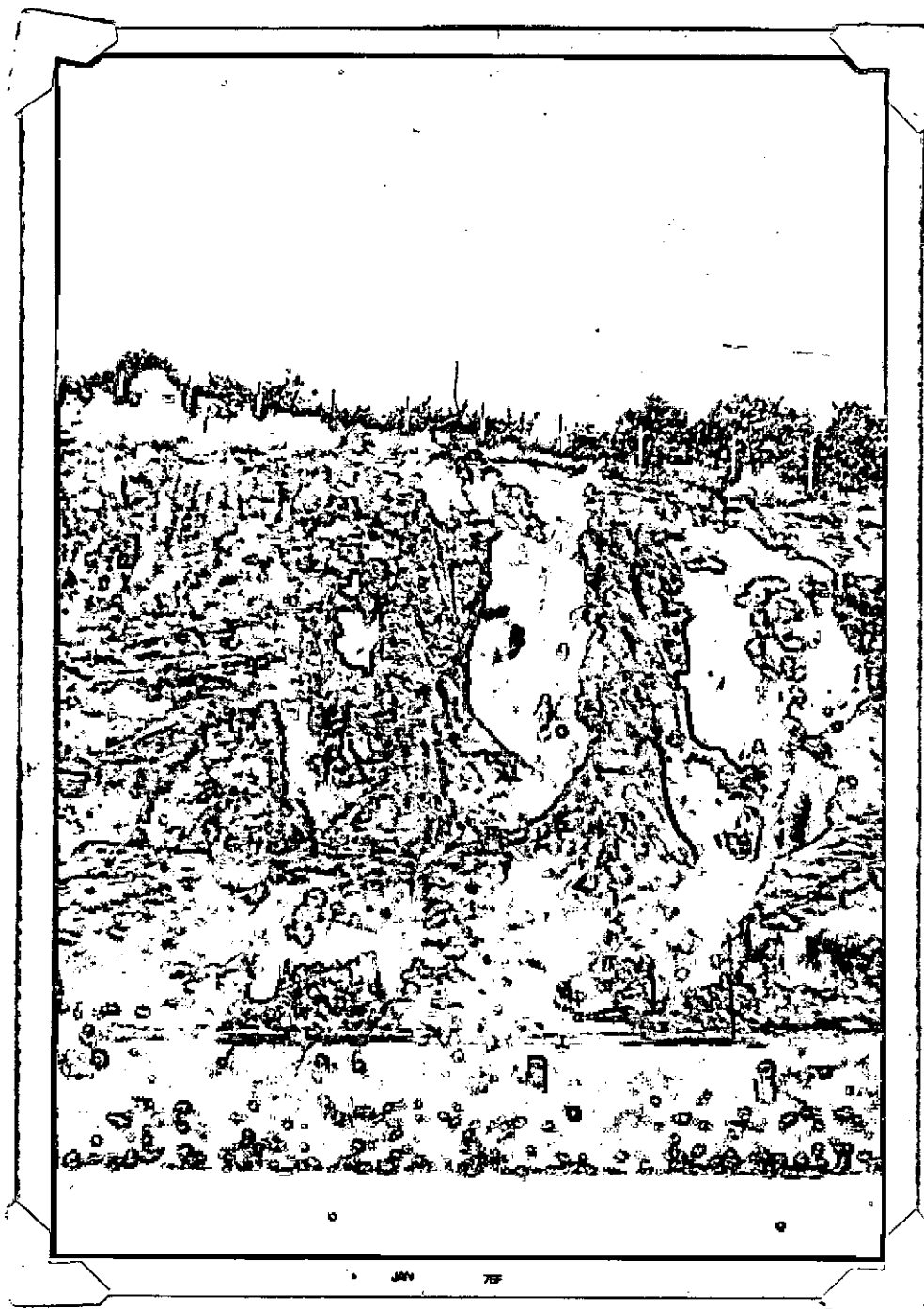


Foto 5 - Erosão por canais profundos ou voçorocas  
em toda altura do talude



Foto 6 - Erosão por canal profundo ou voçoroca em  
toda altura do talude



Foto 7 - Erosão por canal profundo ou voçoroca  
concentrada no horizonte IC



#### IV - ATIVIDADES DE CAMPO

##### IV.1 - PRELIMINARES

As atividades da pesquisa, para estudo da erosão, foram divididas em duas partes: uma de campo e outra de laboratório.

As atividades de campo constituíram-se inicialmente na escolha dos taludes que serviriam tanto para observações de erosão, como para instalação das áreas-teste e aparelhos para coleta de dados pluviométricos.

Os taludes previamente escolhidos para as citadas atividades eram em número de 6. Entretanto, devido a limitações de ordem financeira, este número foi reduzido para 2. Os taludes definitivamente selecionados localizam-se nos kms 25 e 29,5 respectivamente, da BR-116, Rio-São Paulo, Rodovia Presidente Dutra, ambos do lado esquerdo.

Nos talude citados, fez-se em primeiro lugar, os levantamentos topográficos e geológicos de superfície. Posteriormente executou-se o levantamento fotográfico, com o objetivo de permitir o acompanhamento futuro do desenvolvimento da erosão superficial ao longo do tempo.

No mês de janeiro de 1977, deu-se início aos trabalhos de instalação das Áreas-Teste. Estas áreas (executadas conforme projeto anexo, des.nº 1) têm por finalidade quantificar a erosão superficial dos solos nos taludes, sob as condições reais de clima, geometria, estrutura e estado de tensões. As instalações das áreas foram concluídas em março de 1977. Maiores detalhes destas áreas são vistos nas fotos 8 e 9.

Paralêlamente aos serviços citados, coletaram-se amostras indeformadas e amolgadas, para ensaios em laboratório.

#### IV.2 - LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS AMOSTRAS ENSAIA DAS

As amostras usadas nos ensaios de laboratório, foram coletadas nos taludes do km 25 lado direito e esquerdo e no talude do km 29,5 lado esquerdo. Estas amostras foram classificadas em função dos seus horizontes, no perfil de intemperismo do solo residual (\*), isto é:

- Colúvio - manto superior ao solo residual, transportado, ao que parece de pequena distância
- Horizonte I A - solo residual maduro do gnaiss
- Horizonte I B - solo da zona de transição entre o solo residual jovem e residual maduro
- Horizonte I C - solo residual jovem (saprolito)

Para os ensaios especiais (triaxiais UU e CU, cisalhamento direto lento e adensamento) e ensaio de erosão (Inderbitzen), extraíram-se amostras indeformadas na superfície dos taludes (blocos medindo 30 x 30 x 30cm aproximadamente) como se vê nas fotos 10 e 11. Nos mesmos locais de onde foram tirados os blocos, coletaram-se também amostras amolgadas para ensaios de caracterização (peso específico real dos grãos; limites de liquidez, plasticidade, contração e absorção e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação).

As características das amostras ensaiadas e os resultados dos ensaios especiais estão anotados nas tabelas IV.1 e IV.2, respectivamente.

---

(\*) Deere e Patton (23)

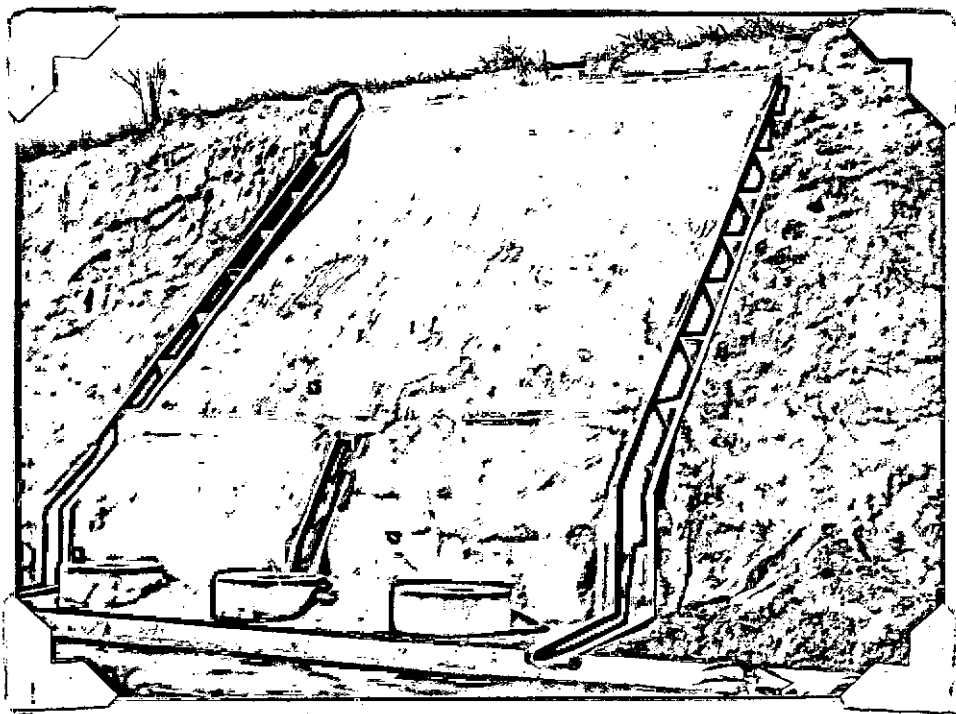


Foto 8 - Área-teste ( $AT_1$ ) - Instalada no talude  
do km 25 da BR-116, Rod. Pres. Dutra

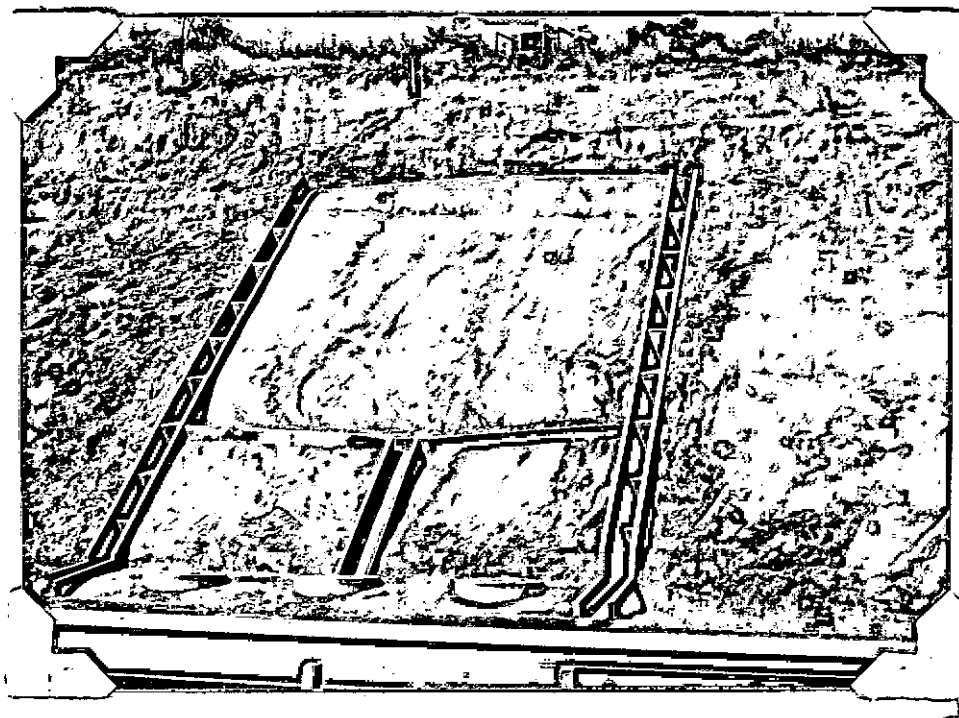


Foto 9 - Área-teste ( $AT_2$ ) - Instalada no talude  
do km 29,5 da BR-116, Rod. Pres. Dutra





Foto 10



Foto 11

Fotos 10 e 11 - Coleta de amostra indeformada (bloco) na superfície do talude.

# ENSAIO DE EROSÃO

CONDIÇÕES  
DO ENSAIO

H = 2,5  
α = 44°  
T = 24° C

H = ALTURA DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO

α = ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA RAMPA.

T = TEMPERATURA DA ÁGUA DO ENSAIO.

TIPO DE SOLO — COLÚVIO  
AMOSTRA — UMIDADE NATURAL

ANEL Nº 3

BASE Nº 2

CONDIÇÕES  
INICIAIS

PESO DA AMOSTRA+ANEL (g) — 2489,5  
UMIDADE DO SOLO (%) — 30,4  
DO PESO DO ANEL (g) — 1029,82  
ENSAIO PESO DO SOLO SECO (g) — 1119,39

CONDIÇÕES  
FINAIS

PESO DA AMOSTRA+ANEL+BASE (g) — 4750,2  
PESO DO ANEL+BASE (g) — 3255,82  
DO UMIDADE DO SOLO (%) — 34,4  
ENSAIO PESO DO SOLO SECO (g) — 1111,89

TEMPO (min)	PESO DO SOLO SECO + BECKER (g)	PESO DO BECKER (g)	PESO DO SOLO SECO PARCIAL (g)	PESO DO SOLO SECO TOTAL (g)	EROSÃO $E \times 10^3$ (g/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDADE DE EROSÃO (g/cm <sup>2</sup> /hora)	OBSERVAÇÕES
5	210,92	208,03	2,89	2,89	15,84	0,190	Km 25 — BR 116 DATA — 03/10/1977 INÍCIO — 13:33 1) EROSÃO UNIFORME EM TODO O ENSAIO.
15	188,26	187,79	0,47	3,36	18,42	0,074	
30	241,89	241,48	0,41	3,77	20,66	0,041	
60	251,19	250,09	1,1	4,87	26,69	0,027	
120	281,92	280,50	1,42	6,29	34,48	0,017	

TABELA IV: 2 - ENSAIOS ESPECIAIS

AMOSTRA	TRIAxIAL					CISALHAMENTO DIRETO								ADENSAMENTO						
	U.U.	C. U.				RÁPIDO						ADENS.		C <sub>c</sub>						
						S/ SUB.		C/ SUB S/ EXP		C/ SUB C/ EXP		LENTO		S/SUB	C/SUB	C/ SUBMERSÃO APÓS PRESSÕES (kg/cm <sup>2</sup> )				
		C	Ø	C	Ø											C	Ø	C	Ø	0,16
116-E-25-1 (0,80m) COLÚVIO	—	—	—	—	—	0,301	36,69°	0,125	28,45°	0,086	28,5°	—	—	0,277	—	—	0,236	0,228	—	0,29
116-E-25-1 (3,30m) I-A	—	—	—	—	—	0,27	28,5°	0,273	28,5°	0,28	25,8°	—	—	0,116	0,157	0,188	0,175	—	—	0,216
116-E-25-2 *	—	—	—	—	—	0,43	32,8°	0,04	29,4°	0,13	29,1°	—	—	0,523	0,418	0,441	0,457	0,474	0,423	0,502
116-E-25-3 I-B	0,844	—	—	—	—	0,652	37,4°	0,101	30,9°	0,151	30,34	—	—	—	0,139	—	—	—	—	—
116-E-25-6 I-B	0,487	0,387	15,25°	0,139	33,75°	—	—	—	—	—	—	0,013	30,45°	—	0,206	—	—	—	—	—
116-D-25-1 I-C	—	0,217	18,82°	0,108	36,14°	—	—	—	—	—	—	0,141	31,69°	—	0,229	—	—	—	—	—

OBS.: C e C' em kg/cm<sup>2</sup>

\* VARIAÇÃO LITOLÓGICA LOCAL.

**TABELA IV.1 - IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

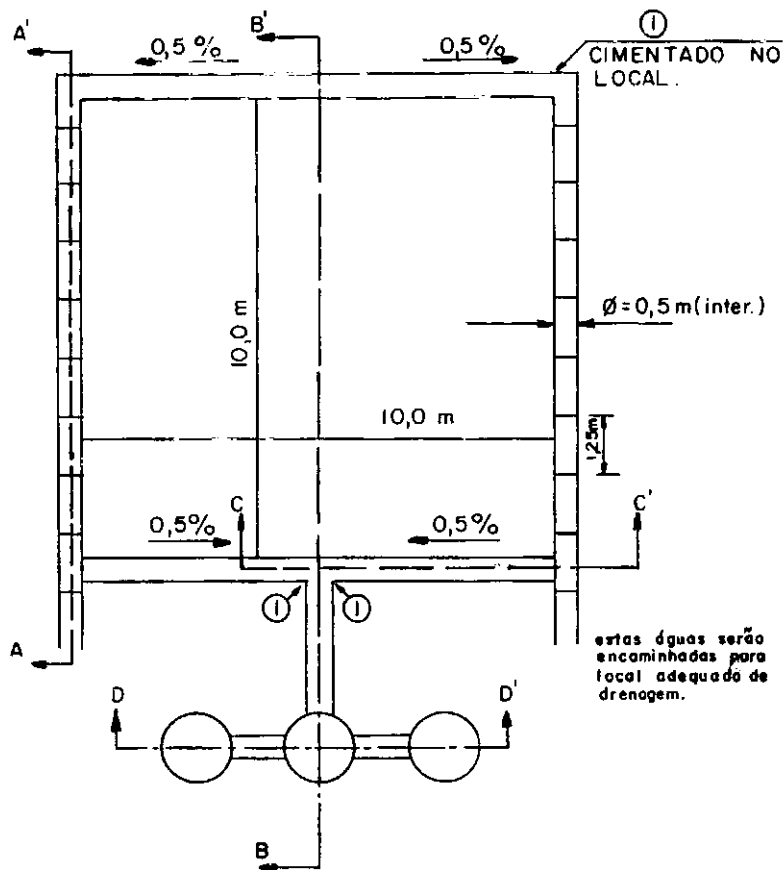
TIPO DE SOLO	$\delta$	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA									LIMITES DE CONSISTÊNCIA				UMIDADES (%)		LIMITE DE ABSORÇÃO		GRAU DE PETRIFICAÇÃO		EXPAN-SIBILIDADE(%)
		% PEDRE GULHO	% AREIA GROS.	% AREIA MEDIA	% AREIA FINA	% SILTE	% ARGILA	% MENOR QUE			L.L.	L.P.	I.P.	L.C.							
		2 mm * 10	0,42mm * 40	0,074mm * 200																	
COLÚVIO	2,73	0	1	20	24	5	50	99	79	58	61	32	29	25,6	22	36	36,1	46,2	1,0	0,55	6,0
I-A	2,76	4	3	22	16	8	47	93	71	55	63	37	26	27,5	21	29	35,3	47,0	0,82	0,59	12,1
I-B	2,83	0	1	2	36	25	36	99	97	68	63	44	19	32,8	11	30	44,1	44,7	0,68	0,73	15,0
I-C	2,71	7	17	22	21	15	18	76	54	36	42	N.P.	N.P.	27,2	18	34	57,2	60,0	0,60	0,46	9,7
( 1 )	2,68	0	4	8	28	19	41	95	88	63	48	25	23	22,3	-	-	-	50,0	-	0,43	14,0
( 2 )	2,69	0	2	25	36	17	20	98	73	41	39	32	7	32,7	-	-	-	58,8	-	0,55	8,0

(1) - MATERIAL ERODIDO DA ÁREA-TESTE DO TALUDE DO Km 25.

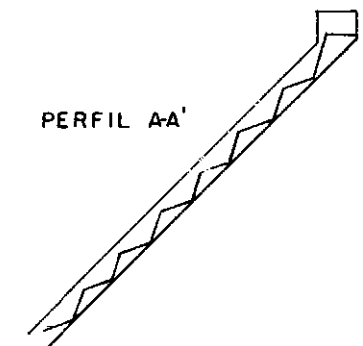
(2) - " " " " " " " " Km 29,5.

(\*) - EXPANSIBILIDADE - MÉTODO L.N.E.C.

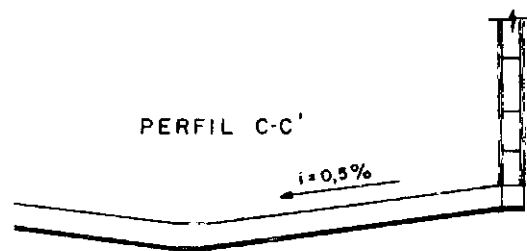
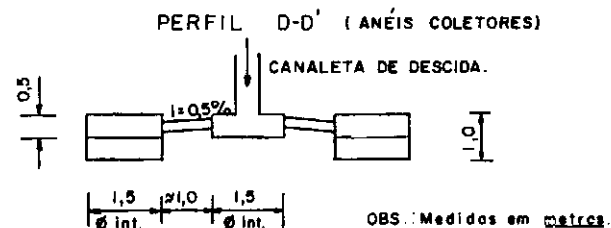
$h_0$  - UMIDADE TEÓRICA CALCULADA PARA UMA AMOSTRA INDEFORMADA SUPONDO O GRAU DE SATURAÇÃO  $S = 100\%$ .



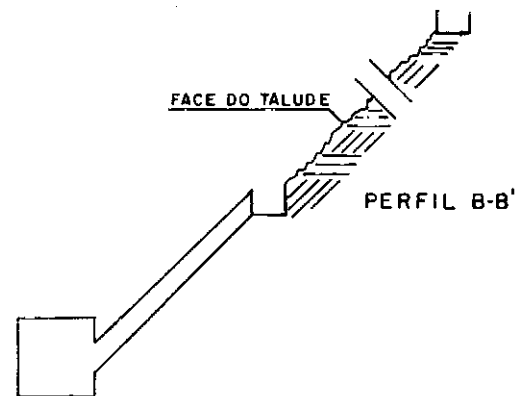
DES. nº 1  
 ÁREA-TESTE NO  
 TALUDE.



PERFIL A-A'



PERFIL C-C'



PERFIL B-B'



## V - ENSAIO DE EROÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

## V.1 - OBJETIVOS

A partir de observações feitas nos taludes de corte ao longo da BR-116, trecho do Estado do Rio, notou-se que os diversos horizontes de solo destes taludes erodem diferentemente, isto é: em um mesmo talude, cada horizonte apresenta forma e/ou quantidade de erosão diferente dos outros.

Os ensaios de erosão em laboratório (Inderbitzen) visaram a quantificar o grau de erosão de cada horizonte sob condições diversas de vazão, inclinação do topo da amostra e umidade do solo.

## V.2 - DESCRIÇÃO DO ENSAIO E EQUIPAMENTO USADO

O ensaio de erosão com a duração máxima de 2 horas, consiste em submeter-se uma amostra de solo de área conhecida, à ação de um escoamento de água superficial, com vazão controlada.

A perda de solo da amostra ensaiada depende dos seguintes fatores:

- Tipo do Solo
- Condições do Ensaio (vazão e inclinação da rampa)
- Condições do solo ( teor de umidade e grau de saturação e orientação em relação ao fluxo d'água).

O material carregado (erodido) da amostra pelo escoamento, é coletado em um conjunto de peneiras (X 30, 100, 200 e 380) nos tempos de 5, 15, 30, 60 e 120 minutos a contar do início do ensaio. O material coletado nas peneiras é transferido para beakers e posto na estufa a 110° C até peso constante. O peso do material seco acumulado, coletado nos respectivos tempos, é então correlacionado com a área da amostra, caracterizando-se aí a medida da erosão

$$\left[ \frac{\text{peso do solo seco (g)}}{\text{área superficial (cm}^2\text{)}} \right]$$

O equipamento de nome "INDERBITZEN" (\*) usado para o ensaio, é um plano inclinado com um furo central circular, preso em cantoneiras que possibilitam variar seu ângulo de inclinação. No furo coloca-se a amostra de solo a ser ensaiada, cuja superfície fica no mesmo nível que a do plano. Na parte superior da rampa, adaptou-se um reservatório que proporciona o fluxo da água na superfície do plano. A vazão é mantida constante durante cada ensaio. O equipamento é mostrado nas fotos 12 e 13. A amostra usada no ensaio de erosão tem as seguintes dimensões:

diâmetro - 15,24cm

altura - 4,60cm

Os ensaios executados foram em amostras indeformadas. Mas, o ensaio de erosão também pode ser executado em amostra compactada em cilindro CBR.

Uma metodologia com todas as fases para execução do ensaio, é apresentada no Apêndice I.

### V.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para os ensaios de erosão em laboratório, as variáveis consideradas foram em número de 4, a saber:

- 1 - Tipo de solo
- 2 - Ângulo de inclinação da rampa
- 3 - Vazão superficial
- 4 - Condições de umidade da amostra

Para cada tipo de solo, executou-se um conjunto de ensaios. Em cada ensaio, uma das variáveis foi modificada, enquanto as outras foram mantidas constantes. Isto possibilitou estudar a influência de cada uma delas, no processo erosivo.

---

(\*) Indérbitzen, A. L. (40)



Os resultados são apresentados nas Tabelas VI.1 a VI.6 e através de curvas Erosão x Tempo, figuras VI.1 a VI.9 e Velocidade de Erosão x Tempo, figuras VI.10 a VI.12.



## V.4 - APÊNDICE-ENSAIO DE EROSÃO - METODOLOGIA

Neste apêndice detalharemos a metodologia do ensaio de erosão. Esta metodologia constará de 3 partes, a saber:

- Equipamentos
- Preparação da amostra
- Execução do ensaio

## 1 - EQUIPAMENTOS

Os equipamentos necessários para a execução dos ensaios, são os seguintes:

## ESPECIAL

- a - Aparelho para ensaio de erosão (Inderbitzen ou Erosômetro)

## ACESSÓRIOS

- a - 2 conjuntos de peneiras de nºs ~~30~~ 30, 100, 200 e 380
- b - 5 beakers de 1000ml cada
- c - 2 baldes (latas) de aproximadamente 22cm de altura e 22cm de diâmetro
- d - estufa regulável devendo ir no mínimo até 110°C
- e - plástico medindo aproximadamente 40cm de largura e 70 cm de comprimento

## 2 - PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

Inicialmente verificar as condições da amostra e anotar as suas características como: procedência, classificação visual e se é indeformada ou compactada. Após providenciar para que o

anel e a base a serem usados no ensaio estejam tarados e anotados, seguir os diversos passos:

- a - moldar a amostra no anel, de modo que sua superfície fique na mesma altura que a parede do anel
- b - pesar e anotar anel + amostra
- c - tirar umidade do material usado na moldagem
- d - colocar o anel + amostra e base no aparelho do ensaio (Inderbitzen)
- e - cobrir a superfície do plano inclinado do aparelho e da amostra com plástico
- f - botar o jogo de peneiras na posição de coletar o material erodido
- g - encher o reservatório até o nível desejado e mantê-lo constante
- h - anotar a hora, retirar o plástico da superfície.  
Tem-se início o ensaio de Erosão.

### 3 - EXECUÇÃO DO ENSAIO

Começado o ensaio prepara-se o 2º conjunto de peneiras, para substituir aquele que está coletando o material erodido. Aos 5 minutos do início do ensaio faz-se a 1ª troca das peneiras. O conjunto recolhido é lavado no balde com água e preparado para a nova troca que se repete aos 15, 30, 60 e 120 minutos. A medida que as peneiras vão sendo lavadas no balde, esse material recolhido é transferido com a água para os respectivos beakers. Após o término do ensaio, os beakers são postos na estufa a 110°C até peso constante. Depois de seco, o becker + solo é pesado e através da diferença entre esse peso e o peso do becker, tem-se o peso do solo seco.

Com 2 horas de ensaio fecha-se a torneira que alimenta o reservatório, retira-se o conjunto de peneiras e o ensaio é dado

por encerrado.

Retira-se a amostra do equipamento, pesa-se amostra + anel + base, anotando em seguida. Finalmente, tira-se a unidade da amostra de solo após o ensaio.

- Obs.: (1) - Durante o ensaio deve-se anotar qualquer anormalidade ou mesmo ocorrência que mereça registro.
- (2) - Medir e anotar a largura da lâmina d'água no centro da amostra.
- (3) - Caso o ensaio seja realizado com a amostra, pré-saturada ou pré-secada, deve-se anotar a hora em que a amostra foi embebida ou posta ao ressecamento e a temperatura da estufa para o 2º caso.
- (4) - Ver, a seguir, folha usada na execução do ensaio.

# ENSAIO DE EROSÃO

CONDIÇÕES  
DO ENSAIO

H = 2,5  
α = 44°  
T = 24°C

H = ALTURA DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO

α = ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA RAMPA.

T = TEMPERATURA DA ÁGUA DO ENSAIO.

TIPO DE SOLO — COLÚVIO  
AMOSTRA — UMIDADE NATURAL

ANEL Nº 3

BASE Nº 2

CONDIÇÕES  
INICIAIS

PESO DA AMOSTRA + ANEL (g) — 2489,5  
UMIDADE DO SOLO (%) — 30,4  
DO PESO DO ANEL (g) — 1029,82  
ENSAIO PESO DO SOLO SECO (g) — 1119,39

CONDIÇÕES  
FINAIS

PESO DA AMOSTRA + ANEL + BASE (g) — 4750,2  
PESO DO ANEL + BASE (g) — 3255,82  
DO UMIDADE DO SOLO (%) — 34,4  
ENSAIO PESO DO SOLO SECO (g) — 1111,89

TEMPO (min)	PESO DO SOLO SECO + BECKER (g)	PESO DO BECKER (g)	PESO DO SOLO SECO PARCIAL (g)	PESO DO SOLO SECO TOTAL (g)	EROSÃO $E \times 10^3$ (g/cm <sup>2</sup> )	VELOCIDADE DE EROSÃO (g/cm <sup>2</sup> /hora)	OBSERVAÇÕES
5	210,92	208,03	2,89	2,89	15,84	0,190	Km 25 — BR 116 DATA — 03/10/1977 INÍCIO — 13:33 1) EROSÃO UNIFORME EM TODO O ENSAIO.
15	188,26	187,79	0,47	3,36	18,42	0,074	
30	241,89	241,48	0,41	3,77	20,66	0,041	
60	251,19	250,09	1,1	4,87	26,63	0,027	
120	281,92	280,50	1,42	6,29	34,48	0,017	

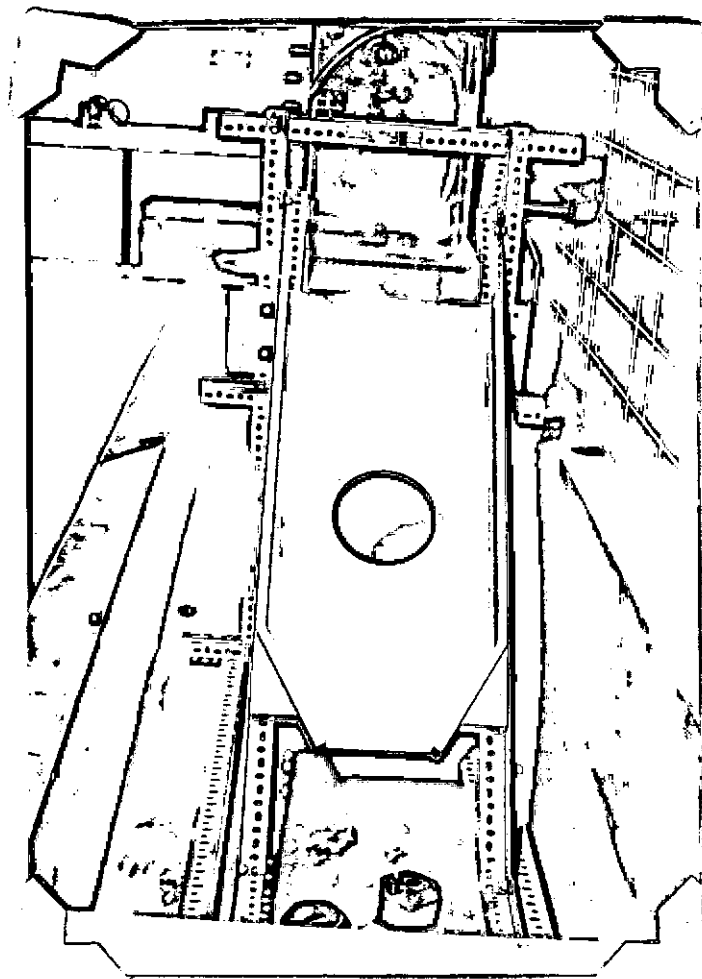


Foto 12

Aparelho para ensaio  
de erosão "Inderbitzen"

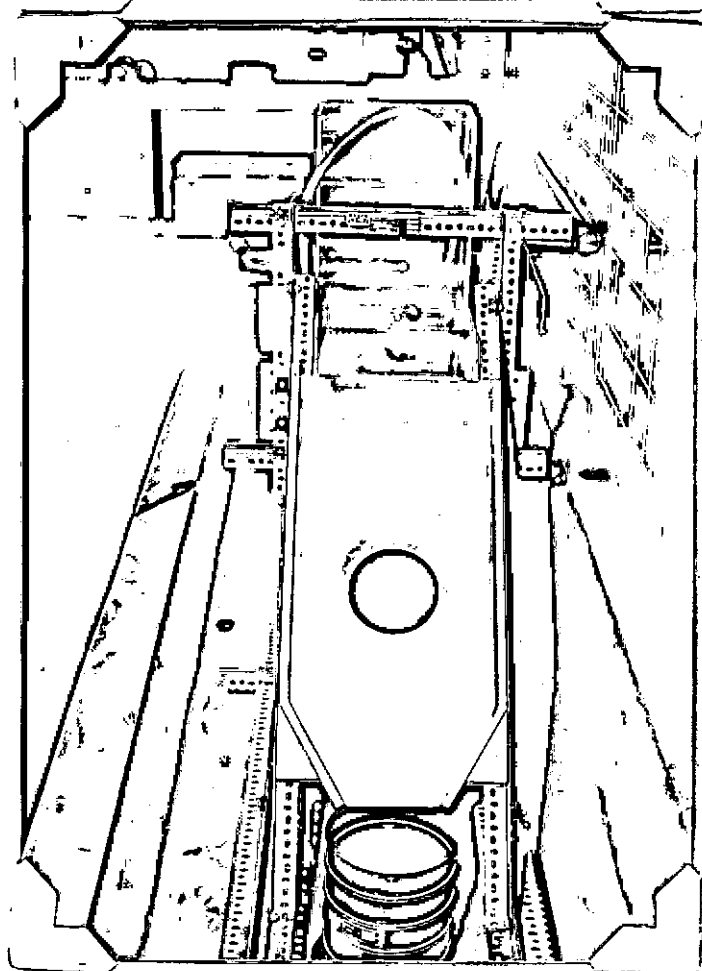


Foto 13

Idem foto 12 com  
amostra e conjunto  
de peneiras





## VI - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### VI.1 - GENERALIDADES

Conforme já dito anteriormente, os ensaios foram executados tanto com o objetivo de comparar as erosões relativas dos diferentes horizontes do solo, como de verificar a influência da vazão, condições de umidade da amostra e ângulo de inclinação da rampa na erosão destes mesmos solos.

Quatro tipos de solos foram ensaiados: Colúvio (manto superficial) e solos residuais dos horizontes IA, IB e IC (saprolito).

Duas inclinações de rampa foram adotadas:  $44^{\circ}$  e  $59^{\circ}$ .

As amostras foram ensaiadas sob três condições distintas de umidade: no estado natural, após embebição e após ressecamento em estufa a  $50^{\circ}$ .

Para um mesmo conjunto de condição de amostra e de ensaio, duas ou mais vazões foram utilizadas.

A combinação de tais variáveis levou à realização de número de ensaios, superior a 50.

### VI.2 - ANÁLISE DOS ENSAIOS DE EROSÃO COMO UM TODO

A análise dos resultados dos ensaios de erosão é feita através das curvas Erosão x Tempo e Velocidade de Erosão x Tempo. Estas curvas mostram características comuns para os horizontes: Colúvio, IA e IB (figs. VI.7 a VI.12). O horizonte IC (saprolito), comportou-se de forma totalmente diferente da dos outros três. De uma maneira geral, a erosão em laboratório dos três primeiros horizontes, pode ser resumida em 3 estágios:

1º Estágio: Primeiros 5 minutos de ensaio. Ocorre: acima de 50% (média 58%) da erosão total em 2 horas (tabelas VI.5 e VI.6)

2º Estágio: Período entre 5 e 60 minutos do ensaio. A ero

são desse estágio somada ao 1º ultrapassa os 85% (média 90%) da erosão total

3º Estágio: Última hora do ensaio, na qual se dá o restante da erosão.

Estes estágios podem ser assim explicados: no primeiro, a erosão ocorre com alta velocidade, devido provavelmente ao fato de a resistência ao carreamento das partículas mais superficiais ter sido afetada pela moldagem do corpo-de-prova, provocando maior facilidade de desagregação e transporte dessas partículas nos instantes iniciais do ensaio.

No 2º estágio, verifica-se que a quantidade de material erodido decresce com o tempo, acarretando uma queda brusca na velocidade de erosão entre o início e o final do período.

No último estágio, nota-se que a erosão tende a estabilizar com o tempo, ou seja, a velocidade diminui muito pouco chegando mesmo a ficar constante em alguns ensaios (vide gráficos VI.10 a VI.12).

As amostras do horizonte IC, quando ensaiadas nas mesmas condições de moldagem dos demais solos foram totalmente erodidas nos 5 primeiros minutos do ensaio. A altíssima velocidade de erosão verificada, caracteriza uma ausência de coesão entre as partículas e uma resistência praticamente nula contra a ação do escoamento superficial. Um comportamento inteiramente oposto daquele acima discutido foi verificado ainda no horizonte IC, quando ensaiada uma amostra nas condições naturais, que continha uma camada de matéria orgânica (limo) em sua superfície. Tal amostra não sofreu praticamente erosão alguma durante todo o ensaio. A camada de matéria orgânica (limo) atua como uma superfície selante, que impede o contato direto do escoamento com as partículas do solo, e consequentemente evita que a tensão hidráulica exerça sua ação erosiva sobre o saprolito.

Comparando-se a análise da erosão em laboratório com a erosão real de campo, presume-se que o enfraquecimento da resistência das partículas superficiais devido à moldagem do corpo-de-prova, pode ser comparado àquele ocorrido no campo devido ao

ressecamento, ou melhor, ao ciclo molhagem-secagem a que o solo "in situ" está sujeito.

Quanto ao horizonte IC no campo, ele aparece quase sempre recoberto com uma fina camada de matéria orgânica (limo), que o protege contra a erosão. Entretanto, quando este solo aparece desprotegido (sem a camada de limo), a sua erosão é bem maior do que aquela que ocorre nos outros horizontes, confirmando sua falta de resistência contra a erosão constatada nos ensaios de laboratório.

### VI.3 - ANÁLISE DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM A EROSÃO

#### VI.3.1 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO NA EROSÃO

Neste item procurar-se-á analisar a erosão de cada tipo de solo estudado, mostrando suas tendências e variações.

Pelos resultados dos ensaios de erosão (tabelas VI.1 a VI.4) e gráficos VI.1 a VI.4), nota-se que o comportamento de cada solo em relação aos outros, é diferente para cada condição de umidade dos corpos-de-prova.

Na umidade natural o Colúvio registrou a menor perda. Sua erosão ficou na faixa de  $30 \times 10^{-3}$  a  $270 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ . Em ordem crescente seguiram-se os horizontes IA e IB. Para o primeiro (IA), a variação na erosão foi de  $100 \times 10^{-3}$  a  $450 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ . Para o segundo (IB), os valores mínimos e máximos da erosão foram  $100 \times 10^{-3}$  e  $5500 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  respectivamente.

Na condição de após ressecamento, o Colúvio que tinha no caso anterior apresentado a menor perda, passou a ter erodibilidade da mesma ordem de grandeza da do horizonte IB e superior a do IA.

A variação na erosão do Colúvio foi de  $500 \times 10^{-3}$  a  $2300 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  e do horizonte IB de  $300 \times 10^{-3}$  a  $2800 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  a proximadamente.

Para esta condição de umidade, o horizonte IA, além de ter apresentado a menor perda entre os 3 solos, caracterizou-se

também pela menor faixa de variação nos valores da erosão (de  $200 \times 10^{-3}$  a  $700 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ , aproximadamente).

Observou-se ainda que um ensaio apresentou o resultado em torno de  $90 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ , divergindo totalmente dos demais. Este ensaio será discutido no item VI.3.3.

Com as amostras ensaiadas na condição de embebição prévia, voltou-se a constatar novas tendências dos 3 tipos de solos.

O horizonte IA foi o que registrou menor erosão. Dos 4 ensaios executados neste horizonte, 3 apresentaram um valor médio de erosão em torno de  $35 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  e o 4º um valor quase 20 vezes maior do que a média dos outros. Este último resultado foi considerado atípico e sua provável causa é discutida no item VI.3.3.

No Colúvio executaram-se somente 2 ensaios na condição de após embebição. As perdas registradas nesses ensaios, proporcionaram valores de erosão maiores que os registrados no horizonte IA e menores do que os do horizonte IB. Os dois valores de erosão foram de aproximadamente  $100 \times 10^{-3}$  e  $300 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ .

O horizonte IB foi o que apresentou maior erosão para esta condição de umidade, atingindo valores aproximados entre  $2100 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  e  $3200 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ . Os valores exatos da erosão e suas variações estão registrados nas tabelas VI.1 a VI.4.

Dois fatos observados nas amostras do Colúvio e nas amostras do horizonte IB, merecem registro.

O primeiro ocorreu com todos os corpos-de-prova do Colúvio que foram submetidos ao ressecamento prévio. Eles apresentavam maior contração do que as amostras dos outros solos nas mesmas condições.

O segundo fato ocorreu com as amostras do horizonte IB que foram levadas a pré-embebição. Expandiram cerca de 20% em suas alturas iniciais, o que não foi observado nas amostras dos outros solos submetidas às mesmas condições.

O primeiro caso talvez explique o fato de o Colúvio ter erodido 5 a 16 vezes mais na condição de após ressecamento do que na umidade natural.

A elevada expansibilidade observada nas amostras de IB, é provavelmente a causa dos altos valores da erosão (superiores a  $2000 \times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ ), nas amostras ensaiadas na condição de após embebição.

### VI.3.2 - INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DA INCLINAÇÃO DA RAMPA NA EROSIÃO

A programação inicial dos ensaios previa que as vazões a serem adotadas, seriam de  $Q = 173 \text{cm}^3/\text{seg}$  ( $H = 2,5 \text{cm}$ ) (\*) e  $Q = 254 \text{cm}^3/\text{seg}$  ( $H = 5,0 \text{cm}$ ) (\*\*). Após a execução de alguns ensaios, notadamente no Colúvio e no horizonte IB, observou-se que a erosão de um mesmo tipo de solo quase não sofria variação com qualquer das duas vazões citadas, o que pode ser comprovado no gráfico VI.5.

Em função do acima exposto, passou-se a adotar as vazões  $Q_1 = 173 \text{cm}^3/\text{seg}$  e  $Q_2 = 314 \text{cm}^3/\text{seg}$  ( $H = 7,5 \text{cm}$ ).

Os resultados dos ensaios de erosão mostram que de modo geral os solos ensaiados apresentam a mesma tendência, no que se refere à variação de vazão, o que pode ser constatado na tabela 5.

Resumindo, podemos afirmar que sendo mantidas constantes todas as outras variáveis, a Erosão cresce com o aumento da Vazão.

No Colúvio observaram-se acréscimos na erosão de até 8 vezes ao se passar da vazão  $Q_1$  para a vazão  $Q_2$ .

(\*) a)  $H$  - altura de água no reservatório de Inderbitzen para proporcionar a vazões  $Q$ .

(\*\*) b)  $Q = 173 \text{cm}^3/\text{seg} \longrightarrow V = 94 \text{cm}/\text{seg}$

$Q = 254 \text{cm}^3/\text{seg} \longrightarrow V = 150 \text{cm}/\text{seg}$

$Q = 314 \text{cm}^3/\text{seg} \longrightarrow V = 187 \text{cm}/\text{seg}$

$V$  = Velocidade do fluxo da água determinada experimentalmente com bolas de isopor ( $\phi \sim 2 \text{mm}$ ).

Para o horizonte IA o aumento verificado nos ensaios considerados típicos foi de até 4 vezes, aproximadamente. Dois ensaios, entretanto, não puderam ter seus resultados comparados com os dos ensaios sob idênticas condições de umidade e inclinações de rampa, porque seus valores divergiam totalmente dos demais. Esses 2 ensaios que apresentaram resultados atípicos são discutidos no item VI.3.3.

O horizonte IB apresentou variação crescente nos valores da erosão de até 13 vezes. Dois resultados de ensaios porém, mostraram tendência oposta àquela até então observada; isto é, a amostra ensaiada com a vazão  $Q_1$  erodiu aproximadamente 2 vezes mais do que o corpo-de-prova ensaiado com a vazão  $Q_2$ . Ambas as amostras foram ensaiadas na umidade natural e com o ângulo de inclinação da rampa  $\alpha = 59^\circ$ .

A provável explicação para o comportamento diferente dessas duas amostras, deve estar ligada à heterogeneidade apresentada pelo solo IB. Isto é, o horizonte IB por ser uma zona de transição entre o solo residual maduro (Horizonte IA) e o residual jovem (Horizonte IC ou saprolito), acarretou diversidade de composição granulométrica e de limites de Atterberg como pode ser comprovado na fig. VI.13.

Outro fato que merece registro, é a grande dispersão observada nos resultados dos ensaios do horizonte IB. É possível que este fato esteja ligado à explicação dada no parágrafo anterior.

### VI.3.3 - INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DA AMOSTRA NA EROSÃO

Os resultados dos ensaios indicaram que o Colúvio e os Horizontes IA e IB, tiveram comportamentos distintos para as condições de umidade a que foram submetidos. Para melhor entendimento vamos analisar cada solo separadamente.

Colúvio - Para os 4 tipos de ensaios ( $\alpha = 44$  e  $59^\circ$ ;  $Q = 173$  e  $314 \text{ cm}^3/\text{seg}$ ), observou-se uma única tendência. As amostras ensaiadas na umidade natural e após embebição registraram praticamente a mesma perda para ensaios semelhantes. Para a vazão  $Q_1$ , o valor da erosão foi em torno de  $100 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  e para a vazão  $Q_2$  este valor foi de  $250 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ , aproximadamente.

Na condição de pré-resssecamento, os corpos-de-prova sofreram maior perda do que as amostras ensaiadas nas outras umidades. Seus valores de erosão foram 5 a 16 vezes maiores do que os registrados com amostras na umidade natural e 5 a 13 vezes maiores do que os de amostras submetidas a Embebição Prévia. Todas estas variações estão anotadas nas tabelas VI.3 e VI.4.

Horizonte IA - Para os ensaios com  $\alpha = 44^\circ$  e  $Q = 173 \text{ cm}^3/\text{seg}$  e  $\alpha = 59^\circ$  e  $Q = 314 \text{ cm}^3/\text{seg}$ , a variação de erodibilidade com as condições de umidade dos corpos-de-prova seguiu a mesma tendência.

As amostras submetidas a embebição prévia apresentaram os menores valores de erosão. Sua variação ficou entre  $30 \times 10^{-3}$  e  $40 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ . Em seguida vieram os corpos-de-prova na umidade natural; seus valores de erosão foram aproximadamente 3 a 11 vezes maiores que os registrados no caso anterior.

Finalmente, as amostras com pré-resssecamento acusaram perdas 8 a 20 vezes superior às verificadas na condição de após embebição.

No ensaio com  $\alpha = 44^\circ$  e  $Q = 134 \text{ cm}^3/\text{seg}$ ; observou-se um outro comportamento que pode ser considerado atípico. O corpo-de-prova ensaiado após embebição foi o que apresentou maior perda. Em ordem decrescente vieram as amostras ensaiadas na umidade natural e após ressecamento. A erosão ( $360 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ) do corpo-de-prova na umidade natural está dentro da faixa dos resultados admitidos como típicos. Para as outras duas condições (após embebição e após ressecamento) não se pode dizer o mesmo.

A amostra ensaiada com embebição prévia, apresentou, logo nos primeiros minutos de ensaio, a erosão de uma camada de aproximadamente 0,5cm de espessura, o que pode evidenciar uma determinada zona de fraqueza no corpo-de-prova. Este fato provavelmente

te explica porque sua erosão ( $590 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ) foi 18 vezes maior do que a média verificada nas outras amostras testadas em idêntica condição de umidade.

O corpo-de-prova submetido ao ressecamento prévio, não apresentou durante o ensaio nenhum fato que possa explicar o valor de sua erosão ( $94 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$ ), aproximadamente a metade do mínimo observado nos outros corpos-de-prova ensaiados nesta condição.

Horizonte IB - neste solo não houve uma tendência definida para a erosão entre as 3 condições de umidade.

Quando compararmos a erosão dos corpos-de-prova ensaiados na umidade natural, com os ensaiados na condição de após ressecamento, observamos que seus valores tanto aumentaram (até 3 vezes) como diminuíram (até 8 vezes).

O mesmo comportamento foi verificado quando comparamos as perdas sofridas pelas amostras na umidade natural com as perdas registradas nas amostras submetidas a embebição prévia. Entretanto, as variações observadas para este caso foram diferentes das do caso anterior. O aumento no valor da erosão foi de aproximadamente 30 vezes, enquanto a diminuição chegou próxima de 3.

Comparando-se a erosão dos corpos-de-prova para as condições de após ressecamento e após embebição, constatam-se que aqueles submetidos ao segundo caso (após embebição) erodiram até 10 vezes mais do que os do primeiro caso (após ressecamento).

Para concluir este item vamos tentar sintetizar as tendências de cada solo, em relação a sua erosão.

O Colúvio apresentou valores de erosão nas condições de umidade natural e após embebição praticamente iguais, enquanto na condição de pré-ressecamento seus valores foram bem maiores.

O horizonte IA erodiu em ordem crescente para as condições de após embebição, umidade natural e após ressecamento.



Para o Horizonte IB, constatou-se que a erosão na condição de após embebição foi maior do que na condição de após ressecamento. Quanto à erosão na umidade natural não se observou tendência definida. Isto se deve provavelmente a heterogeneidade desse solo, o que foi mostrada no item VI.3.2.

#### VI.3.4 - INFLUÊNCIA SOBRE A EROSÃO DO CICLO ENSAIO-SECA- GEM-ENSAIO

Os ensaios executados em amostras já anteriormente ensaiadas objetivaram o conhecimento do comportamento com relação à erosão dos corpos-de-prova submetidos a um segundo ensaio idêntico ao primeiro. Entre os dois ensaios, as amostras foram colocadas ao ar livre durante 36 horas, para que se processasse a perda de umidade (secagem).

Este ciclo de ensaios foi realizado em amostras do solo Colúvio e do Horizonte IA.

No Colúvio fez-se esta experiência em uma única amostra. A erosão registrada no segundo ensaio foi aproximadamente 8 vezes maior do que a erosão no primeiro ensaio e cerca de 25% a mais que a erosão de uma amostra submetida às mesmas condições de ensaio, secagem prévia, mas que não havia sido previamente ensaiada. Ver detalhes na figura VI.14.

Para o Horizonte IA, o ciclo de ensaios foi feito em 2 amostras. Ambas mostraram a mesma tendência observada com o Colúvio.

Comparando-se os valores da erosão das amostras no segundo ensaio com os valores registrados no primeiro, observaram-se que houve aumentos aproximados de 7 vezes em uma amostra e de 5 vezes na outra.

Com relação à erosão das amostras submetidas a ensaios idênticos (secagem prévia), mas que não tinham sido anteriormente ensaiadas, os aumentos foram de 6 e 2 vezes, respectivamente.

As curvas correspondentes aos ensaios analisados encontram-se na figura VI.15.

Para finalizar este tópico, conclui-se que para os solos estudados, o processo de secagem ao ar livre das amostras ensaiadas, é prejudicial a sua resistência à erosão.

### VI.3.5 - VAZÃO CRÍTICA DE ENSAIO PARA A EROSÃO DOS SOLOS E SUA DETERMINAÇÃO

Através de observações feitas durante a realização dos ensaios de erosão, notou-se existir uma determinada vazão de ensaio para cada solo acima da qual um pequeno incremento em seu valor acarreta uma variação relativamente grande na erosão. Esta vazão foi chamada de Vazão Crítica.

Nas figuras VI.16, VI.17 e VI.18, plotaram-se valores de Erosão x Vazão. Cada gráfico é formado por 2 segmentos de retas com inclinação diferentes. O ponto de interseção desses 2 segmentos de retas caracteriza a Vazão Crítica de ensaio para cada solo.

Para determinação da vazão crítica de ensaio nos solos testados, executaram-se ensaios com vazões que variaram desde  $59 \text{ cm}^3/\text{seg}$  até  $314 \text{ cm}^3/\text{seg}$ .

As vazões críticas de ensaio do colúvio e do horizonte IA podem ser tiradas na figura VI.16 e na figura VI.17, respectivamente. Os valores encontrados foram de  $278 \text{ cm}^3/\text{seg}$  para o colúvio e  $226 \text{ cm}^3/\text{seg}$  para o horizonte IA.

Para o horizonte IB a vazão crítica de ensaio não pode ser determinada, porque os resultados dos testes apresentaram grande dispersão, o que pode ser comprovado na figura VI.18.

Chama-se atenção de que todos os ensaios executados para a determinação de vazão crítica, foram em amostra na umidade natural e com ângulo de inclinação da rampa de  $44^\circ$ .

TABELA VI. 1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE EROSÃO.

SÉRIES	TIPO DE SOLO	EROSÃO x 10 <sup>3</sup> - Q <sub>1</sub> = 173 (cm <sup>3</sup> /seg)			EROSÃO x 10 <sup>3</sup> - Q <sub>2</sub> = 314 (cm <sup>3</sup> /seg)		
		h <sub>nat</sub>	APÓS EMBEB.	APÓS RESSEC.	h <sub>nat</sub>	APÓS EMBEB.	APÓS RESSEC.
I α = 44°	COLÚVIO	33,71	—	538,77	273,39	—	2301,73
	I - A	107,06	36,89	290,99	363,40	590,08 <sup>(1)</sup>	94,78 <sup>(1)</sup>
	I - B	112,82	3267,72	317,02	1500,37	—	2759,92
II α = 59°	COLÚVIO	146,64	98,29	1260,09	259,19	280,08	1411,29
	I - A	162,63	35,14	196,36	417,51	36,54	737,93
	I - B	5563,64	2091,50	706,14	3122,28	2418,28	2255,46

(1) - RESULTADOS CONSIDERADOS ATÍPICOS.  
EROSÃO EM g/cm<sup>2</sup>

TABELA VI. 2 - RESULTADOS COMPLEMENTARES USADOS NA DETERMINAÇÃO DA VAZÃO CRÍTICA.

TIPO DE SOLO VAZÃO Q (cm <sup>3</sup> /seg)	INCLINAÇÃO DA RAMPA - 44°					
	EROSÃO, E x 10 <sup>3</sup> (g/cm <sup>2</sup> )					
	59	122	226	254	278	300
COLÚVIO	49,06	74,34	100,20	39,36	123,34	233,20
HORIZONTE I - A	39,52	66,66	116,54	203,71	341,86	347,45
HORIZONTE I - B	3639,89	56,82	6847,80	113,42	5354,06	—

TABELA VI.3 - VALORES MÍNIMOS E MÁXIMOS DA EROSÃO

TIPO DE SOLO	EROSÃO ( $g/cm^2$ ) — $E \times 10^3$						
	VAZÃO ( $cm^3/seg$ )		CONDIÇÕES DE UMIDADE DA AMOSTRA			INCLINAÇÃO DA RAMPA	
	$Q_1 = 173$	$Q_2 = 314$	$h_{nat}$	A. R.	A. E.	$44^\circ$	$59^\circ$
COLÚVIO	33,71	259,19	33,71	538,77	98,29	33,71	98,29
	e 1260,09	e 2301,73	e 273,39	e 2301,73	e 280,08	e 2301,73	e 1411,29
HORIZONTE I - A	35,14	36,54	107,06	196,36	35,14	36,87	35,14
	e 290,99	e 737,93	e 417,51	(2) e 739,93	(1) e 36,89	e 363,40	e 737,93
HORIZONTE I - B	112,82	1500,37	112,82	317,02	2091,50	112,82	706,14
	e 5563,64	e 3122,28	e 5563,64	e 2759,92	e 3267,72	e 3267,72	e 5563,64

(1) - CONSTATOU-SE UM RESULTADO CONSIDERADO ATÍPICO —  $E = 590,08 \times 10^{-3} g/cm^2$

(2) - " " " " —  $E = 94,78 \times 10^{-3} g/cm^2$

$h_{nat}$  - amostras ensaiadas na umidade natural.

A. R. - " " após ressecamento, prévio.

A. E. - " " embebição prévia

TABELA VI.4 - VALORES DAS VARIAÇÕES DA EROSÃO

TIPO DE SOLO	VARIAÇÕES MÍNIMAS E MÁXIMAS				
	VAZÕES	CONDIÇÕES DE UMIDADE DAS AMOSTRAS			INCLINAÇÃO DA RAMPA.
	$Q_1 \longrightarrow Q_2$	$h_{nat} \longrightarrow A.R.$	$h_{nat} \longrightarrow A.E.$	$A.R. \longrightarrow A.E.$	$44^\circ \longrightarrow 59^\circ$
COLÚVIO	1,2 a 8,1	5,5 a 16,0	0,7 a 1,1	0,08 a 0,20	0,61 a 4,4
HORIZONTE I - A	1,0 a 3,8	1,2 a 2,7	0,09 a 0,35	0,05 a 0,18	0,67 a 1,5
HORIZONTE I - B	0,56 a 13,3	0,13 a 2,8	0,37 a 2,9	1,1 a 10,3	0,63 a 49,3

OBS.: 1- EM CADA VAZÃO EXECUTARAM-SE 6 ENSAIOS PARA CADA SOLO.

2- IDÉM PARA CADA INCLINAÇÃO DA RAMPA.

3- EM CADA CONDIÇÃO DE UMIDADE EXECUTARAM-SE 4 ENSAIOS  
PARA CADA SOLO, EXCETO NO COLÚVIO ONDE NA CONDIÇÃO DE A.E.  
EXECUTARAM-SE APENAS 2.

$h_{nat}$  - amostras ensaiadas na umidade natural.

A.E. - " " após embebição prévia.

A.R. - " " após ressecamento prévio.

TABELA VI.5 - EROSÃO TOTAL EM 2 hs. E PORCENTAGEM DA EROSÃO DURANTE O ENSAIO.

TIPO DO SOLO E CONDIÇÕES DE UMIDADE	COLÚVIO				HORIZONTE I-A						HORIZONTE I-B						PORCENTAGENS (médias)
	h <sub>nat</sub>		ressec.		h <sub>nat</sub>		ressec.		satur.		h <sub>nat</sub>		ressec.		sat.		
VAZÃO DO ENSAIO - Q (cm <sup>3</sup> /seg)	254	173	173	314	173	314	173	314	173	314	173	254	314	173	314	173	
EROSÃO TOTAL EM 2 horas x 10 <sup>8</sup>	39,36	33,71	538,77	2301,73	107,06	363,40	290,99	94,78	36,89	590,08	112,82	113,42	1500,37	317,02	2759,92	3267,72	
(%) EROSÃO t = 5 min	54,6	53,7	57,7	13,2	70,9	66,4	72,7	81,4	76,1	94,3	53,7	59,5	41,0	46,9	37,8	42,5	57,65
(%) EROSÃO t = 15 min	55,3	55,1	75,8	52,9	76,5	76,7	88,8	89,5	79,9	96,1	75,8	76,5	64,1	81,6	61,7	57,2	72,72
(%) EROSÃO t = 30 min	74,1	75,5	79,5	72,6	78,9	82,4	93,4	93,8	82,3	97,6	79,4	84,2	81,5	91,7	73,4	62,7	81,44
(%) EROSÃO t = 60 min	86,6	86,5	97,0	96,4	82,9	90,0	97,3	96,1	98,7	99,6	97,0	94,3	97,3	97,9	100,0	97,9	94,72
(%) EROSÃO t = 120 min	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	—	100,0	100,0

OBS.: INCLINAÇÃO DA RAMPA - 44°  
 - EROSÃO em g/cm<sup>2</sup>

TABELA VI.6 - EROSAO TOTAL EM 2 hs. E PORCENTAGEM DA EROSAO DURANTE O ENSAIO.

TIPO DO SOLO E CONDIÇÕES DE UMIDADE	COLÚVIO						HORIZONTE I - A						HORIZONTE I - B						PORCENTAGENS (médias)	
	h <sub>nat</sub>		ressec.		satur.		h <sub>nat</sub>		ressec.		satur.		h <sub>nat</sub>		ressec.		satur.			
VAZÃO DO ENSAIO - Q (cm <sup>3</sup> /seg)	173	314	173	314	173	314	173	314	173	314	173	314	173	314	173	314	173	314		
EROSÃO TOTAL EM 2 horas x 10 <sup>3</sup>	146,64	259,19	1260,09	1411,29	98,29	280,08	162,43	417,51	196,36	737,93	35,14	36,34	(#)	5563,64	2789,41	706,14	2255,46	2091,5		2418,28
(%) EROSÃO t = 5 min	28,8	30,7	52,8	59,6	93,9	61,7	62,3	72,2	59,0	57,3	78,0	72,9	30,5	52,7	46,1	31,1	92,0	67,6		
(%) EROSÃO t = 15 min	43,0	55,7	62,0	72,9	95,6	68,7	85,9	76,1	71,0	78,9	84,7	78,4	60,9	87,2	71,6	66,4	93,0	69,7		
(%) EROSÃO t = 30 min	49,3	74,1	73,1	81,6	96,2	73,0	90,0	80,1	77,3	87,1	87,2	83,7	100,0	100,0	84,2	73,6	94,6	72,6		
(%) EROSÃO t = 60 min	59,7	89,9	84,0	86,9	97,2	95,0	93,9	85,3	87,0	93,6	96,3	87,5	—	—	88,1	85,6	95,8	76,5		
(%) EROSÃO t = 120 min	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	—	—	100,0	100,0	100,0	100,0		

OBS.: - (\*) EROSAÇÃO TOTAL DA AMOSTRA OBSERVADA NOS PRIMEIROS 19min. DO ENSAIO.  
 - INCLINAÇÃO DA RAMPA - 59°  
 - EROSAÇÃO em g/cm<sup>2</sup>



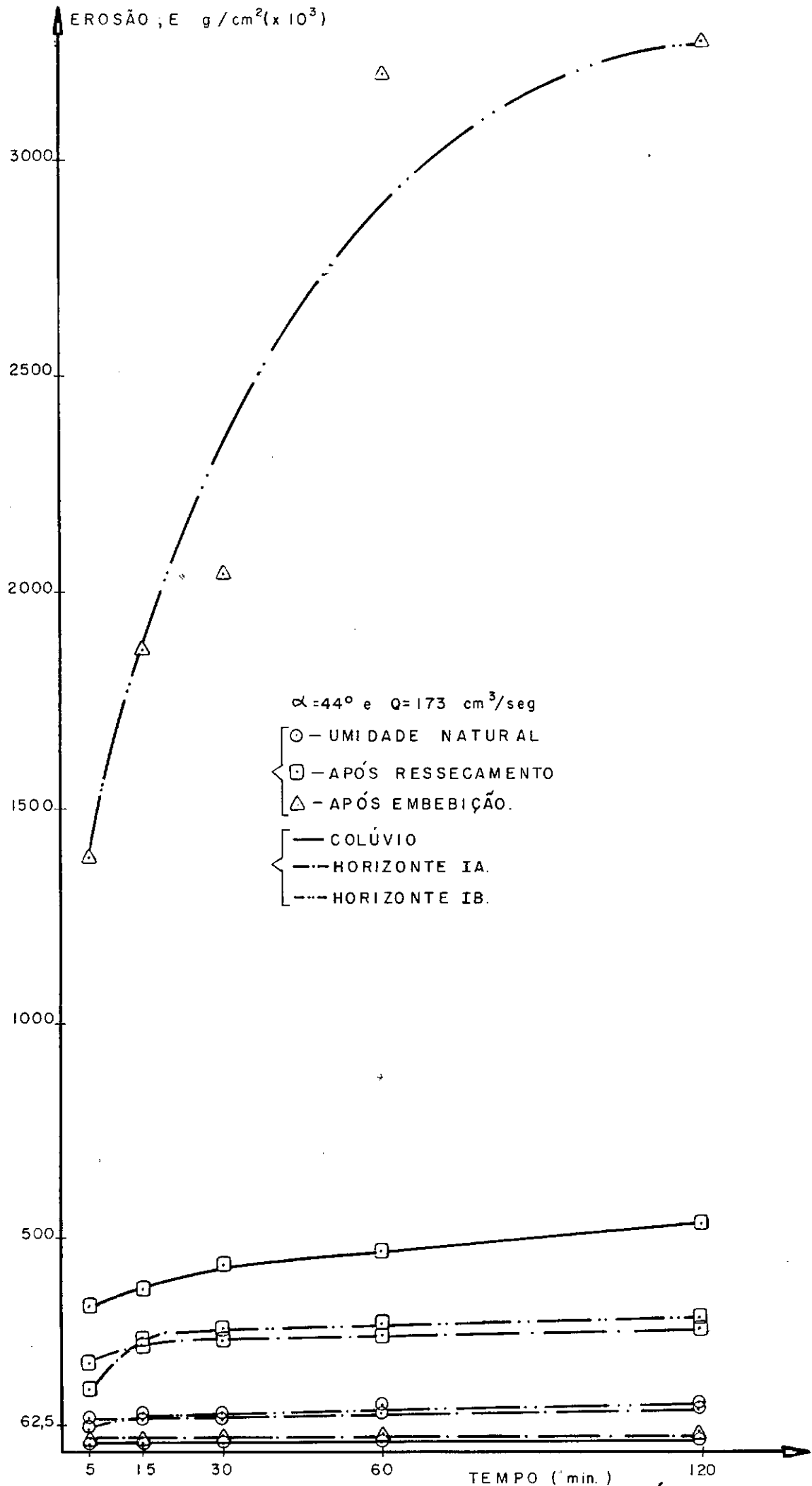


FIGURA : VI-1 - EROSÃO x TEMPO - HORIZONTES: COLÚVIO IA e IB  
 INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DAS  
 AMOSTRAS NA EROSÃO.

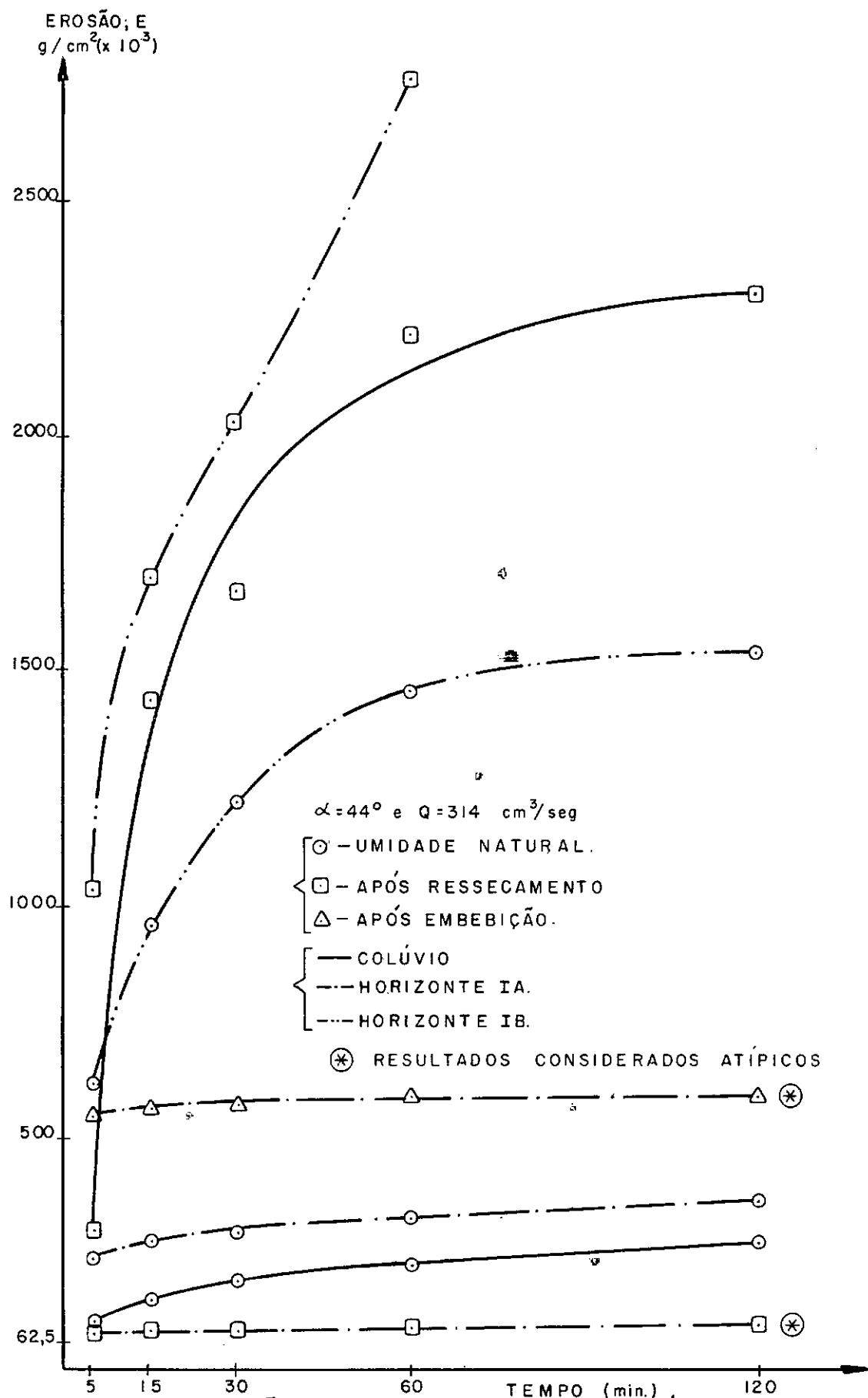


FIGURA : VI-2-EROSÃO x TEMPO-HORIZONTES: COLÚVIO IA e IB.  
INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DAS AMOSTRAS NA EROSIÃO.

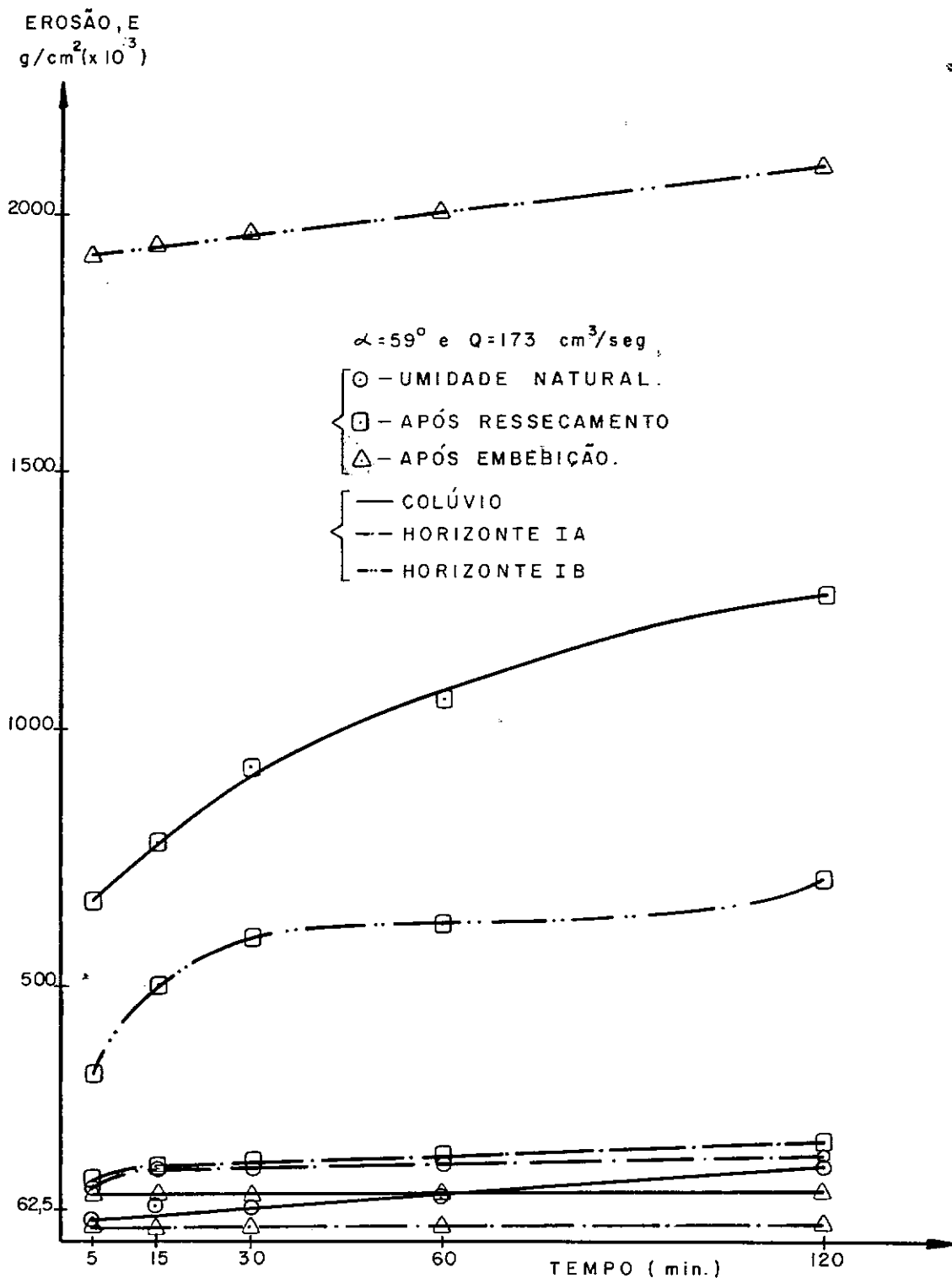


FIGURA: VI-3-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTES: COLÚVIO IA e IB  
INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DAS  
AMOSTRAS NA EROSIÃO.

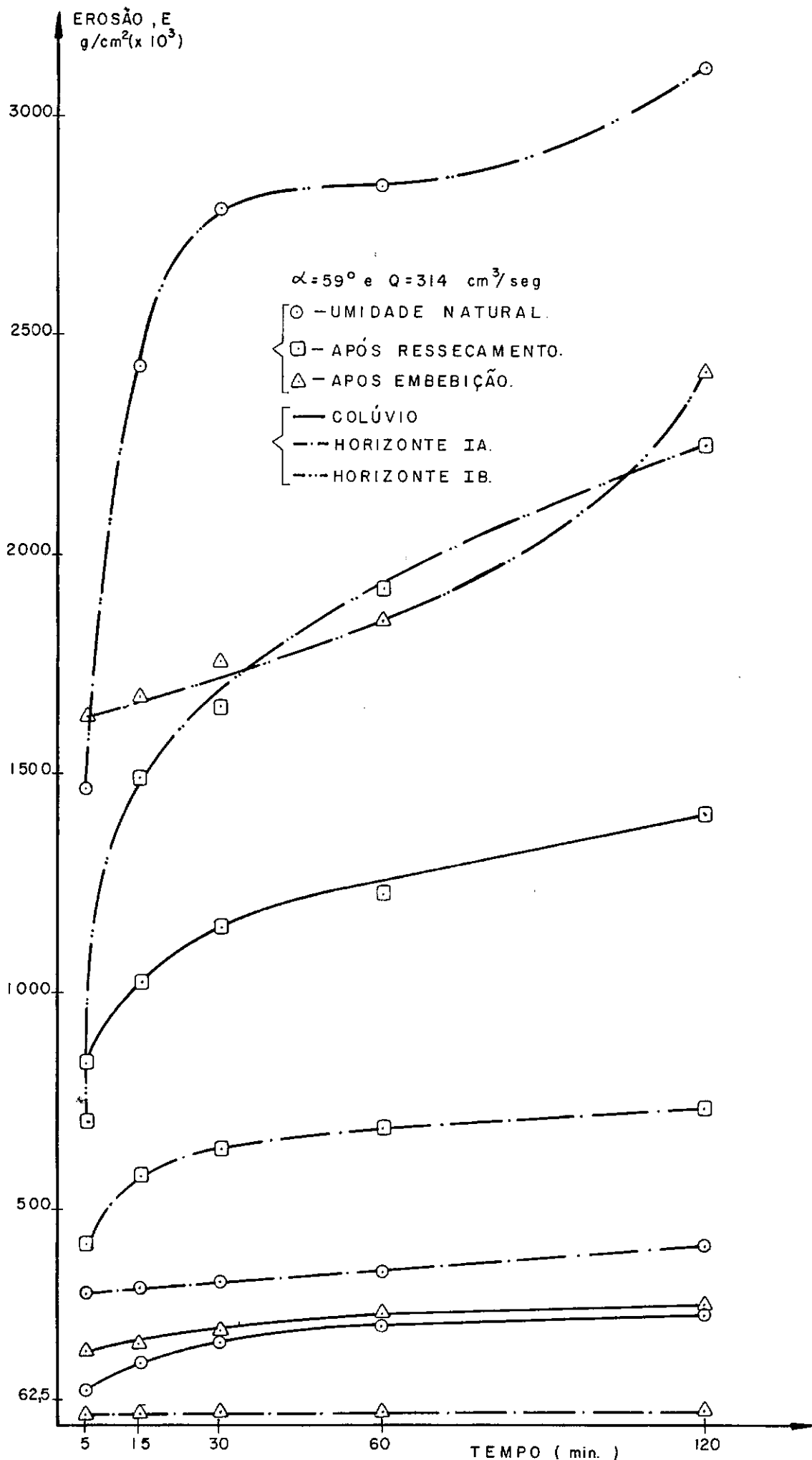


FIGURA :VI-4-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTES: COLÚVIO IA e IB  
INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE UMIDADE DAS  
AMOSTRAS NA EROSÃO.

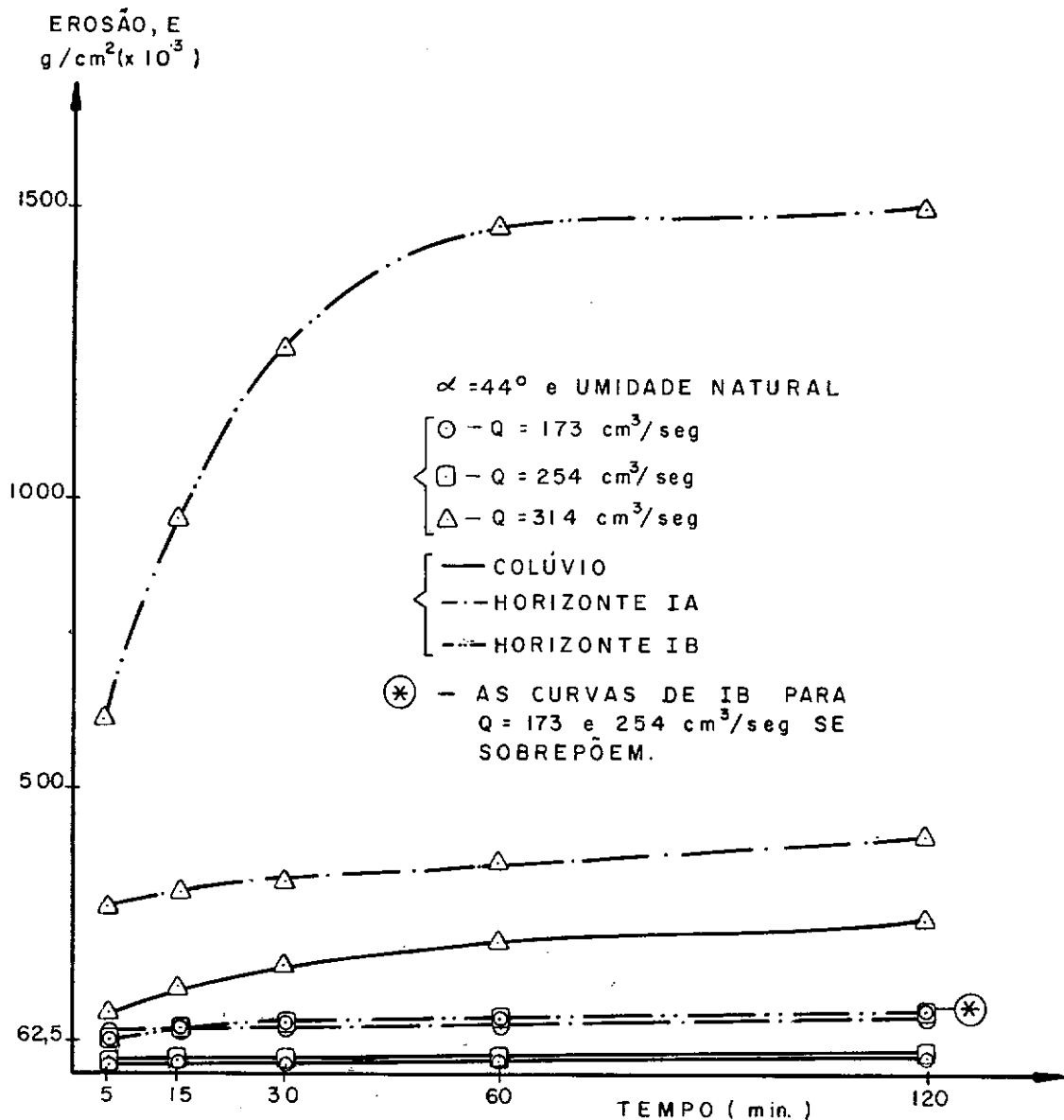
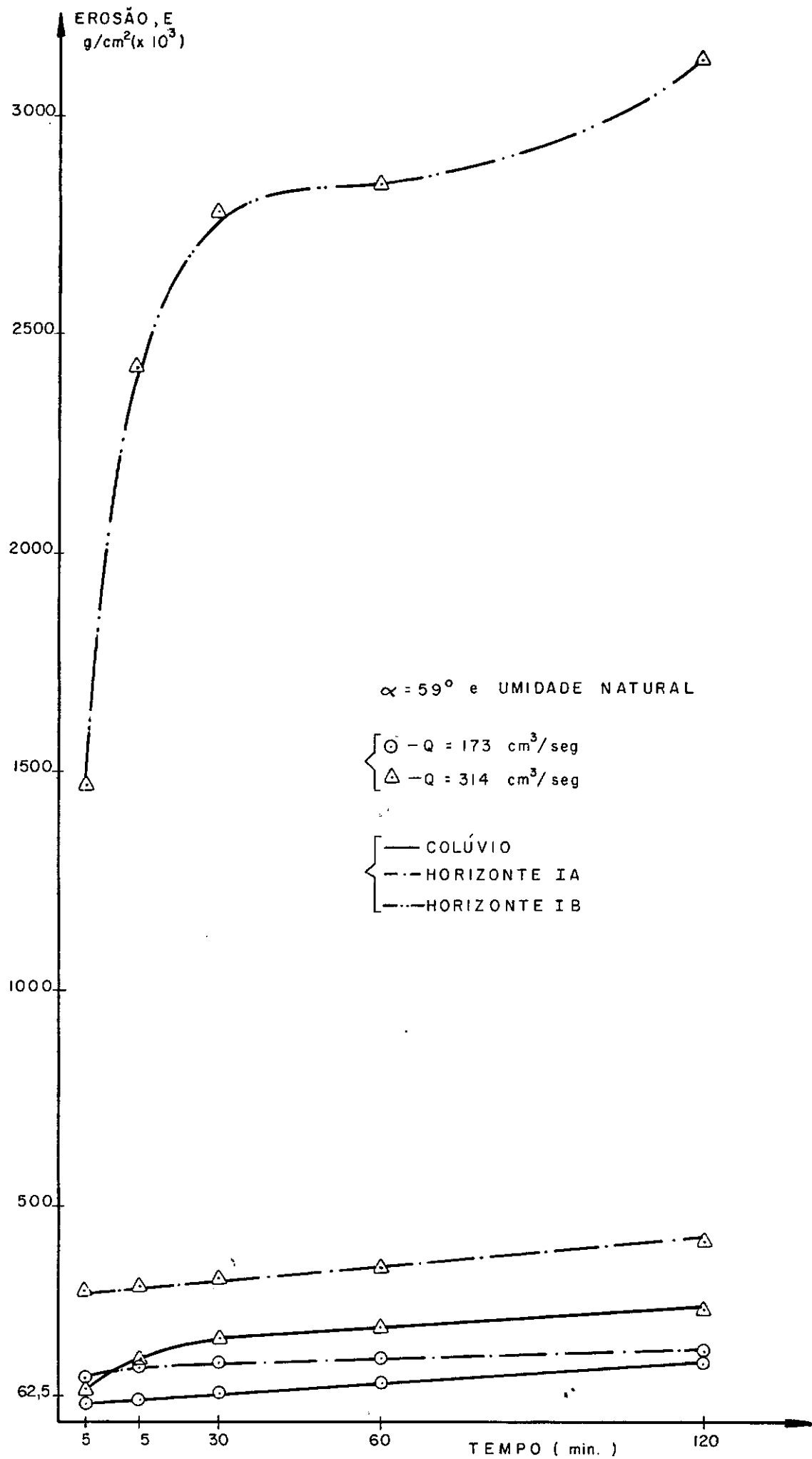


FIGURA : VI - 5 - EROSIÃO x TEMPO - HORIZONTES : COLÚVIO IA e IB.  
INFLUÊNCIA DA VAZÃO NA EROSIÃO.



FIGURÂ : VI-6-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTES: COLÚVIO IA e IB.  
INFLUÊNCIA DA VAZÃO NA EROSÃO.

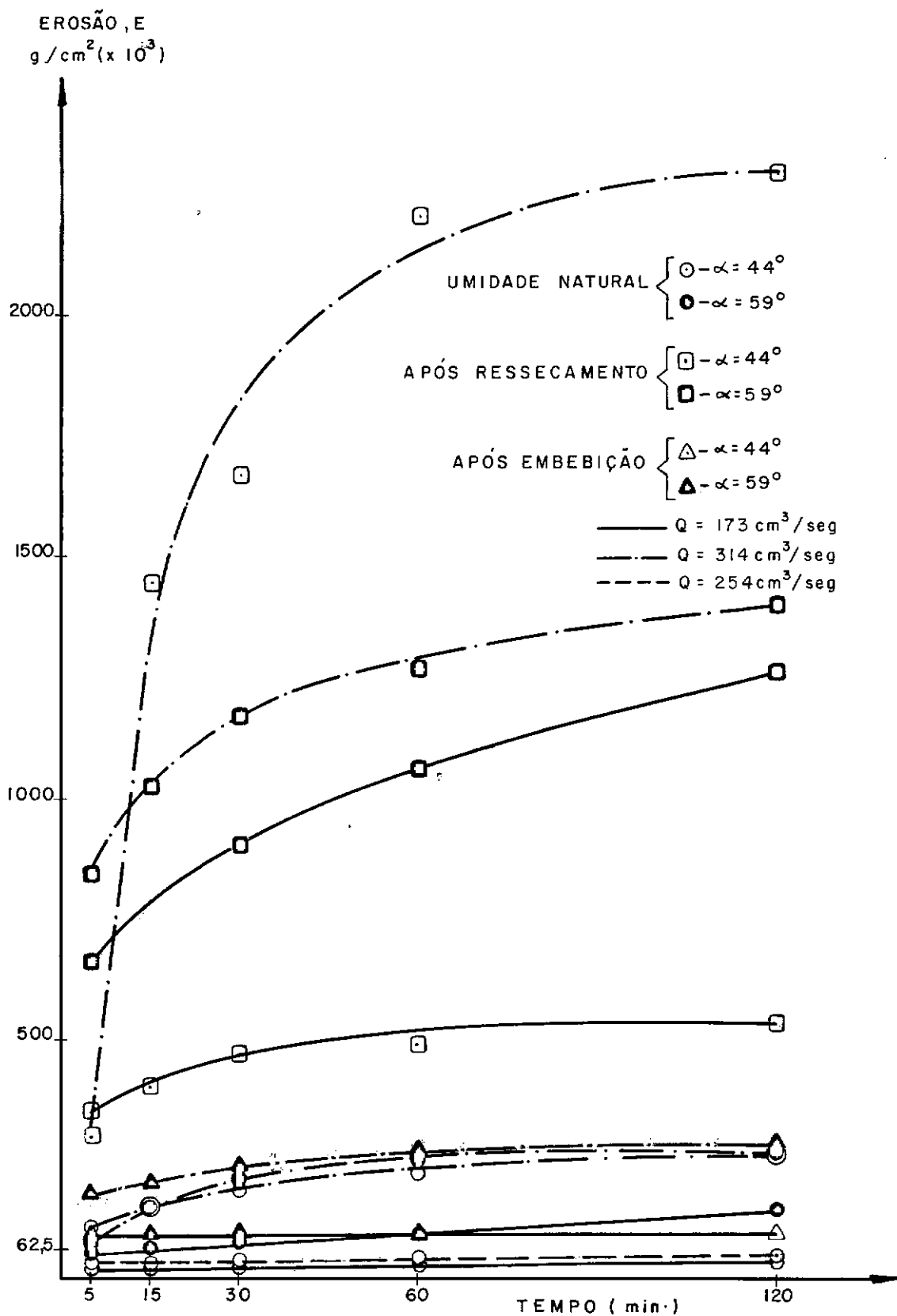


FIGURA : VI · 7 - EROÇÃO x TEMPO - HORIZONTE : COLÚVIO

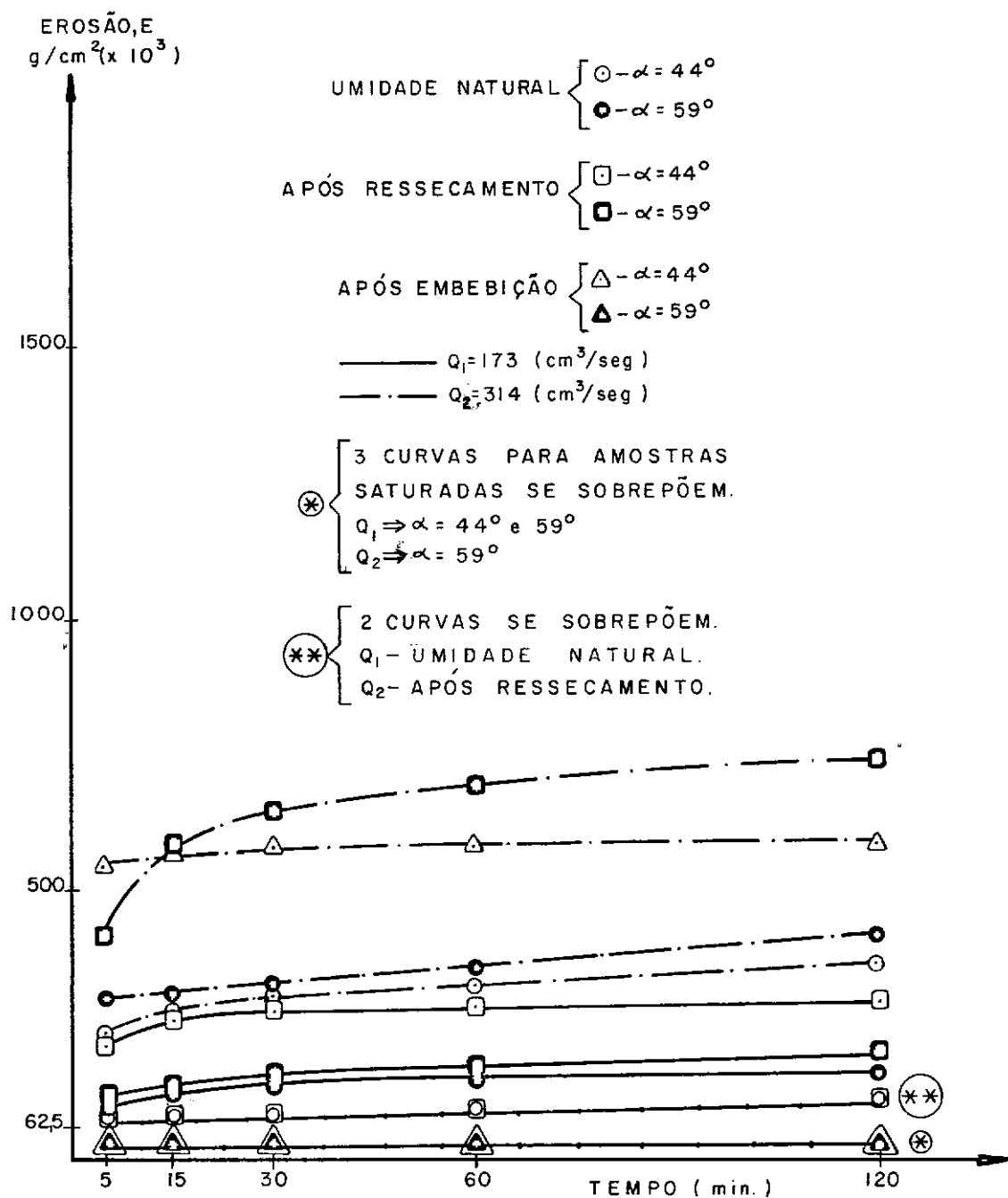


FIGURA: VI-8-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTE IA



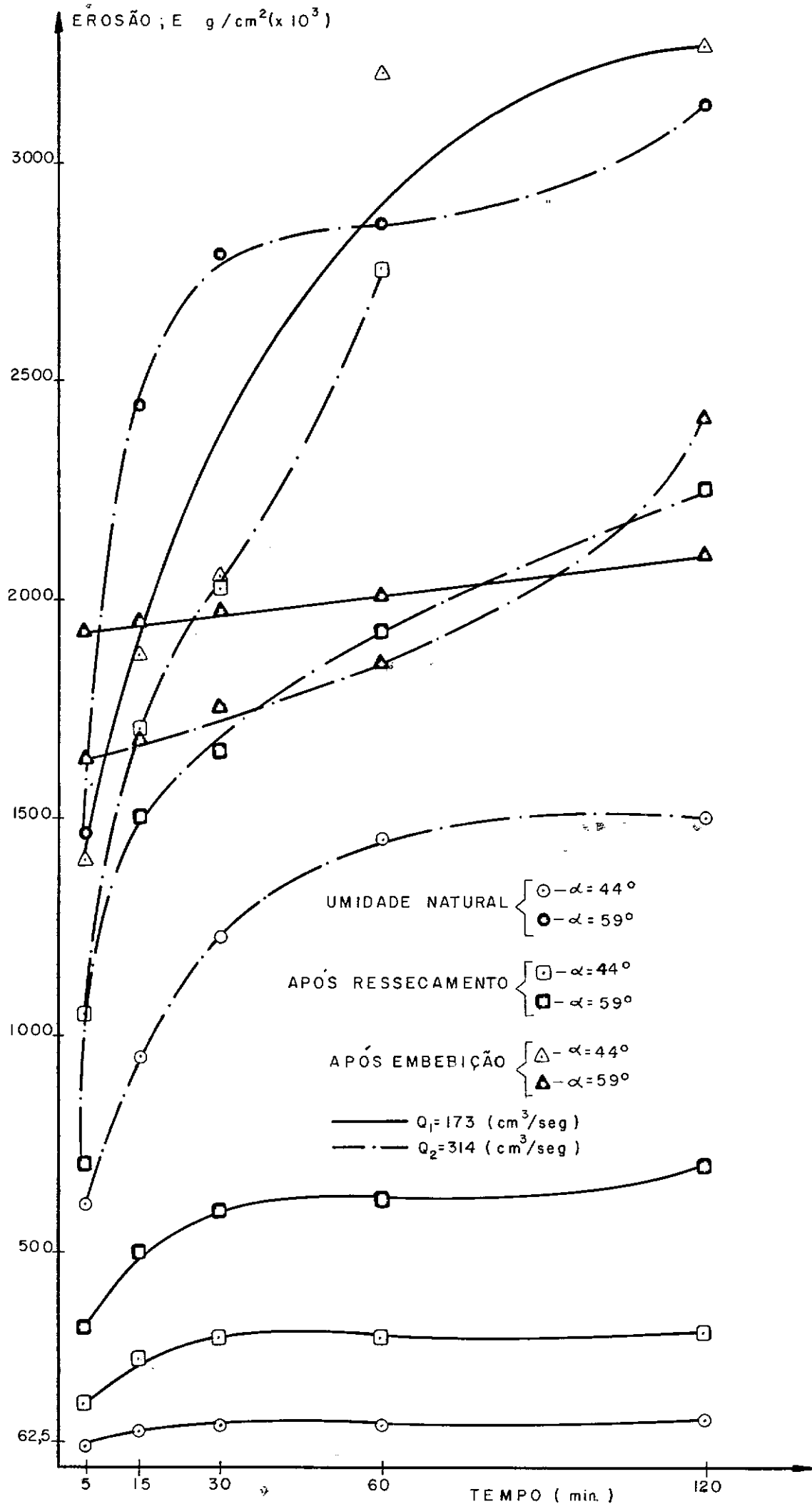


FIGURA: VI-9-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTE IB.

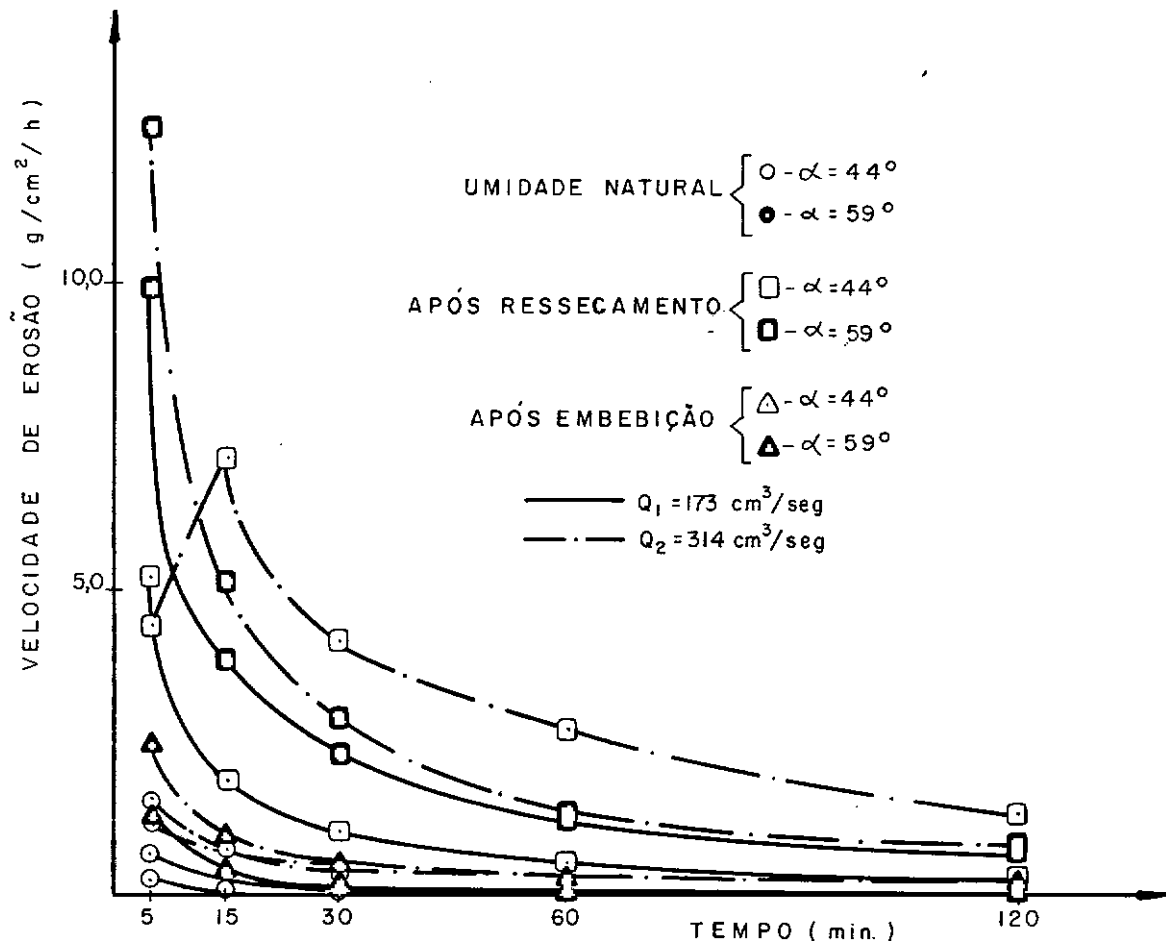


FIGURA VI-10-VELOCIDADE DE EROSAO x TEMPO  
HORIZONTE - COLÚVIO.

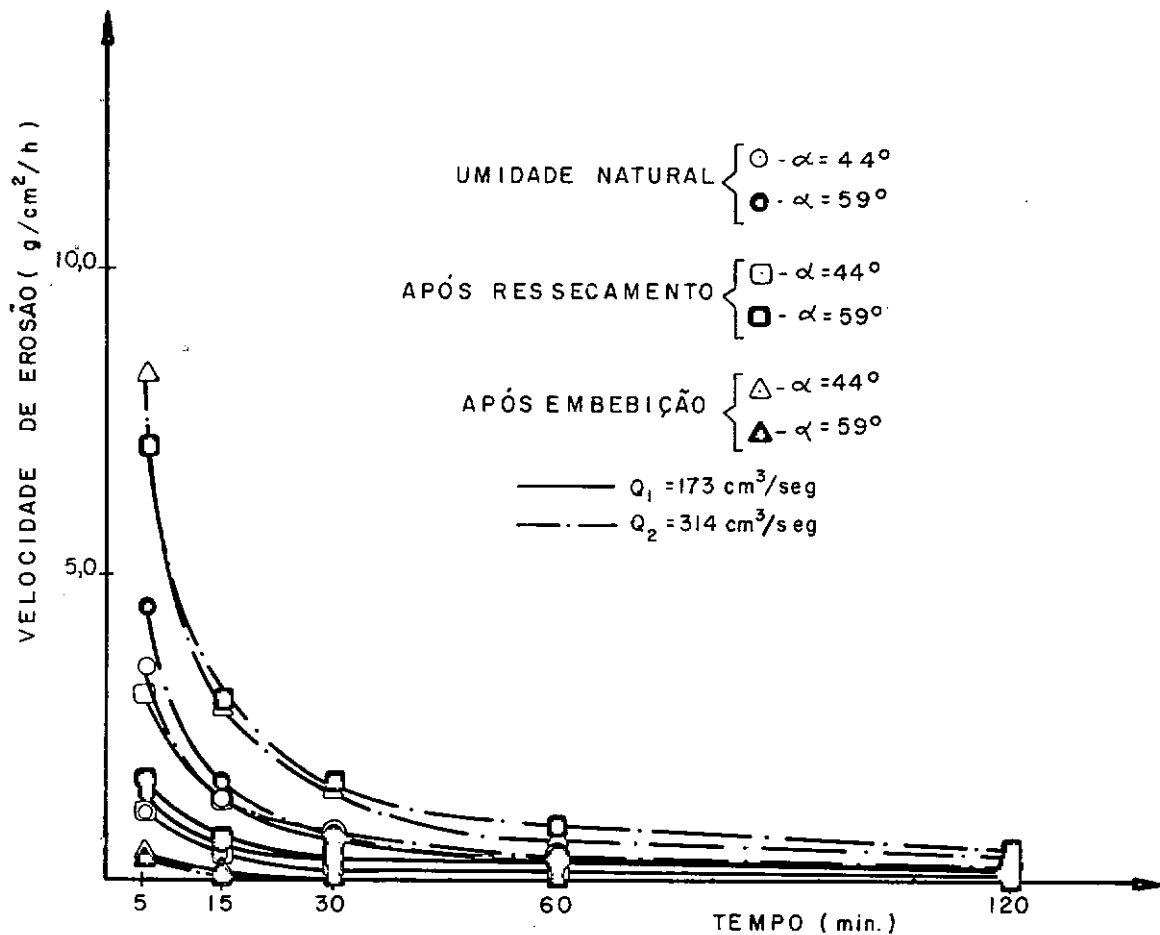


FIGURA: VI-11-VELOCIDADE DE EROSÃO x TEMPO.  
HORIZONTE IA

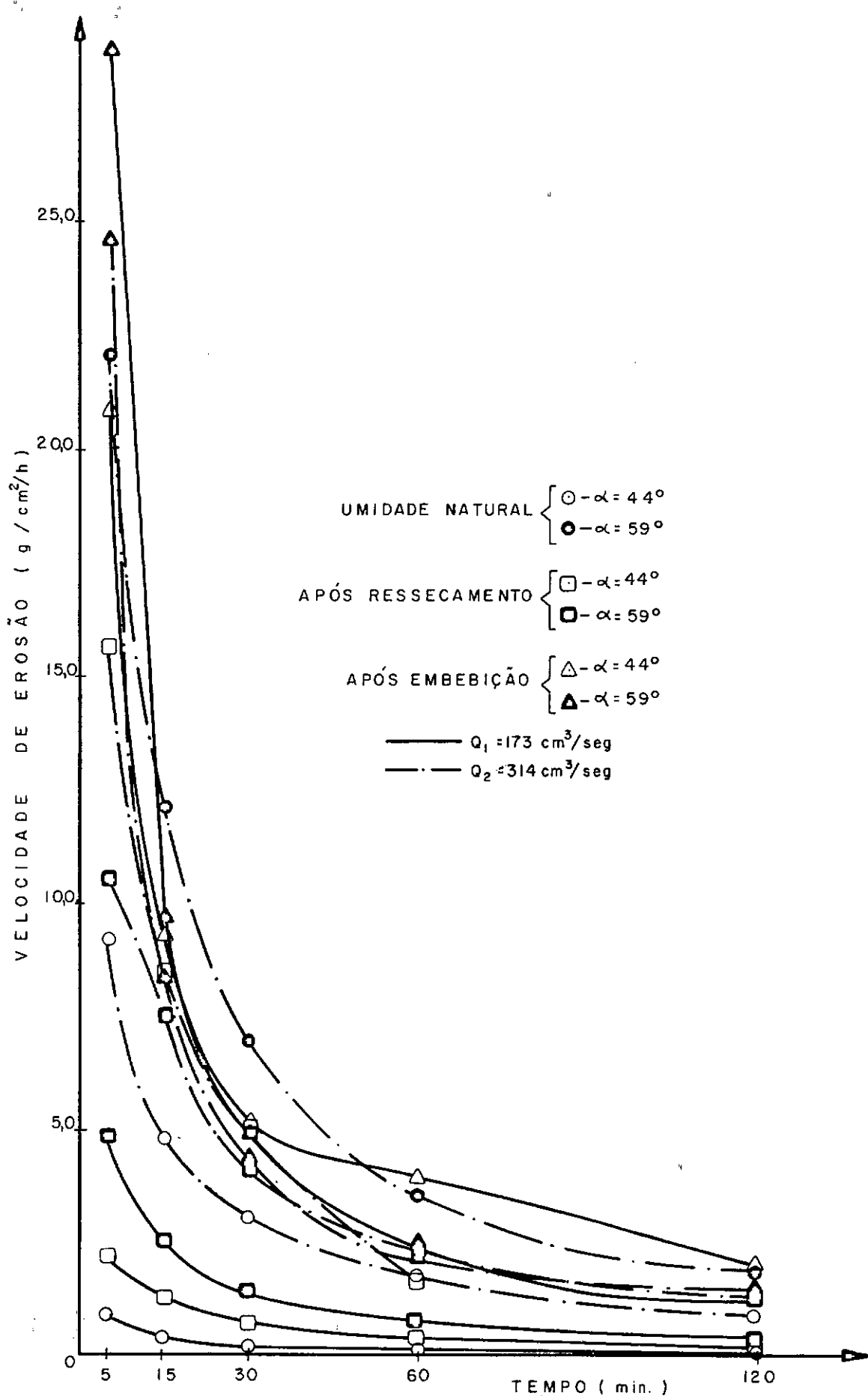


FIGURA : VI-12-VELOCIDADE DE EROÇÃO x TEMPO-HORIZONTE IB.

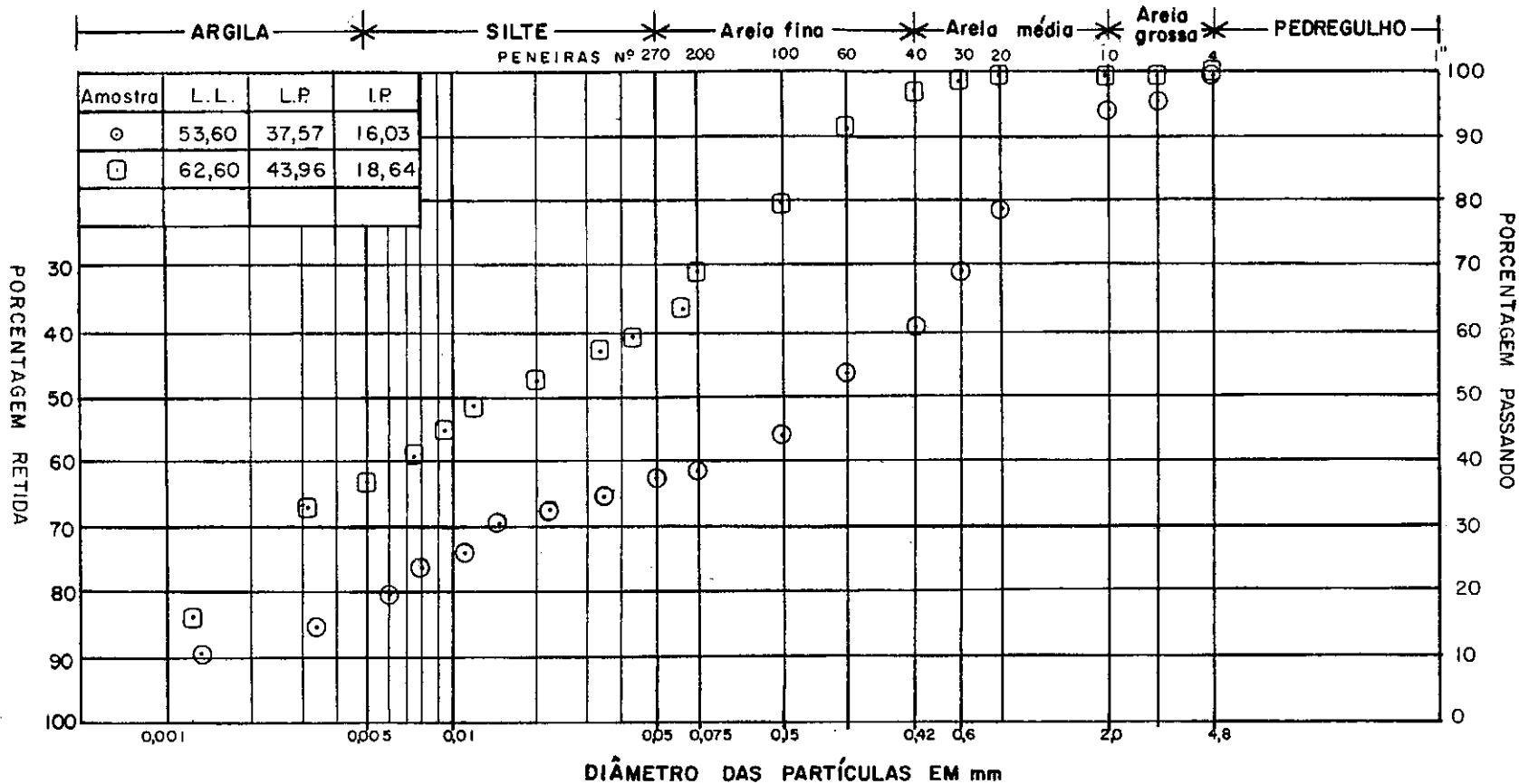


FIG. VI.13 — ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

— AMOSTRA COLETADA EM 03/06/1977. □

— AMOSTRA COLETADA EM 22/08/1977. ○

HORIZONTE I-B — TALUDE Km 25.

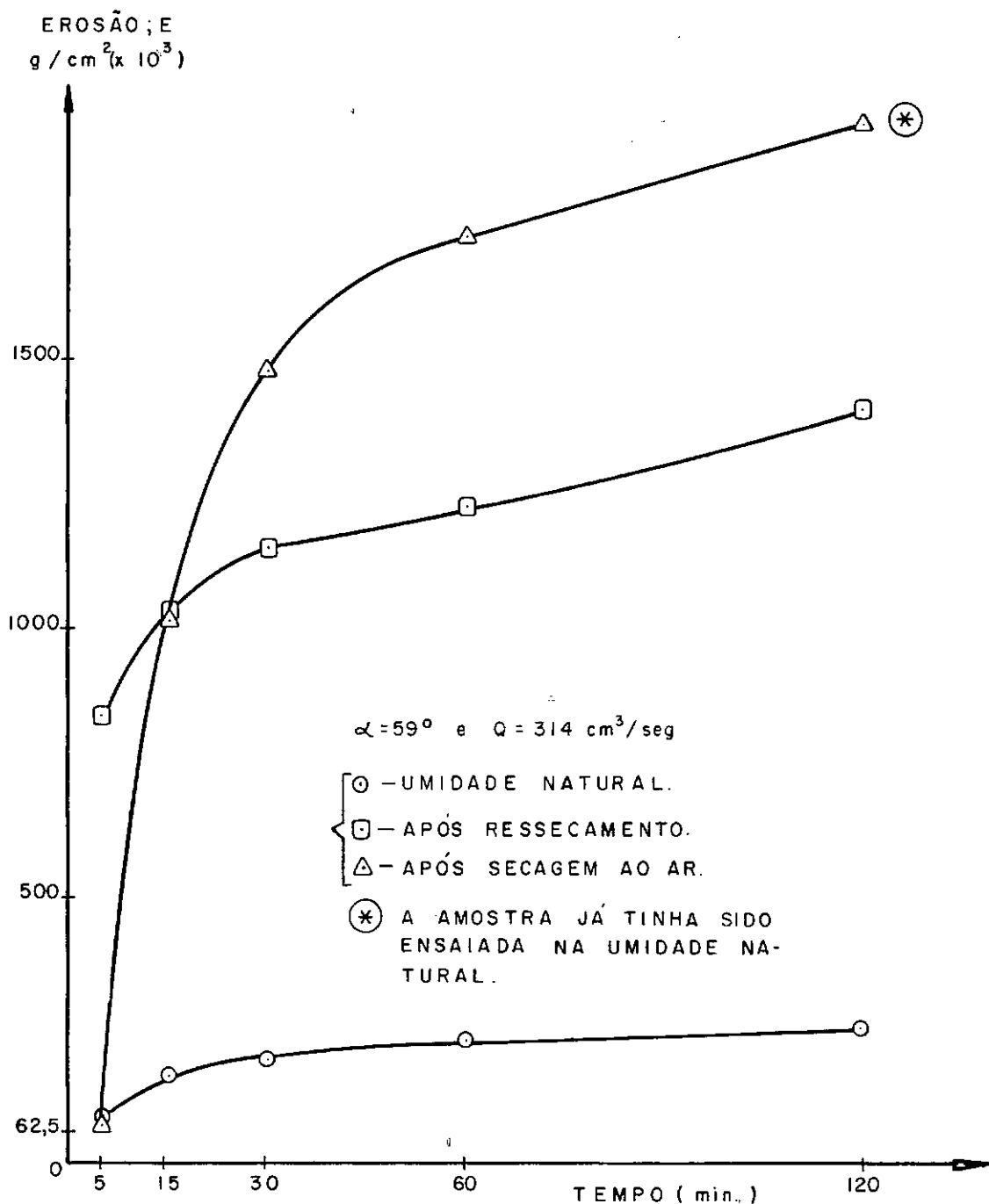


FIGURA: VI-14-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTE : COLÚVIO.  
INFLUÊNCIA DO CICLO: ENSAIO-SECAGEM-ENSAIO.

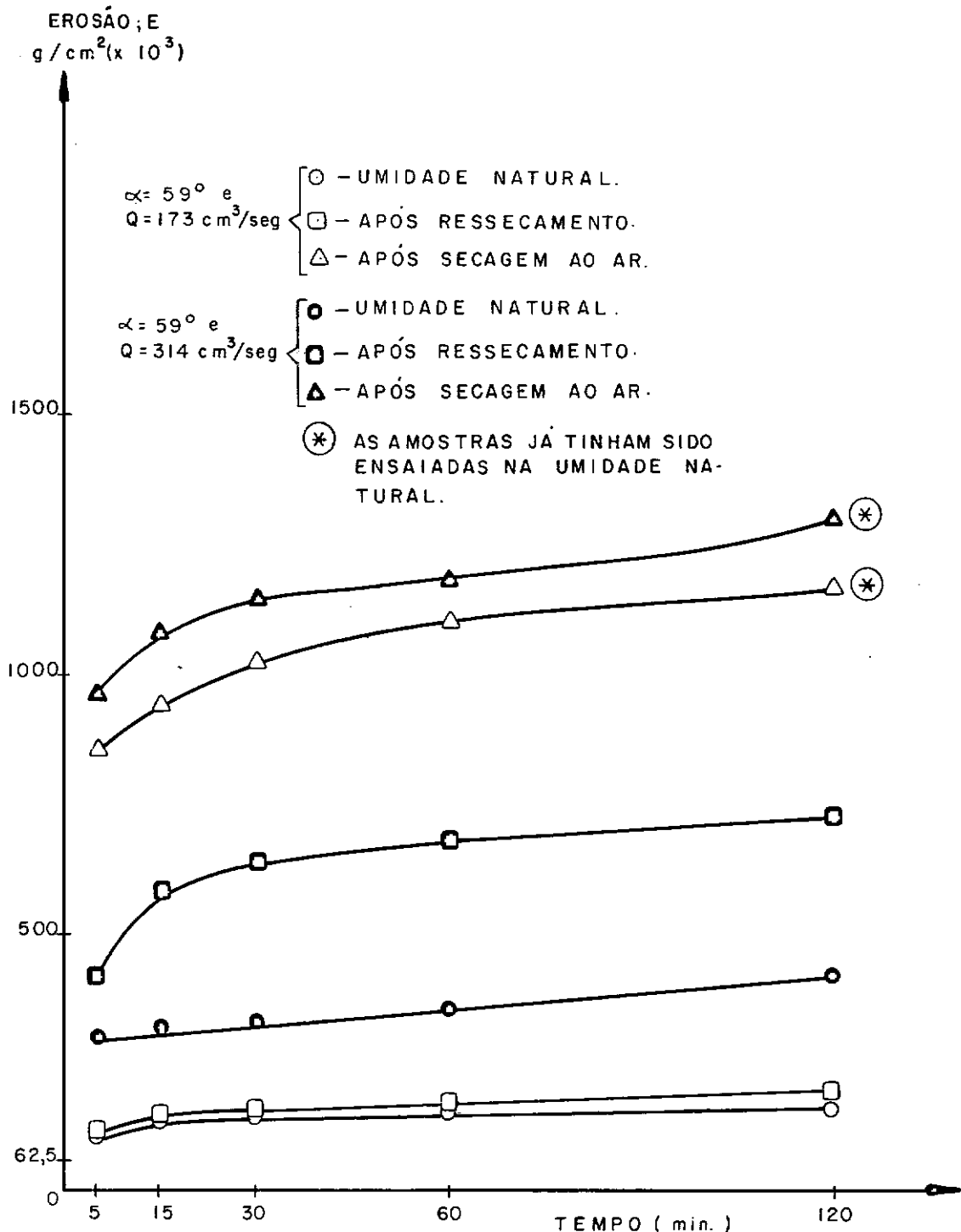


FIGURA: VI-15-EROSÃO x TEMPO - HORIZONTE IA.  
INFLUÊNCIA DO CICLO: ENSAIO-SECAGEM-ENSAIO.

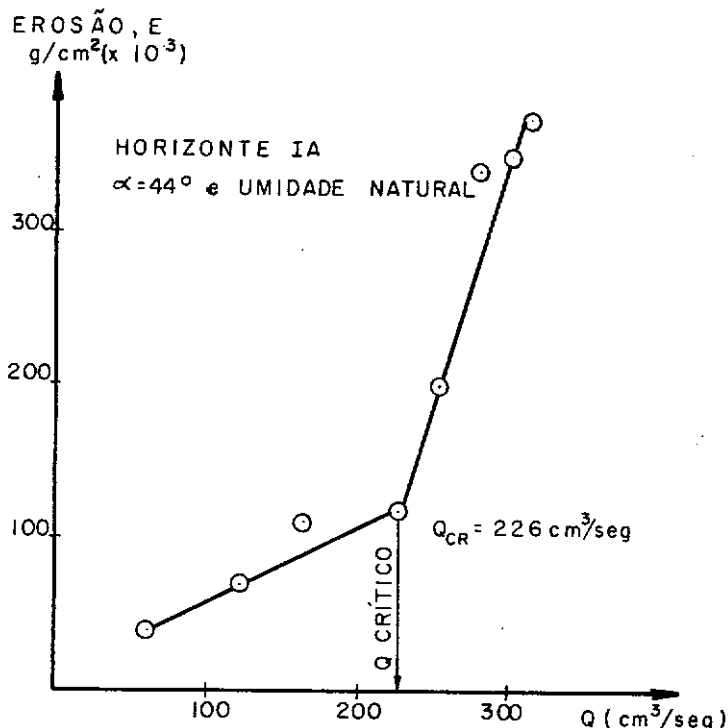


FIGURA: VI-17-EROSÃO x VAZÃO DE ENSAIO.  
DETERMINAÇÃO DA VAZÃO CRÍTICA.

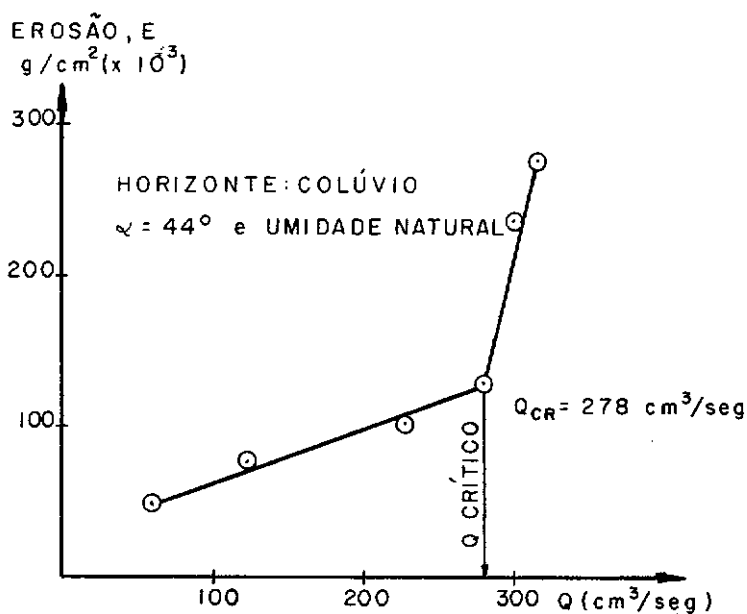


FIGURA: VI-16-EROSÃO x VAZÃO DE ENSAIO.  
DETERMINAÇÃO DA VAZÃO CRÍTICA.



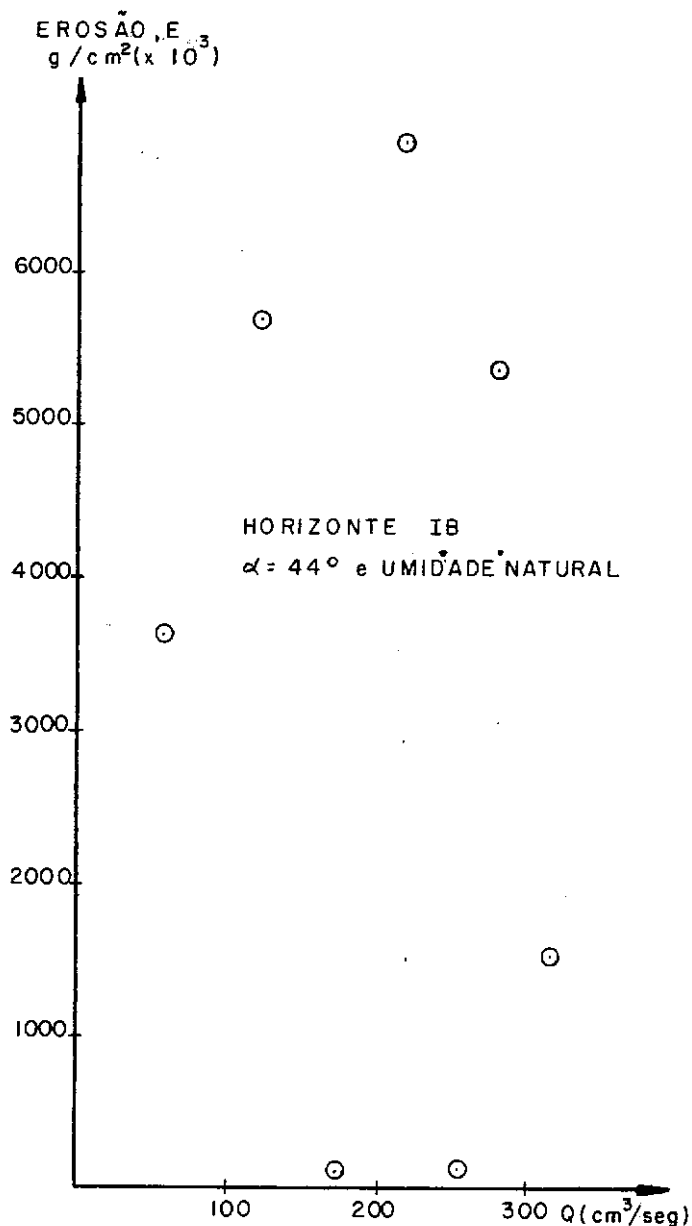


FIGURA: VI-18-EROSÃO x VAZÃO DE ENSAIO.  
DETERMINAÇÃO DA VAZÃO CRÍTICA.

Obs: A VAZÃO CRÍTICA NÃO FOI DETERMINADA  
FACE A GRANDE DISPERSÃO DOS RESUL-  
TADOS DOS ENSAIOS.

VII - Tentativa de Correlação da Erodibilidade dos Solos Estudados com Parâmetros Obtidos em Outros Ensaios de Laboratório

## VII - TENTATIVA DE CORRELAÇÃO DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS ESTUDADOS COM PARÂMETROS OBTIDOS EM OUTROS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Com o objetivo de identificar quais as propriedades do solo que melhor indiquem sua susceptibilidade à erosão, vamos agora analisar e tentar correlacionar cada uma delas com a erosão do seu respectivo solo.

### VII.1 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

Análises Químicas executadas nos solos ensaiados mostraram que o colúvio e os horizontes IA e IB contêm em suas composições mineralógica os minerais caulinita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{T}_1\text{O}_2$  e quartzo, conforme mostra a tabela VII.1, anexa. As percentagens desses minerais entretanto, não são iguais nos 3 solos.

O colúvio ainda apresenta em sua composição 7,4% de gipsita e o horizonte IB 16% de material amorfo(\*).

Comparando-se a erosão média de laboratório dos solos estudados com suas respectivas mineralogias, não se constatou correlação entre elas. Os minerais encontrados nos solos ensaiados basicamente são os mesmos, não havendo portanto evidências de que determinado mineral tenha influenciado especificamente na erosão dos solos estudados.

### VII.2 - GRANULOMETRIA

Baseado no sistema de Classificação Unificada dos solos, o Colúvio e o horizonte IA são classificados como CH(\*\*). Os horizontes IB e IC como MH e SM, respectivamente.

Diversas tentativas têm sido feitas para correlacionar as características granulométricas dos solos com suas respectivas susceptibilidades a erosão.

---

(\*) - Material Amorfo - Alúmino-silicatos mal cristalizados não são acusados pelo Raio X.

(\*\*) - Ver Lambe & Whitman . "Soil Mechanics" - pag. 34.

Santos e Castro<sup>80</sup> estudaram o comportamento com relação à erosão de 34 tipos de solos diferentes. Destes, 10 apresentaram com comportamento Bom (resistentes aos agentes erosivo) 3 comportamento Regular e os outros 21 Mau (pouco resistente à erosão).

Os parâmetros granulométricos por eles considerados para melhor identificar os solos de acordo com seu comportamento, foram a percentagem dos grãos passando na peneira de nº 40 da ASTM ( $\#$  40) e o parâmetro granulométrico  $a$  já definido (item III.4, pag. 11).

Segundo tais autores, os solos com comportamento Bom ou Regular apresentaram os valores abaixo:

$$49\% \leq \% \text{ dos grãos pass. na } \# 40 \leq 96\%$$

$$0,52 \leq a \leq 0,92$$

Todos os solos com comportamento Bom ou Regular (num total de 13) apresentaram valores desses parâmetros dentro da faixa considerada. Para os solos com comportamento Mau (21), 13 solos foram identificados com este comportamento pelo valor da percentagem dos grãos passando na  $\#$  40 e 14 pelo valor do parâmetro  $a$ . Vale salientar que todos os solos identificados pela percentagem passando na  $\#$  40 foram também identificados pelo parâmetro  $a$ .

Para correlacionar as características acima discutidas com as erosões dos solos aqui estudados, vamos tomar como referências as observações de campo e os ensaios de erosão em laboratório (Inderbitzen) com as amostras na umidade natural.

Através de tais observações e dos resultados dos ensaios, o Colúvio apresentou-se bastante resistente à erosão, portanto, com Bom comportamento. Os valores dos parâmetros indicativos de sua susceptibilidade à erosão foram, percentagem dos grãos passando na  $\#$  40 igual a 79% e o parâmetro granulométrico  $a$  igual a 0,80. Estes valores, segundo o critério adotado pelos autores mencionados, confirmam a nossa classificação para este solo.

O horizonte IA foi por nós considerado como tendo um Bom comportamento com relação a erosão. Sua percentagem de grãos passando na # 40 foi de 71% e o parâmetro granulométrico  $a$  de 0,74. Estes resultados novamente confirmam o comportamento do solo IA, pelo critério dos autores portugueses citados.

O horizonte IB, conforme já se disse, apresentou os resultados de ensaios muito dispersos e seu comportamento com relação à erosão foi considerado Regular ou Mau. A percentagem dos grãos desse solo passando na # 40 foi de 97% e o parâmetro  $a = 0,90$ . Pelos valores limites desses parâmetros adotados por Santos e Castro nota-se que a percentagem dos grãos passando na # 40, identifica o horizonte IB como tendo Mau comportamento e o parâmetro  $a$  o identifica como Regular, o que de certa forma confirma a nossa classificação.

O horizonte IC que, sob as condições normais de ensaio foi considerado como sendo um solo de comportamento Mau com relação à erosão, apresentou os seguintes resultados: percentagem dos grãos passando na # 40 = 54% e o parâmetro  $a = 0,59$ . Os valores dessas características estão dentro dos limites dos solos com Bom ou Regular comportamento considerado pelos autores, o que contraria nossa classificação. Vale salientar entretanto que estes valores estão próximos dos valores limites adotados, para esta classificação.

Concluindo, observa-se que dos 4 solos estudados, 3 tiveram seus comportamentos confirmados através dos parâmetros sugeridos pelos autores portugueses citados.

As características acima discutidas e seus valores limites estão registrados na tabela VII.2 anexa.

Correlacionando-se as percentagens de argila dos solos estudados com suas respectivas erosões, nota-se que há uma tendência de que quanto maior esta percentagem, menor é a erosão sofrida pelo solo para as mesmas condições de ensaio. Isto pode ser verificado nas figuras VII.2 e VII.3.

Estudos realizados por Grant e Epstein<sup>37</sup>, mostraram entre

tanto, comportamento oposto do acima citado. Eles concluíram que a velocidade de perda do solo para 10 minutos de ensaio, aumentou com a percentagem de argila nos solos. Esta variação (linear em escala semi-logarítmica) pode ser vista na figura VII.1 aqui reproduzida.

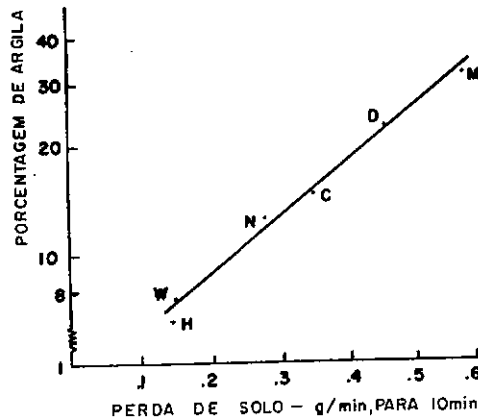


FIG. VII.1 - PORCENTAGEM DE ARGILA x PERDA DE SOLO PARA 10min DE APLICAÇÃO DE CHUVA.  
(COPIADO DE EPSTEIN e GRANT - 1937)

Chama-se a atenção para o fato de que os autores não mencionaram em seu trabalho, qual ou quais os tipos dos minerais argílicos presentes nos 6 tipos de solo por eles estudados. Este fato tem importância porque, conforme citação de Peele<sup>73</sup>, Middleton, Slater e Byers após inúmeras pesquisas executadas em vários tipos de solo, concluíram que a qualidade dos colóides é mais importante como indicação da erodibilidade dos solos do que sua quantidade.

Para finalizar este item, citamos Wischmeier e Meyer<sup>105</sup>,

que concluíram ser as partículas de dimensão silte mais facilmente erodidas do que as outras, e que os solos tornam-se menos erodíveis quando as frações de areia ou argila aumentam e a fração silte diminui.

### VII.3 - LIMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência tem sido bastante utilizados como instrumento de identificação e classificação dos solos.

O ensaio de Limite de Liquidez (LL) ao contrário do ensaio de Limite de Plasticidade (LP) é um ensaio essencialmente de resistência ao cisalhamento, porém ambos delimitam uma faixa de umidades na qual o solo tem comportamento plástico. A diferença entre o LL e o LP é chamada de Índice de Plasticidade e define a magnitude da faixa acima mencionada.

Os Limites de Liquidez do Colúvio e do horizonte IA e IB foram praticamente idênticos, em torno de 60%. Os Índices de Plasticidade foram respectivamente 29, 26 e 19%. O horizonte IC teve o comportamento não plástico.

#### VII.3.1 - ÍNDICE DE PLASTICIDADE

Correlacionando-se os Índices de Plasticidade dos solos com suas respectivas erosões, observa-se que quanto maior a plasticidade menor a erosão, o que pode ser visto nas figuras VII.4 e VII.5.

Com relação ao comportamento dos solos quanto à erosão, Santos e Castro<sup>80</sup> concluíram que todos os solos por eles estudados com comportamento Bom ou Regular apresentaram o  $IP \leq 17$ . No entanto, 10 dos 21 solos de Mau comportamento apresentaram  $IP \leq 17$ .

Para os solos por nós estudados, este valor limite não só se revelou inadequado para uma classificação do comportamento do solo como se observou também que os de Bom comportamento possuíam IP maior do que os de Mau comportamento.

## VII.3.2 - LIMITE DE PLASTICIDADE

Quando no item anterior correlacionamos o Índice de Plasticidade dos solos com a erosão sofrida pelas amostras, observamos que esta varia inversamente com o IP. Como o Limite de Liquidez foi praticamente o mesmo para as amostras ensaiadas, obviamente ao correlacionar-se o Limite de Plasticidade com a erosão das mesmas amostras, vamos ter a variação oposta daquela observada entre o IP e a erosão. Isto é, quanto maior o LP maior a erosão. As figuras VII.6 e VII.7 mostram esta variação.

Recorrendo ainda ao trabalho de Santos e Castro<sup>80</sup>, observamos que eles consideraram que os solos com comportamento Bom ou Regular apresentaram  $LP \leq 32$ . Este limite confirmou a classificação de 12 dos 21 solos com Mau comportamento e todos os solos com comportamento Bom e Regular.

Para os nossos solos este valor limite confirma o comportamento Bom de um solo (colúvio,  $LP = 32$ ) e o comportamento Mau de outro (horizonte IB,  $LP = 44$ ). Os horizontes IA e IC não tiveram seus comportamentos com relação a erosão adequadamente classificados por este critério.

Paaswell<sup>67</sup>, cita que Lutz<sup>44</sup>, comparou a erosão de 2 solos com diferentes plasticidades. O solo com alta plasticidade foi considerado não erosivo, enquanto o solo com baixa plasticidade foi altamente erosivo. Este comportamento também foi observado para os solos pesquisados.

## VII.3.3 - LIMITE DE LIQUIDEZ E LIMITE DE CONTRAÇÃO

Conforme se disse no início desse capítulo os limites de Liquidez dos solos aqui estudados, foram praticamente iguais, o que não permitiu determinar qualquer correlação entre estes limites e a erosão.

Chama-se atenção de que em toda literatura consultada, observou-se uma total ausência de correlação entre LL e Erosão dos Solos.

Quanto ao Limite de Contração (LC), para os solos colúvio,



horizonte IA e IB, observou-se haver uma tendência definida, quando se compara os seus valores com a erosão sofrida pelas amostras desses solos.

A tendência é a mesma que foi observada entre o Limite de Plasticidade e a erosão e pode ser vista na figura VII.8 e VII.9.

Vale salientar entretanto, que os autores portugueses não encontraram qualquer correlação entre esta propriedade e os comportamentos dos solos com relação à erosão.

Por outro lado, como aconteceu com o Limite de Liquidez, não foi encontrado nenhuma correlação entre a erosão e o LC nas outras bibliografias pesquisadas.

Face ao exposto acima, aconselha-se que as tendências encontradas nesse estudo entre os limites de consistência e as respectivas erosões dos solos, sejam tomadas com certa reserva, tendo em vista os poucos tipos de solo estudados. Aconselha-se também que esse estudo seja feito em outros solos, afim de se verificar e/ou adaptar os valores limites dados pelos autores Santos e Castro<sup>80</sup> para classificar os solos nas faixas de comportamento Bom, Regular ou Mau com relação à erosão.

#### VII.4 - PERCENTAGEM DE MATÉRIA ORGÂNICA

Comparando-se as erosões de laboratório dos solos estudados com as respectivas percentagens de matéria orgânica, observou-se uma correlação bem definida.

Esta correlação pode ser assim resumida: Quanto maior a percentagem de matéria orgânica no solo, menor a erosão sofrida por ele.

Nas figuras VII.10 e VII.11, esta correlação pode ser comprovada.

#### VII.5 - EXPANSIBILIDADE "LNEC"

Este parâmetro do solo que caracteriza a variação de seu volume induzida pelo correspondente aumento na umidade, foi con-

siderado por Santos e Castro<sup>80</sup> como sendo o índice que melhor identifica o comportamento do solo com relação à erosão.

Segundo os autores citados, a expansibilidade confirmou a classificação de 16 dos 21 solos com Mau comportamento e todos os outros solos com comportamento Regular e Bom.

Os solos com comportamento Bom ou Regular apresentaram segundo eles,  $E \leq 11\%$ . Chama-se a atenção de que a associação com a expansibilidade de qualquer dos dois parâmetros granulométricos citados para definição do comportamento do solo, classificou todos os solos testados por Santos e Castro.

Para os solos por nós ensaiados, o critério adotado pelos portugueses coincidiu com nossa identificação para um solo com Bom comportamento (colúvio,  $E = 6\%$ ) e um solo com Mau comportamento (Horizonte IB,  $E = 15\%$ ). O horizonte IA que foi por nós classificado como tendo Bom comportamento, apresentou  $E = 12\%$  portanto, um valor acima mas bastante próximo do valor limite considerado pelos autores citados. O horizonte IC de Mau comportamento, apresentou porém,  $E = 9,7\%$ , o que corresponderia a um bom comportamento.

Comparando-se a Expansibilidade com a Erosão dos solos estudados, observou-se que para o Colúvio e os horizontes IA e IB seus valores foram diretamente proporcionais, como mostram as figuras VII.12 e VII.13. O horizonte IC entretanto não acompanhou esta tendência. Sua Expansibilidade foi menor que a dos horizontes IA e IB e, no entanto, ele foi mais susceptível à erosão que estes últimos.

É válida também para este item a observação feita no último parágrafo do item VII.3.3 quanto à necessidade de estudos mais abrangentes para exame da viabilidade ou não de se estabelecer correlações aceitáveis da expansibilidade com a erodibilidade de diversos tipos de solos.

#### VII.6 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

Este ensaio foi executado com o objetivo de se observar como se comportavam as amostras dos solos quando parcialmente submersas em água e se havia alguma correspondência com a erosão

desses mesmos solos quando submetidos ao ensaio de Inderbitzen.

As amostras usadas nos ensaios eram amostras indeformadas, na unidade natural, e de forma cúbica com aproximadamente 6,0cm de lado.

O ensaio consistia em se colocar as amostras dentro de uma bandeja com água. A altura de água na bandeja era de um terço da altura da amostra, isto é, 2,0cm. Após a imersão da amostra na água, eram anotados o tempo de saturação, o tempo em que começava a aparecer fissuração e, finalmente, o tempo de desagregação da amostra, se fosse o caso. As fotos 14 a 17 ilustram este ensaio.

Os resultados dos ensaios podem ser assim resumidos: os solos colúvio e IA não se desagregavam mesmo após 24 horas de ensaio. Os solos IB e IC se desagregaram. O primeiro levou aproximadamente 12 horas, enquanto para o segundo temos dois casos a considerar:

- 1) foliação semi-vertical - tempo aproximado de 5 minutos
- 2) foliação semi-horizontal - tempo aproximadamente igual a 40 minutos.

A tabela VII.3, contém informações mais detalhadas sobre os ensaios.

Comparando-se os resultados desses ensaios com o comportamento com relação a erosão dos solos estudados, observa-se: que os solos com Bom comportamento (colúvio e IA) não se desintegraram. Os solos com Mau comportamento (IB e IC) desintegraram-se.

Estas informações devem ser encaradas com certa reserva, em face do pequeno número de amostras e solos ensaiados.

Os poucos dados analisados parecem indicar ser o Ensaio de Desagregação um bom índice qualitativo na previsão do comportamento dos solos com relação à erosão.

## VII.7 - LIMITE DE ABSORÇÃO

Este parâmetro de solo foi definido e usado pela primeira vez, por especialistas portugueses quando pesquisavam o uso de solos lateríticos na construção de estradas.

Castro<sup>19</sup> define o limite de absorção (LA) como sendo a umidade absorvida por capilaridade por pastilhas usadas no ensaio de limite de contração (caso de amostra amolgada) ou ainda por amostra indeformada previamente preparada. Para esta última o limite de absorção será aqui denotado por LA'.

Todos os detalhes para execução e cálculo do ensaio, estão na bibliografia acima citada.

Em outro trabalho, Nascimento e Castro<sup>62</sup>, verificaram que os solos coesivos se comportam de maneira diferente, quando parcialmente submersos em água. Alguns solos se desagregam totalmente; outros, apenas parcialmente.

Para os solos grupados no primeiro caso, eles consideraram que sua coesão é Não Pétrica (predomina nos solos) e desaparece quando em contato com a água.

Para os solos do segundo caso, eles concluíram que sua coesão é composta por uma parcela Não Pétrica e por uma parcela por eles chamada de coesão Pétrica (predomina em rocha). Esta última é a responsável pela não desagregação do solo quando submerso em água.

Segundo os mesmos autores a coesão Pétrica é resultante da petrificação parcial do solo e pode ser avaliada através de seu grau de petrificação (GP)\*.

---

\* Nascimento, U; Branco, F; Castro, E.<sup>63</sup>

$$GP = \frac{LC}{LA} \quad (\text{amostra amolgada}) \quad LC - \text{Limite de Contração}$$

$$GP = \frac{ho}{LA'} \quad (\text{amostra indeformada}) \quad ho - \text{Umidade teórica calculada para uma amostra indeformada correspondente a um grau de saturação } S = 100\%, \text{ sem variação de volume.}$$

Teoricamente para um material totalmente p trico (rocha)  $GP \gg 1$  e para material parcialmente p trico (solo)  $GP < 1$ . Obvia-mente quanto maior for o grau de petrificação maior será a resis-t ncia do solo   a  o desagregadora da  gua.

Os autores citam ainda que a petrificação dos solos está muito ligada às suas características expansivas.

Para estudar o comportamento dos solos coesivos com rela-  o a erosão, os mesmos autores chamaram o solo cuja coesão era não p trica de solos coesivos sem petrificação, e os outros de solos coesivos com petrificação.

Solos Coesivos Sem Petrificação - Para este tipo de solo, eles concluem que a quantidade e a qualidade da fração fina dos grãos são elementos extremamente importantes no seu comportamen-to com relação   erosão.

O trabalho apresenta ainda valores limites de algumas pro-priedades de solos com Bom comportamento em relação   erosão. Es-tes valores são:

$$40\% \leq \begin{matrix} \text{percentagem dos grãos} \\ \text{passando na } \# 40 \end{matrix} \leq 90\%$$

$$\text{EXPANSIBILIDADE, } E \text{ (LNEC)} \leq 10$$

$$\text{ÍNDICE DE PLASTICIDADE, } IP \geq 4$$

Solos Coesivos Com Petrificação - Já se definiu o GP para amostra indeformada como sendo a relação entre  $\frac{h_o}{LA}$ ,;  $h_o = \frac{e}{\delta} \times 100$  é uma unidade teórica que corresponde a saturação total do solo sem variação de volume e depende de sua umidade natural. Se o li-mite de absorção for menor ou igual a  $h_o$  teremos  $GP \gg 1$ , o que indica ser o material p trico, portanto muito resistente a ero-são pela  gua.

Normalmente se observa que quando se coloca uma amostra de solo em contato com a água, ela absorve água, tendendo a se satu-rar e expandir-se de tal maneira que o GP vem a ser  $< 1$ , o que acarreta ser o solo um material facilmente erodível pela  gua.

Partindo desses princípios, Nascimento e Castro<sup>62</sup>, determinaram uma relação matemática entre  $LA'$ ,  $h_o$  e expansibilidade do solo que serve para identificar os solos resistentes ou não à erosão. A seguir detalharemos a tal relação.

Sabendo-se que são válidas as relações:

$$1) e.S = \delta.h;$$

$$2) e = \frac{V_v}{V_s};$$

$$3) V_t = V_v + V_s;$$

$$4) E\% = \frac{\Delta V}{V_o} \times 100.$$

Onde:

E - expansibilidade

e - índice de vazio de solo

S - grau de saturação do solo

$\delta$  - peso específico real do solo

h - umidade do solo

$V_t$  - volume total

$V_v$  - volume dos grãos do solo

$V_s$  - volume de vazios no solo

a expansibilidade do solo que sofre uma variação de umidade  $\Delta h$  é:

$$E = \frac{e}{1+e_1} \times 100\%;$$

$e_1$  - índice de vazios na umidade inicial.

Caso esta variação de umidade corresponda a variação de  $h_o$  para  $LA'$ , teremos:

$$E = \frac{e}{1+e_o} \times 100 = \frac{\delta/S (LA'-h_o)}{1 + \frac{\delta h_o}{s}} \times 100\%$$

Como  $S = 100\%$  temos  $E = \frac{\delta/100 (LA' - h_o)}{1 + \frac{\delta h_o}{100}} \times 100$

Donde  $LA' = (1 + \frac{E}{100}) h_o + \frac{E}{\delta}$

Sendo  $\delta$  uma constante do solo e a expansibilidade máxima tal que assegure um bom comportamento do solo quanto à erosão, os autores concluíram que a relação entre  $LA'$  e  $h_o$  é a forma:

$$LA' \leq a h_o + b$$

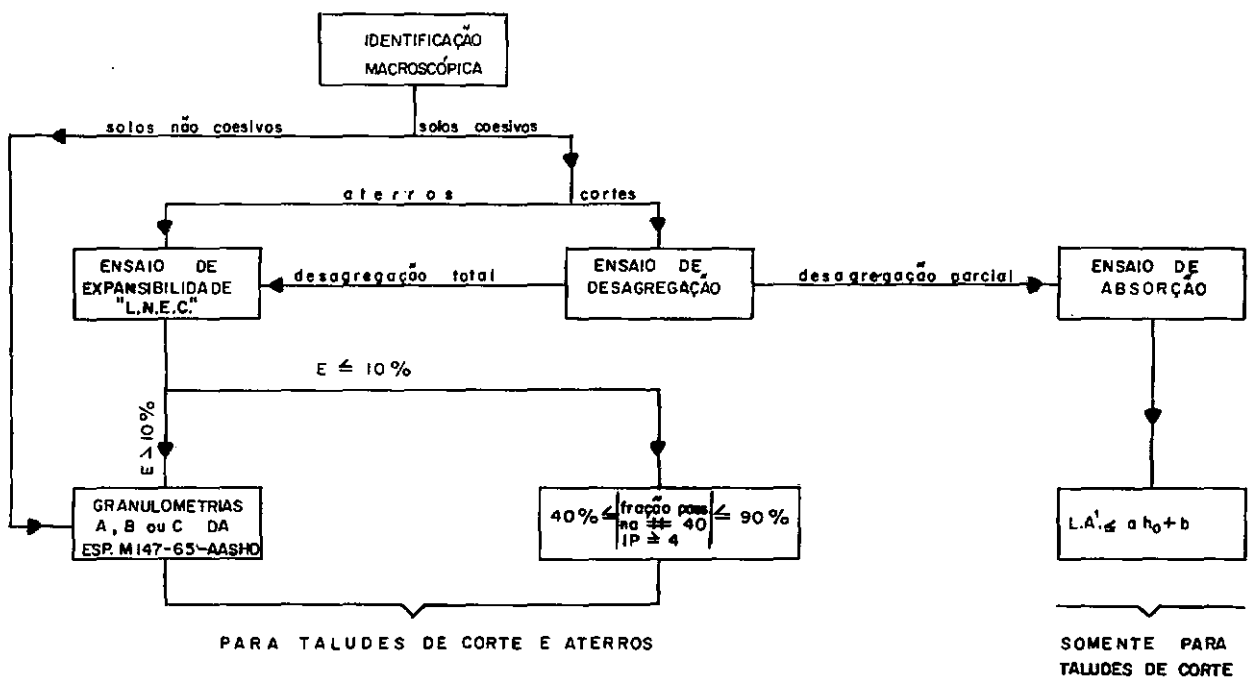
Onde

$$a = 1 + \frac{E}{100}$$

$$b = \frac{E}{\delta}$$

Os mesmos autores apresentam um esquema (aqui reproduzido) para identificação dos solos resistentes à erosão.

### FLUXOGRAMA



### ETAPAS PARA SELEÇÃO DE SOLOS RESISTENTES A EROSÃO

Vamos comparar os dados obtidos de observações de campo e de ensaio de laboratório dos solos estudados com os critérios por eles desenvolvidos.

Consideremos inicialmente que os 4 tipos de solos aqui estudados, tenham se desagregado totalmente quando em contato com a água o que caracteriza solos sem petrificação. Neste caso iremos classificá-los de acordo com o fluxograma.

O colúvio apresenta: expansibilidade  $< 10\%$  (6%), percentagem dos grãos passando na ~~#~~ 40,  $> 40\%$  e  $< 90\%$  (79%) e índice de plasticidade  $> 4$  (29). Portanto este critério o classifica com Bom comportamento.

O horizonte IA apresenta uma expansibilidade  $> 10\%$  (12%) o que leva a ser sua granulometria fundamental como referência para seu comportamento com relação à erosão. Pela especificação M 147-65 da AASHO\*, recomendada pelos autores Nascimento e Castro, o solo IA não é classificado como A, B ou C, o que o identifica como tendo Mau comportamento.

O horizonte IB teve uma expansibilidade  $> 10\%$  (15%). Pelas mesmas razões vistas para o horizonte IA, e pela mesma especificação o solo IB foi também classificado como tendo Mau comportamento.

O horizonte IC, apresentou expansibilidade  $< 10\%$  (9,7%), percentagem passando na ~~#~~ 40  $> 40\%$  e  $< 90\%$  (54%) e índice de plasticidade  $IP < 4$  (NP). Esta última característica foge ao valor limite para solo com Bom comportamento, o que obviamente o classifica como tendo Mau comportamento.

Resumindo, observamos que dos 4 solos estudados, apenas o horizonte IA não teve seu comportamento por nós considerado, confirmado por este critério, dos autores portugueses.

---

(\*) Standard Specifications for Highway Materials and Methods of Sampling and Testing - The American Association of State Highway Officials (1966).



Vamos agora considerar que todos os solos tenham se desagregado apenas parcialmente quando em contato com a água. Pelo critério apresentado por Nascimento e Castro, os solos com Bom comportamento devem satisfazer a condição:

$$LA' \leq ah_o + b$$

Usando os dados dos ensaios dos solos aqui estudados, obtemos:

Colúvio -  $LA' = 36,1 < 40,4$  - Comportamento Bom

Horizonte IA -  $LA' = 35,3 < 37,0$  - comportamento Bom

Horizonte IB -  $LA' = 44,1 > 39,8$  - Comportamento Mau

Horizonte IC -  $LA' = 57,2 > 40,9$  - Comportamento Mau

Por estes resultados se observa que todos os solos aqui estudados tiveram a classificação de seus comportamentos feita por nós confirmada pelo critério apresentado por Nascimento e Castro.

Seguindo rigidamente o esquema adotado pelos autores acima citados, observamos que o comportamento dos solos IB e IC seria identificado pelo primeiro caso (Desagregação Total) e o comportamento do Colúvio e do solo IA pelo segundo caso (Desagregação Parcial). Em face disto os 2 primeiros (IB e IC) seriam classificados como tendo Mau comportamento e os 2 últimos (Colúvio e IA) como tendo Bom comportamento, o que novamente vem confirmar nossa previsão.

Para finalizar este capítulo, concluímos que o método aqui apresentado é válido para identificação dos comportamentos dos solos quanto à erosão. Salientamos entretanto a necessidade da continuação desse trabalho em outros tipos de solos, no sentido de obter maior confirmação do método, inclusive com estudo estatístico dos resultados.

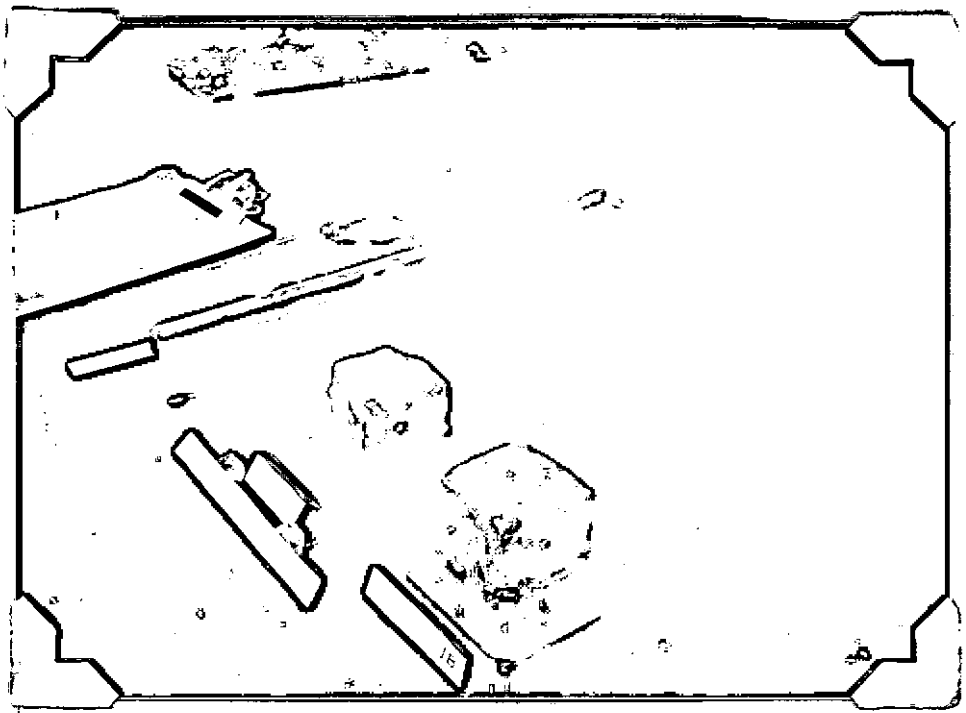


Foto 14 - Ensaio de desagregação - amostras  
de colúvio e horizonte IB

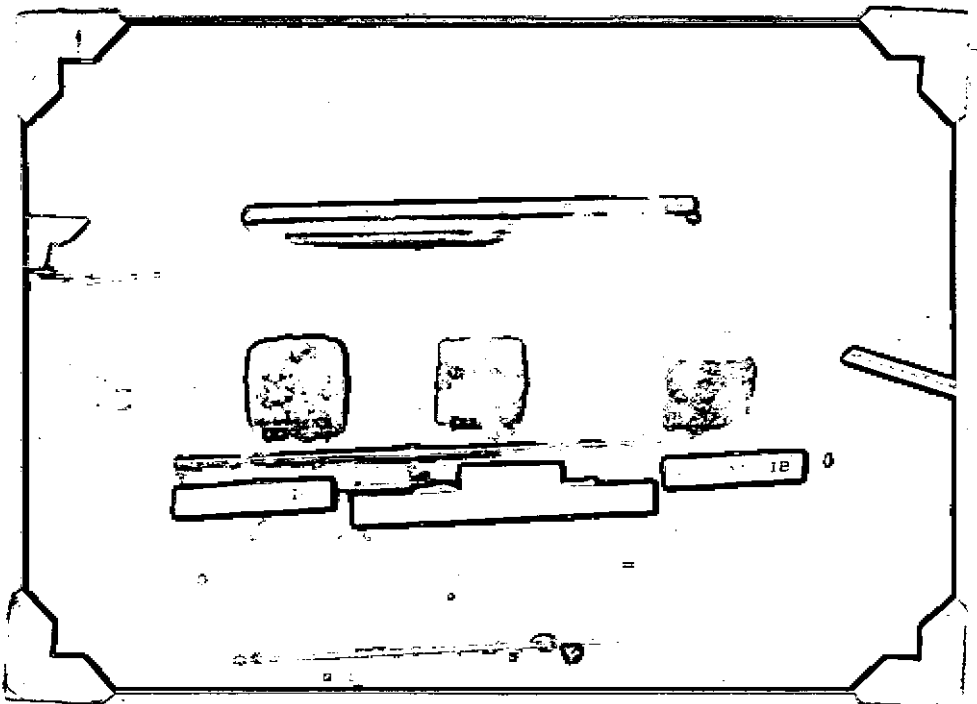


Foto 15 - Idem foto 14 com mais uma amostra  
do horizonte IC

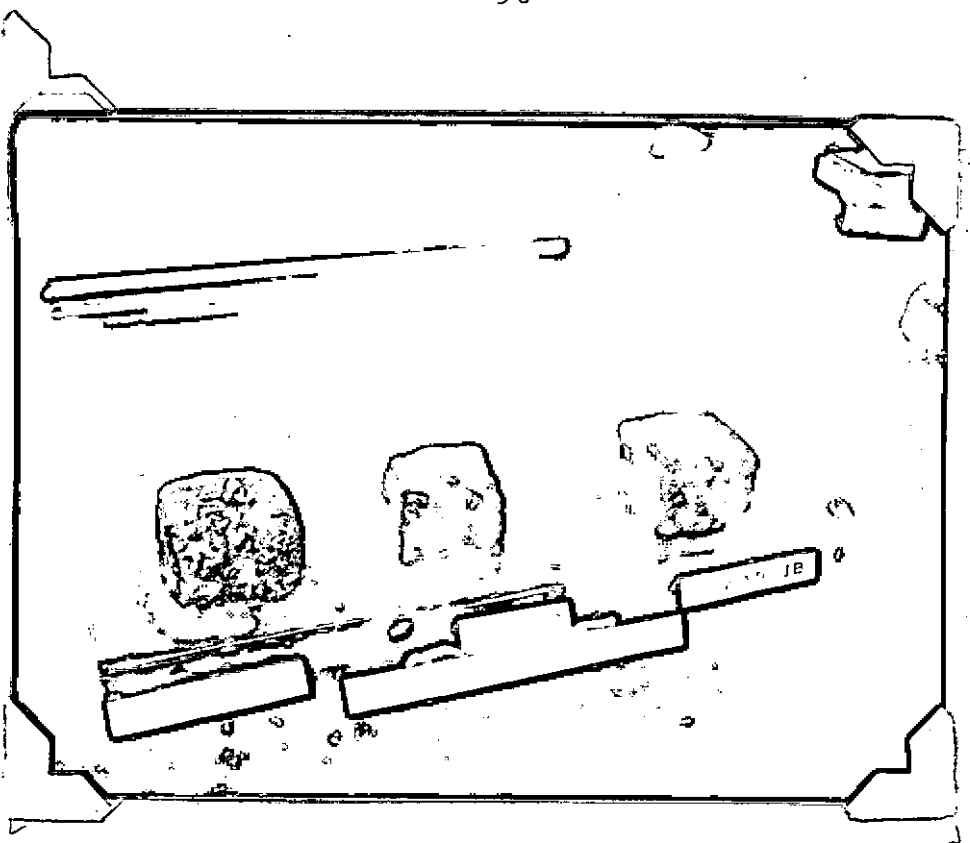


Foto 16 - Idem foto 15 - Aparecimento de fissuras  
na amostra do horizonte IC

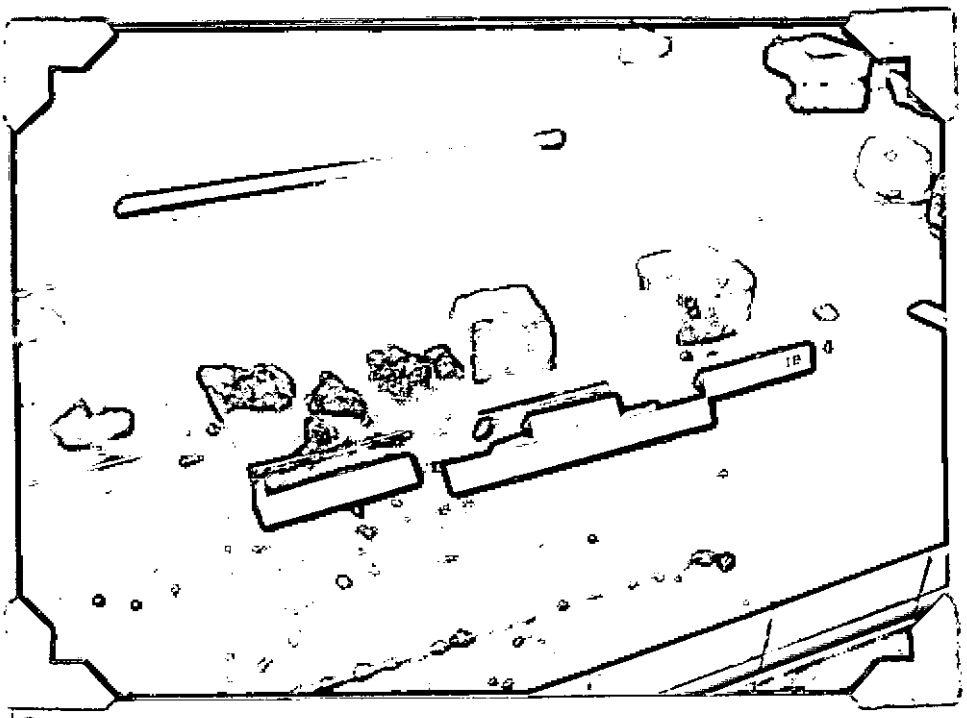


Foto 17 - Idem foto 15 - Desagregação total da  
amostra do horizonte IC

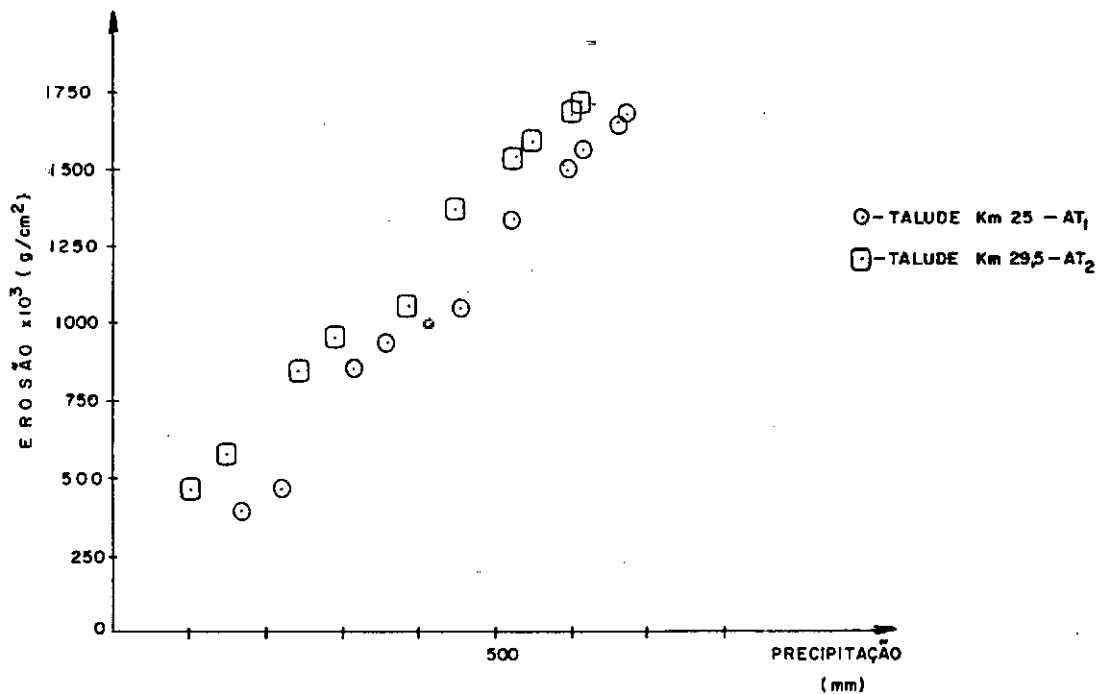


FIG. VIII. 3 - EROSÃO x PRECIPITAÇÃO (ACUMULADAS)

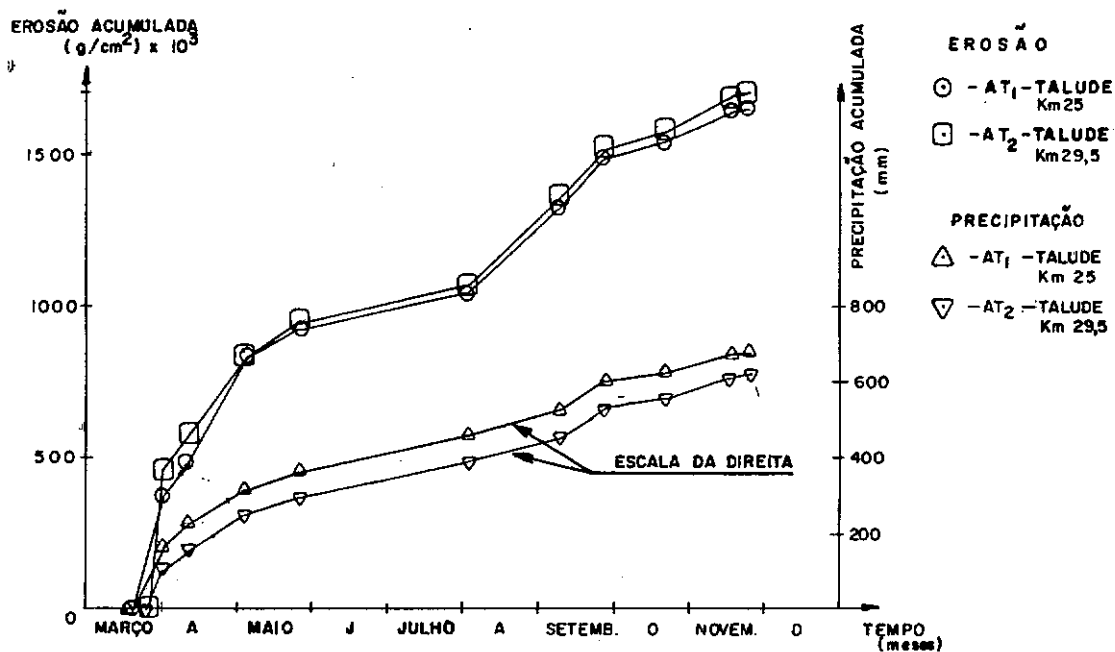
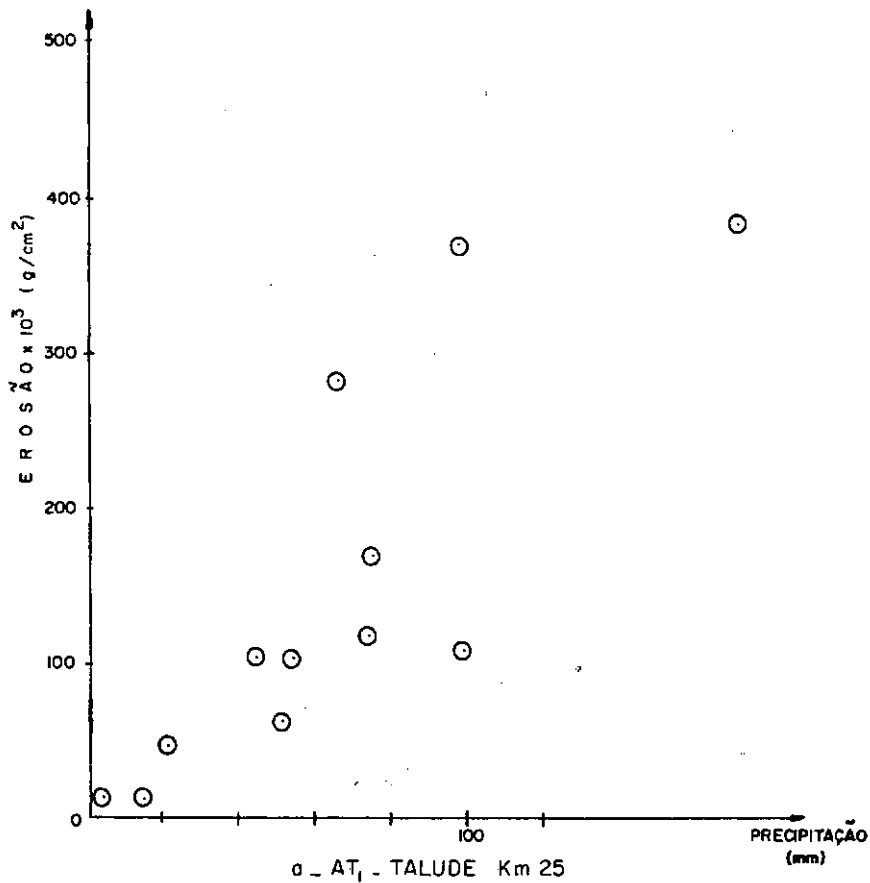
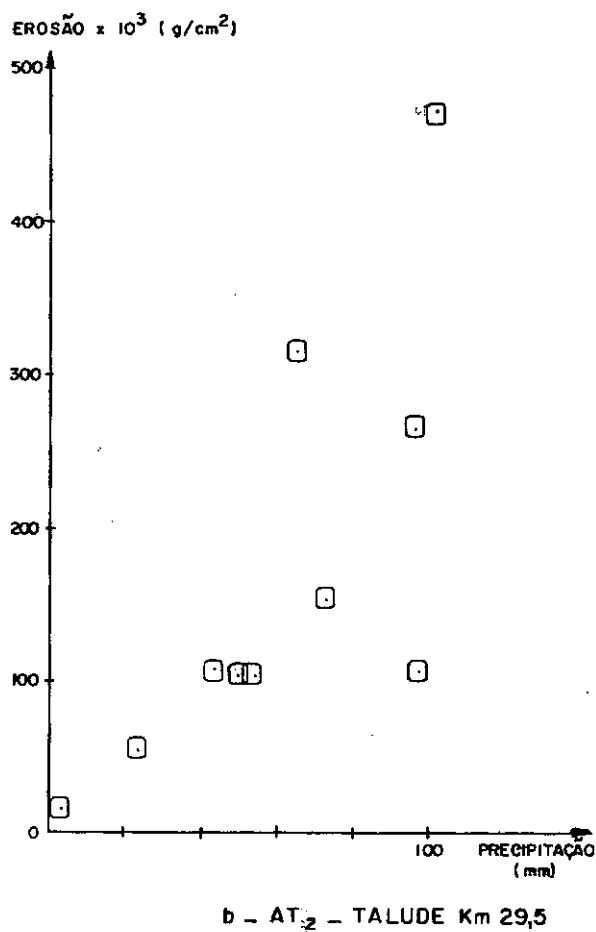


FIG. VIII. 4 - EROSÃO e PRECIPITAÇÃO x TEMPO.



**FIG. VIII.2.**  
**EROSÃO x PRECIPITAÇÃO**  
**(parcels)**



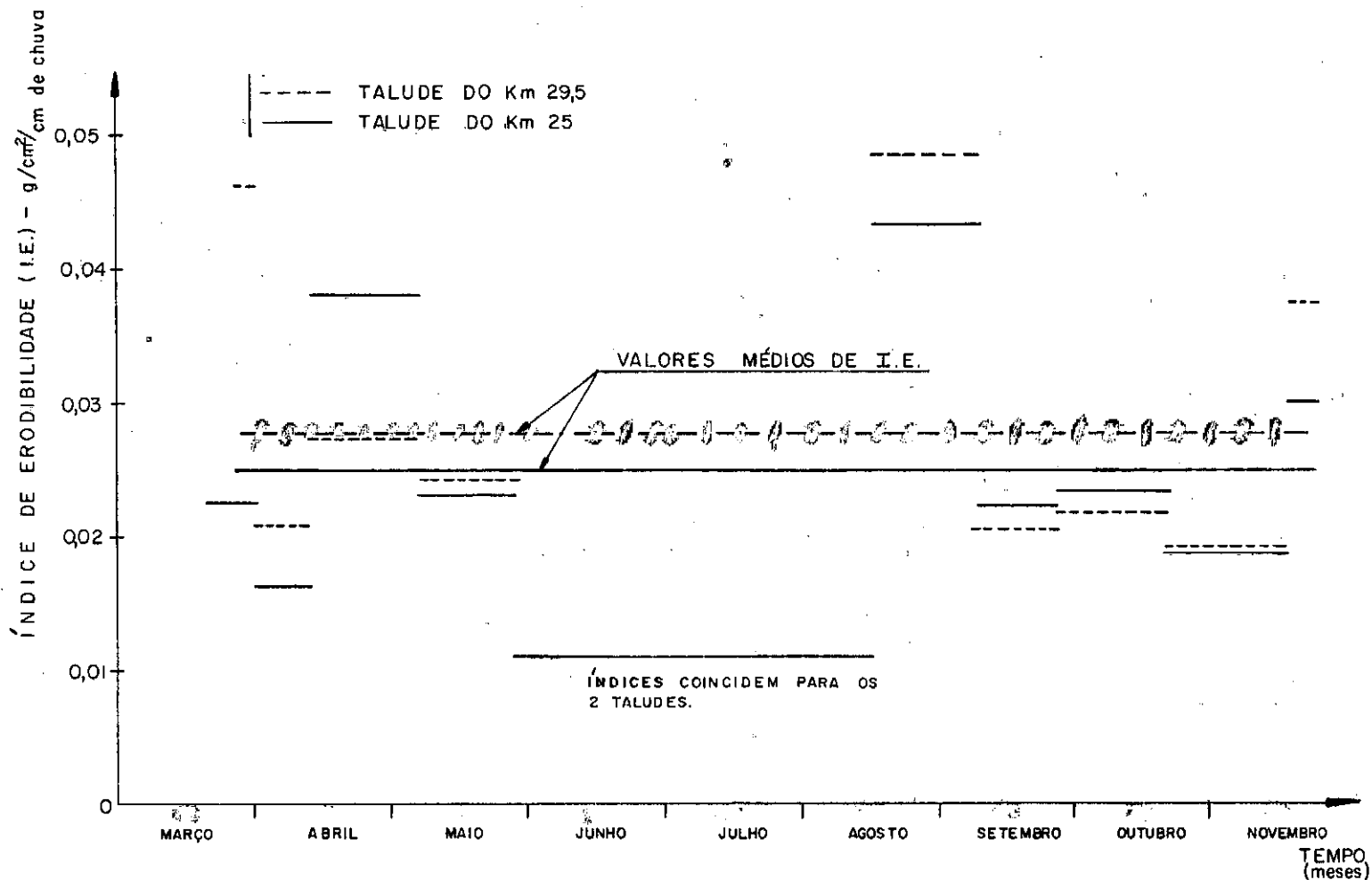


FIG. VIII.1 - ÍNDICE DE ERODIBILIDADE x TEMPO  
VARIAÇÃO DO I.E. ENTRE CADA PERÍODO DE OCORRÊNCIA

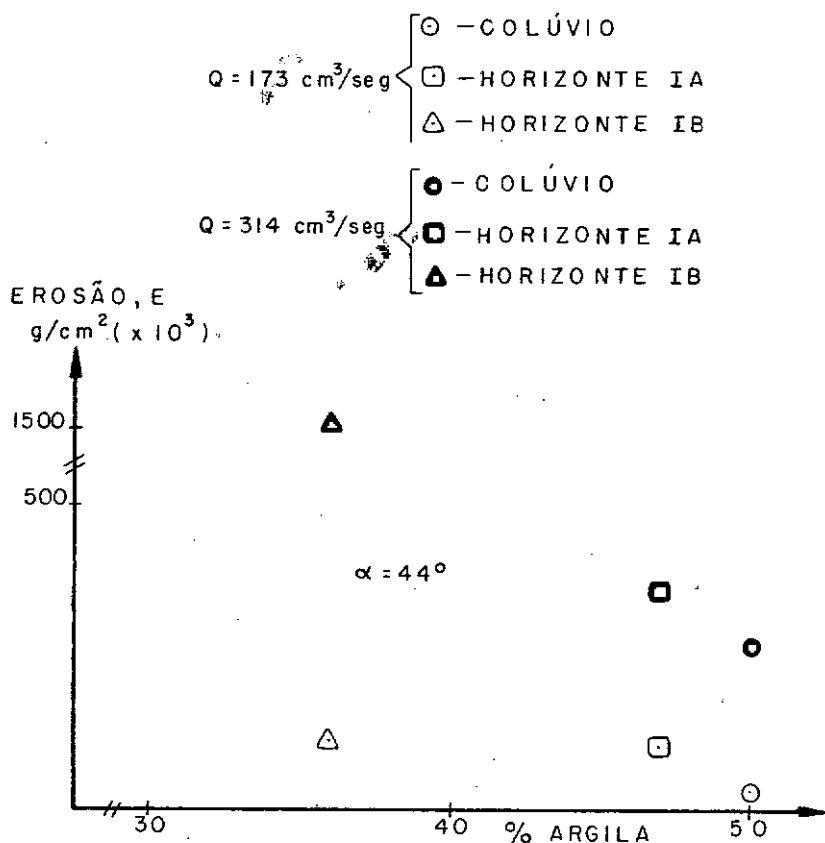


FIGURA: VII-2-EROSÃO x % DE ARGILA NO SOLO.

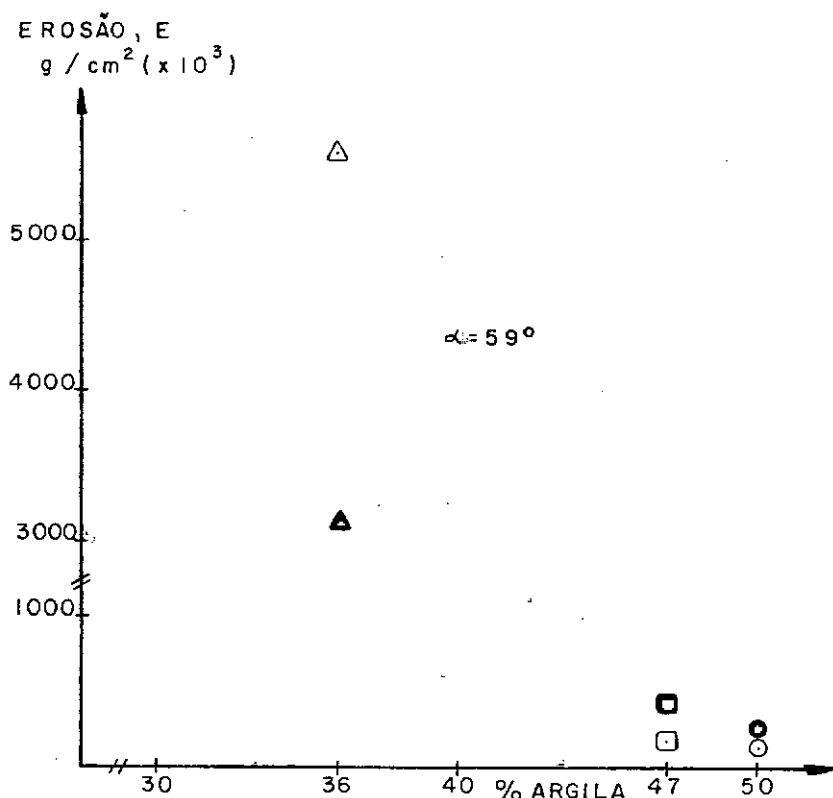


FIGURA: VII-3-EROSÃO x % DE ARGILA NO SOLO.

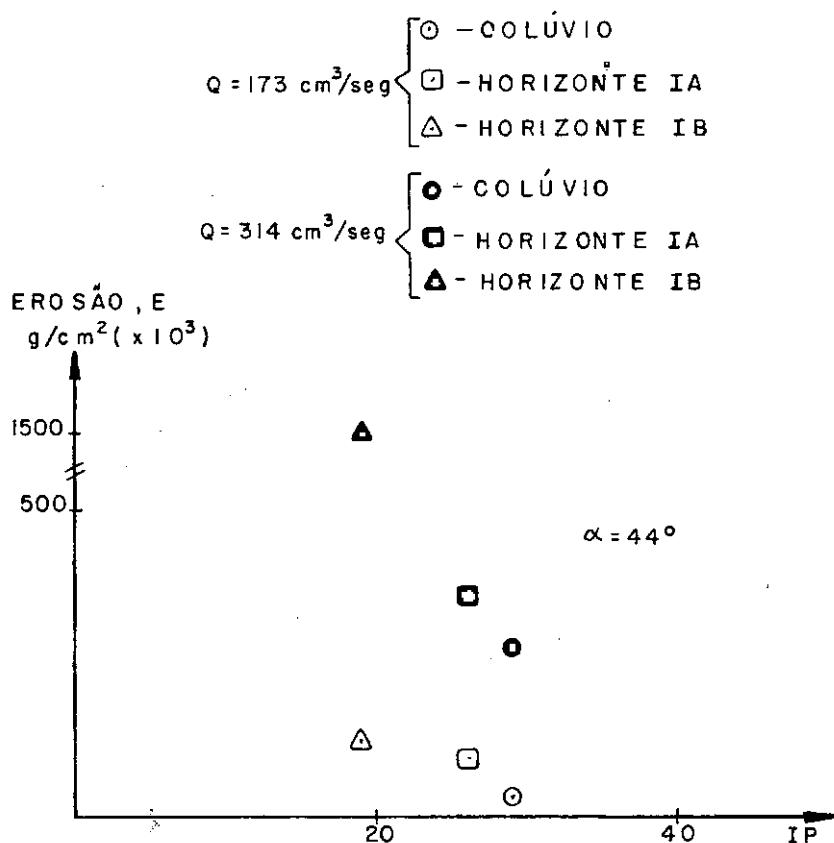


FIGURA: VII-4-EROSÃO x ÍNDICE DE PLASTICIDADE.

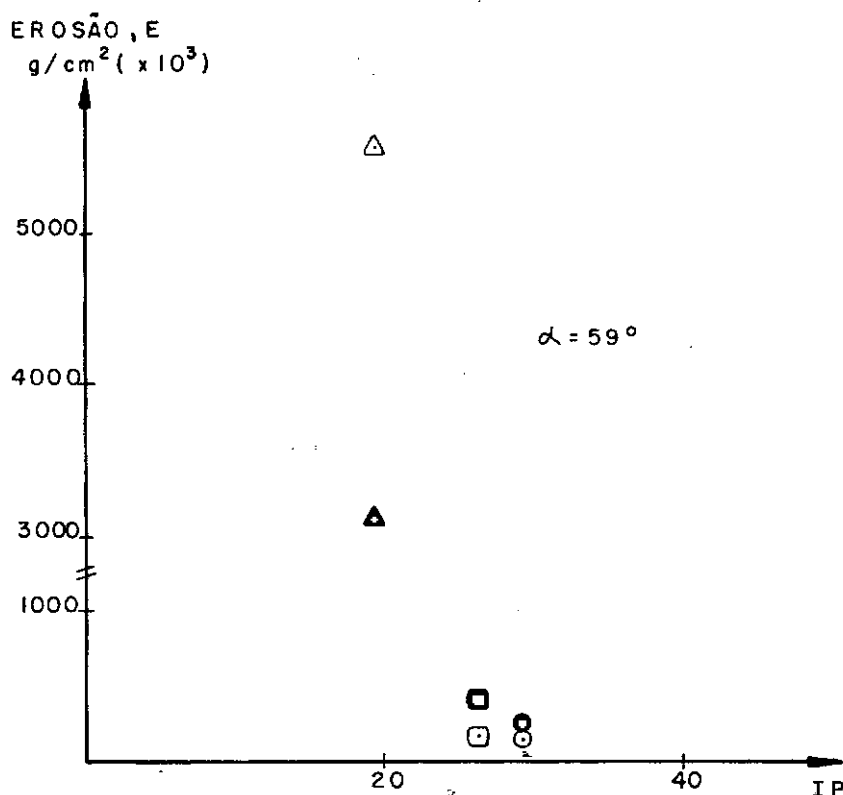


FIGURA: VII-5-EROSÃO x ÍNDICE DE PLASTICIDADE.



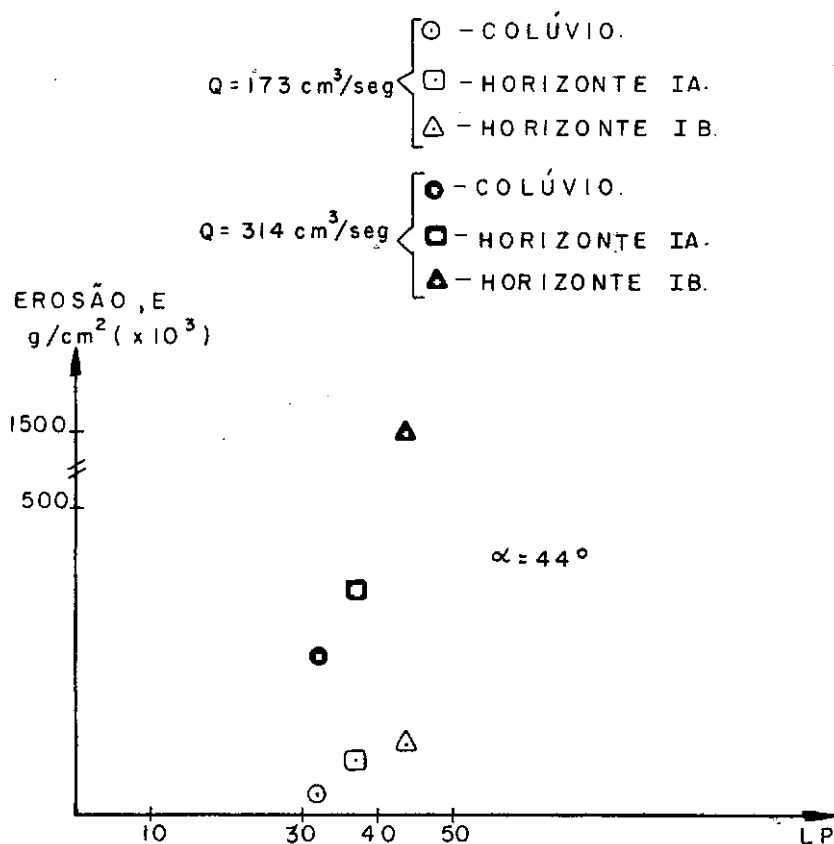


FIGURA VII-6-EROSÃO x LIMITE DE PLASTICIDADE.

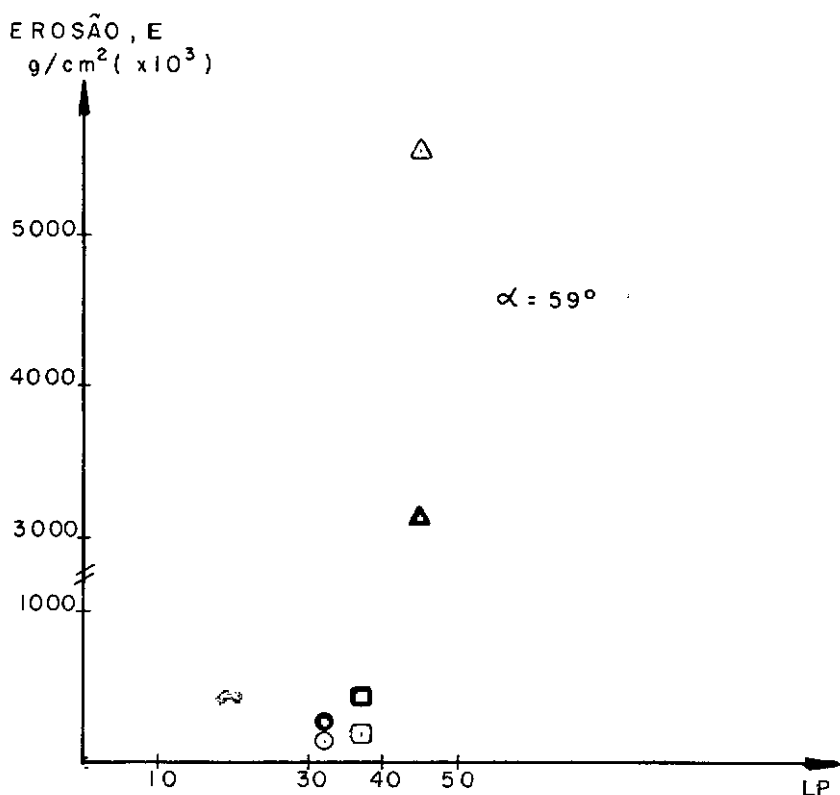


FIGURA VII-7-EROSÃO x LIMITE DE PLASTICIDADE.

- $Q = 173 \text{ cm}^3/\text{seg}$ 
  - - COLUVIO
  - - HORIZONTE IA
  - △ - HORIZONTE IB
- $Q = 314 \text{ cm}^3/\text{seg}$ 
  - - COLÚVIO
  - ◼ - HORIZONTE IA
  - ▲ - HORIZONTE IB

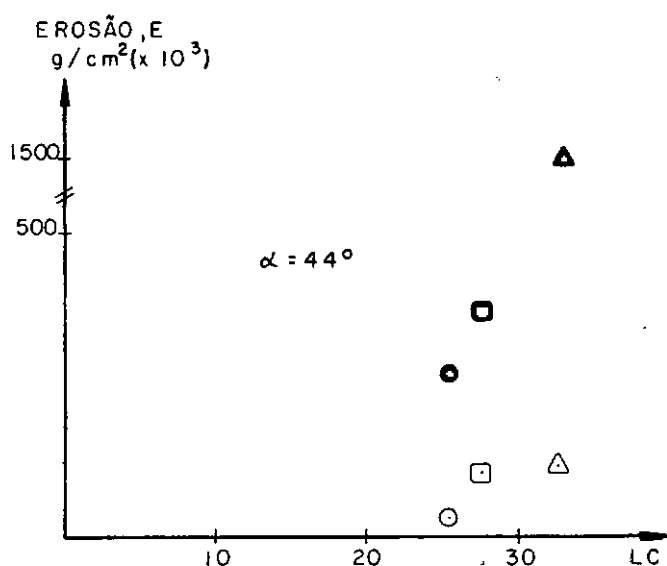


FIGURA VII-8-EROSÃO x LIMITE DE CONTRAÇÃO.

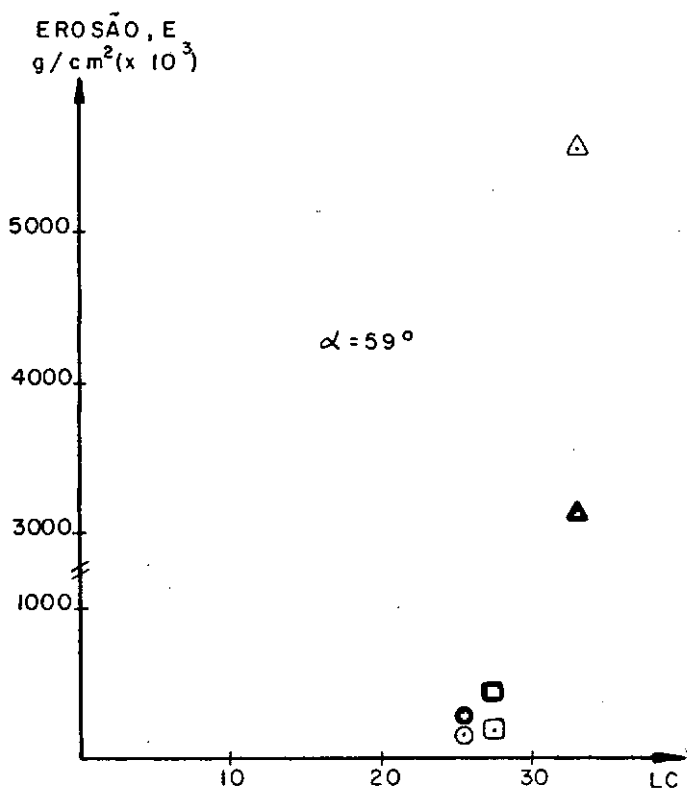


FIGURA VII-9-EROSÃO x LIMITE DE CONTRAÇÃO.

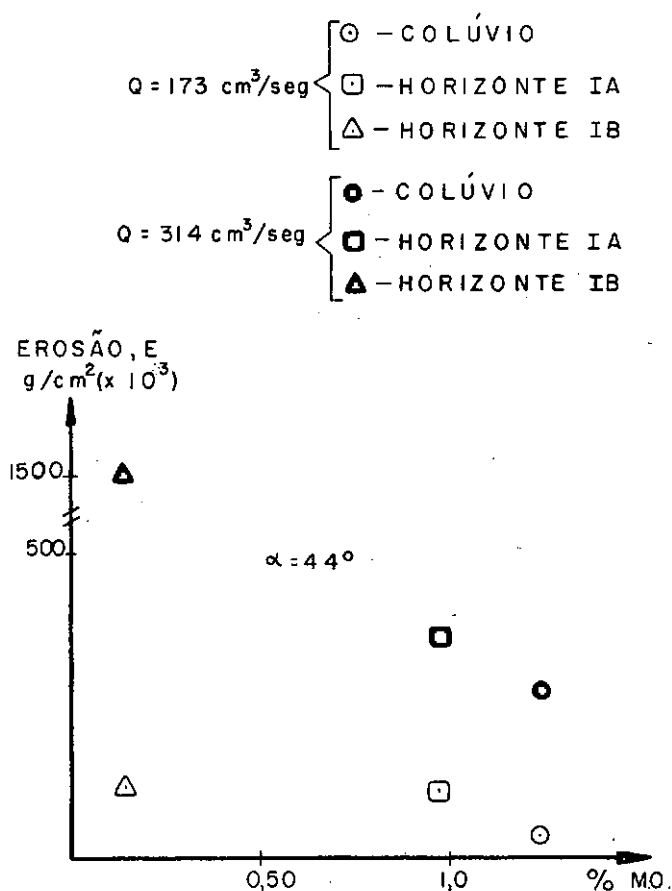


FIGURA VII-10-EROSÃO x % MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO.

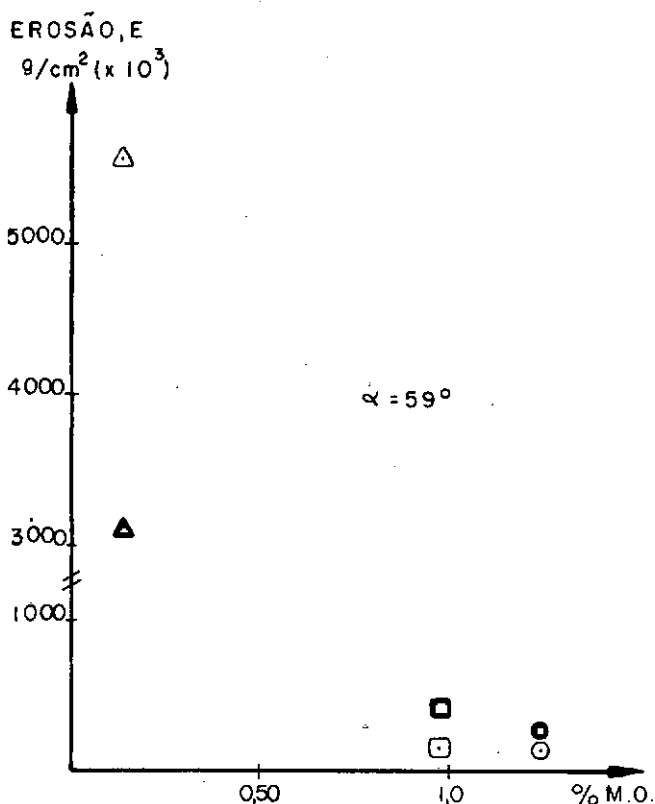


FIGURA VII-11-EROSÃO x % MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO.

- $Q = 173 \text{ cm}^3/\text{seg}$ 
  - - COLÚVIO
  - - HORIZONTE IA
  - △ - HORIZONTE IB
- $Q = 314 \text{ cm}^3/\text{seg}$ 
  - - COLÚVIO
  - - HORIZONTE IA
  - ▲ - HORIZONTE IB

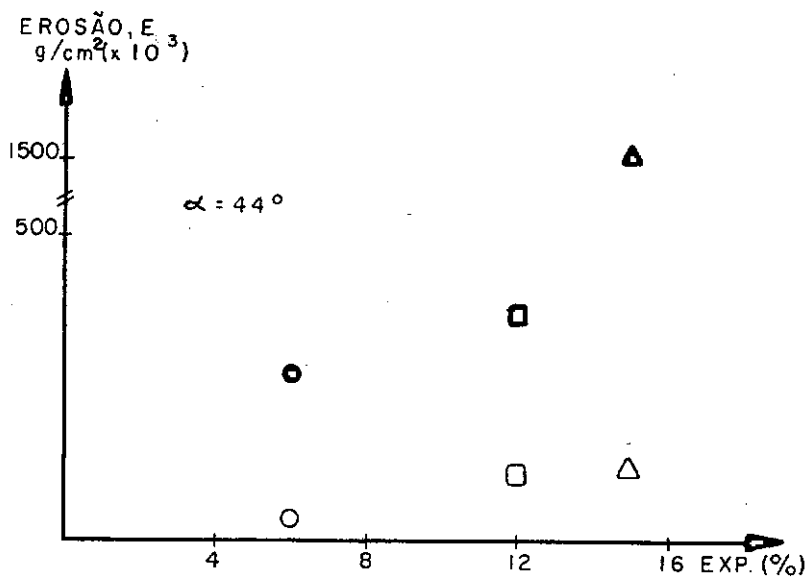


FIGURA VII-12-EROSÃO x EXPANSIBILIDADE (LNEC)

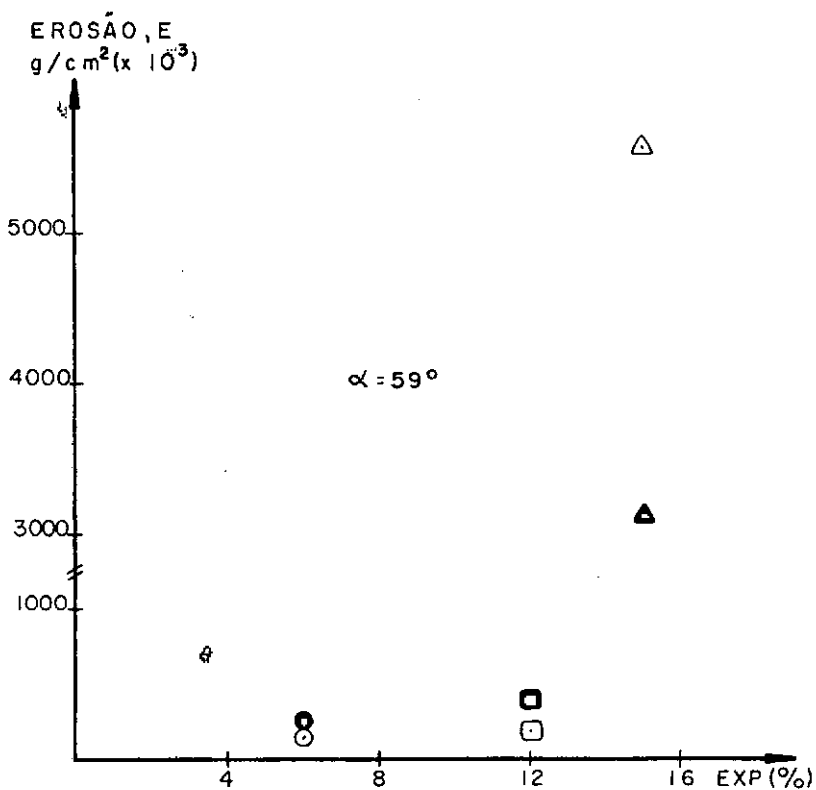


FIGURA VII-13-EROSÃO x EXPANSIBILIDADE (LNEC)

TABELA VII.3 - ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

TIPO DE SOLO		CORPO DE PROVA	TEMPO (minutos)		
			SATURAÇÃO	APARECIMENTO DE FISSURAS	DESAGREGAÇÃO
COLÚVIO		1	8	—	—
		2	3,5	—	—
		3	5,4	—	—
HORIZONTE I-A		1	4,7	—	—
HORIZONTE I-B		1	5,0	—	720,0
		2	14,4	2,0	720,0
		3	5,8	—	720,0
		4	24,0	42,0	720,0
HORIZONTE I-C	(1) SUB - VERTICAL	1	1,2	3,0	4,1
		2	0,7	1,2	3,5
		3	2,0	2,5	4,5
	(1) SUB - HORIZONTAL	1	1,9	4,2	34,5
		2	1,6	3,0	40,1

(1) FOLEAÇÃO DA AMOSTRA.

**TABELA VIII.2 - ÍNDICE DE ERODIBILIDADE**

PERÍODO	EROSÃO (g/cm <sup>2</sup> )		PRECIPITAÇÃO (mm)		ÍNDICE DE ERODIBILIDADE (g/cm <sup>2</sup> /cm de chuva)	
	Km 25	Km 29,5	Km 25	Km 29,5	Km 25	Km 29,5
19/3 — 31/3 26/3 — 31/3 *	0,382	0,468 *	170	101 *	0,0225	0,0463
01/4 — 12/4	0,086	0,105	51	51	0,0169	0,0206
13/4 — 05/5	0,369	0,264	57	97	0,038	0,0272
06/5 — 26/5	0,101	0,106	44	44	0,0230	0,0241
27/5 — 01/8	0,106	0,105	98	98	0,0108	0,0108
02/8 — 09/9	0,281	0,313	65	65	0,432	0,0482
10/9 — 26/9	0,166	0,151	74	74	0,0224	0,0204
27/9 — 20/10	0,049	0,052	21	21	0,0233	0,0217
21/10 — 17/11	0,101	0,103	54	54	0,0187	0,0191
18/11 — 24/11	0,012	0,015	4	4	0,03	0,0375
* período referente a área teste AT <sub>2</sub>  <div>MÉDIA</div> <div>INTERVALO</div>					0,0269	0,0276
					0,0108 a 0,0432	0,0108 a 0,0482

**TABELA VIII.1 - EROÇÃO E PRECIPITAÇÃO**

PERÍODO	VOLUME DE SOLO ERODIDO DAS ÁREAS-TESTE.(m³)		EROSÃO NAS ÁREAS- TESTE x 10³ (g/cm²)		PRECIPITAÇÃO TOTAL NAS ÁREAS-TESTE.(mm)		OBSERVAÇÕES
	TALUDE Km 25	TALUDE Km 29,5	TALUDE Km 25	TALUDE Km 29,5	TALUDE Km 25	TALUDE Km 29,5	
19/3 — 31/3	0,381	(1) 0,415	382	468	170	(1) 101	24/3 — 19,8 mm EM UMA HORA.
26/3 — 31/3 <sup>(1)</sup>							25/3 — 44,7 mm — 10,1 mm ENTRE 15 e 16 hs. 26 mm " 21 e 22 hs. 26/3 — 98,9 mm — 34 mm ENTRE 19 e 20 hs. 51,2 mm " 20 e 21 hs.
01/4 — 12/4	0,086	0,093	86	105	51	51	01/4 — 20,8 mm 02/4 — 21,3 mm
13/4 — 05/5	0,368	0,234	369	264	97	97	19/4 — 39,9 mm — 16,2 mm ENTRE 0 e 1 h. 20/4 — 17,9 mm 21,4 mm " 1 e 2 hs. 22/4 — 17,9 mm
06/5 — 26/5	0,101	0,094	101	106	44	44	12/5 — 24,5 mm
27/5 — 01/8	0,106	0,094	106	106	98	98	19/7 — 58,3 mm
01/8 — 09/9	0,280	0,278	281	313	65	65	01/9 — 17 mm 02/9 — 18 mm
10/9 — 26/9	0,166	0,134	166	151	74	74	18/9 — 21 mm — 10,5 mm EM 24 min. 21/9 — 19,5 mm — 14,3 mm EM 90 min. 24/9 — 23 mm — 20 mm EM 8 min.
27/9 — 20/10	0,049	0,046	49	52	21	24	NÃO FOI REGISTRADA CHUVA INTENSA.
21/10 — 17/11	0,101	0,090	101	103	54	54	12/11 — 15 mm 15/11 — 26 mm
18/11 — 24/11	0,012	0,013	12	15	4	4	

PESO ESPECÍFICO APARENTE DO SOLO SECO ERODIDO DAS ÁREAS-TESTE

$$\gamma_{AT_1} = 1,002 \text{ g/cm}^3 \quad \gamma_{AT_2} = 1,123 \text{ g/cm}^3$$





## VIII - RESULTADOS DAS OBSERVAÇÕES E COLETAS DE DADOS NO CAMPO

### VIII.1 - EROSÃO DAS ÁREAS-TESTE

As medições da erosão no campo estão sendo feitas em 2 Áreas-teste implantadas nos taludes dos kms 25 ( $AT_1$ ) e 29,5 ( $AT_2$ ) da Rodovia Presidente Dutra, trecho Rio de Janeiro- São Paulo, ambos do lado esquerdo.

As áreas são quadradas e medem 10m de lado. O material erodido dessas áreas é levado por um sistema de canaletas e depositado em 3 anéis que servem de reservatório, como mostram as fotos 8 e 9.

Na parte à montante dos taludes onde se encontram as áreas, estão instalados 2 pluviômetros que medem as precipitações ocorridas nesses locais.

A  $AT_1$  está implantada de modo a abranger os solos colúvio (pequena parte superior), Horizonte IA e IB (parte central) e Horizonte IC (pequena parte inferior), foto 8.

A  $AT_2$  acha-se localizada quase que exclusivamente no horizonte IC, com uma pequena parte superior no Horizonte IA, foto 9.

O volume do material erodido das áreas em estudo, era determinado através das medições das alturas de solo sedimentado nos anéis coletores. Em algumas oportunidades os anéis eram limpos e parte do solo erodido era trazido para o laboratório, a fim de se fazer sua caracterização. Os resultados dos ensaios executados nos solos erodidos da  $AT_1$  e da  $AT_2$  estão anotados na Tabela IV.1.

O peso do solo seco correspondente ao volume medido, era calculado usando-se o peso específico aparente seco ( $\gamma_s$ ) do solo, que se encontrava depositado nos anéis coletores. Para determinação de  $\gamma_s$ , usavam-se anéis (moldes) biselados com 6cm de diâmetros e 2cm de altura. Da maneira como o solo encontrava-se sedimentado nos anéis coletores, moldavam-se as amostras com os

anéis biselados, de modo que o material ocupasse todo o seu volume. Após esta operação os moldes eram lavados em beckers, tendo-se o cuidado para que não houvesse perda do solo, depois então esses beckers eram postos na estufa a  $110^{\circ}\text{C}$  até peso constante. De posse do peso do solo seco e do volume do anel biselado calculava-se o peso específico aparente do solo seco.

Conhecido o peso do solo seco erodido, calculavam-se então os valores da erosão para cada período. Estes valores constam de tabela VIII.1.

Paralelamente a estas coletas, os pluviôgrafos iam registrando todos os dados de chuva, como quantidade e intensidade da precipitação ocorrida durante cada período.

Abrindo-se um parêntese, informamos que as áreas foram concluídas em março de 77 e os pluviôgrafos só foram instalados em agosto do mesmo ano. Durante este período (março a agosto de 77), os dados de chuva considerados foram os registrados pela estação pluviométrica localizada próximo ao km 16 da Rodovia Presidente Dutra, no Município de Nova Iguaçu, que pertence atualmente à SERLA.

#### VIII.2 - OBSERVAÇÕES DE CAMPO

Através de observações qualitativas feitas nos taludes de cortes ao longo da Rodovia Presidente Dutra, pode-se concluir:

- O Colúvio geralmente achava-se menos erodido do que os outros solos.
- Os Horizontes IA e IB normalmente apresentavam-se erodidos. O segundo quase sempre mais do que o primeiro.
- O Horizonte IC quando tinha uma camada superficial de matéria orgânica (limo), não apresentava nenhuma erosão. Quando não tinha esta camada protetora, era o solo que mais erodia.

Com relação as Áreas-teste, observaram-se que:

- Da erosão total sofrida entre março e novembro pelas

Áreas-teste, aproximadamente 25% de Erosão em cada área ocorreu nos primeiros 13 dias da  $AT_1$  e apenas 6 dias da  $AT_2$ .

Para esses mesmos períodos de dias as percentagens da precipitação foram respectivamente 25, a 16% do total em cada área.

As curvas da figura 8.4 mostram maiores detalhes.

- O maior volume da erosão ocorreu nas partes inferiores das Áreas-teste. Na  $AT_1$  já pode-se notar a erosão por ravinamento em estágio inicial. Na  $AT_2$  a erosão é mais aparente através de sulcos (pedaços) de solos.

### VIII.3 - ÍNDICE DE ERODIBILIDADE (IE)

Os valores da erosão ocorrida nas Áreas-teste e as precipitações verificadas entre 19 de março a 24 de novembro de 77, possibilitaram a determinação de um Índice de Erodibilidade (IE). Este índice é expresso em  $g/cm^2/cm$  de chuva. Para as condições das áreas em estudo (inclinação  $\alpha = 43^\circ$ ) e para os respectivos solos (residuais de gnaiss), os valores médios dos índices foram 0,025 na  $AT_1$  e 0,028 na  $AT_2$ . As faixas de variação desses índices são de 0,011 a 0,043 e 0,011 a 0,048, respectivamente. Na tabela VIII.2, e na figura VIII.1 constam todos os valores dos índices, bem como os períodos correspondentes de sua ocorrência.

### VIII.4 - CORRELAÇÃO ENTRE A EROSÃO E A PRECIPITAÇÃO

Com o objetivo de se conhecer o comportamento da erosão das Áreas-teste em função das precipitações ocorridas, correlacionaram-se Erosão x Precipitação (parciais) e Erosão x Precipitação (acumuladas). Estes gráficos constam das figuras VIII.2 e VIII.3.

Para os gráficos do primeiro caso (Erosão x Precipitação, Parciais), observou-se que apesar de haver uma tendência definida, Maior Precipitação, Maior Erosão, a aplicação da regressão linear para os pares de pontos, mostrou coeficientes de correlação menores do que os observados para os gráficos do 2º caso (Erosão x Precipitação, acumuladas) que foi de 0,99.

Como o fenômeno erosivo é bastante complexo e depende de outras variáveis, tais como tipo de solo, condições de talude características da chuva, etc., a correlação entre a erosão e a precipitação provavelmente sempre vai apresentar alguns valores discrepantes. Outro fator que deve ser levado em consideração é o período relativamente curto de observações.

Para melhor ilustração, vamos mostrar as correlações encontradas entre Erosão e a Precipitação com aplicação de regressão linear. Chama-se atenção de que essas relações devem ser consideradas com reservas, face a pequena quantidade de dados disponíveis (10).

Erosão (E) ( $\text{g/m}^2$ ) e Precipitação (P) (mm)	Correlação Entre E e P		Fator de Correlação	
	AT <sub>1</sub> , km 25	AT <sub>2</sub> , km 29,5	AT <sub>1</sub> , km 25	AT <sub>2</sub> , km 29,5
Parciais	$E = 0,0056 + 0,0023P$	$E = -0,016 + 0,003P$	0,81	0,59
Acumuladas	$E = -0,0305 + 0,0025P$	$E = 0,2173 + 0,0024P$	0,99	0,99

Futuramente, com a coleta de novos dados, estas correlações serão aperfeiçoadas.

Um fator considerado importante na erosão dos solos é a intensidade de Precipitação (I). Para o nosso caso entretanto não foi possível nenhuma correlação entre ela e a erosão, porque as coletas foram feitas em espaço de tempo relativamente longo e não coincidiram com as grandes precipitações.

Com a continuação da pesquisa pretende-se que as coletas do material erodido das Áreas-Teste, sejam feitas com mais assiduidade (semanalmente) e também sempre após uma chuva de grande intensidade. Com isto provavelmente teremos dados mais detalhados, o que poderá proporcionar uma análise mais completa sobre a influência da intensidade de chuva na erosão.

Na tabela VIII.1, estão registradas as precipitações ocorridas durante cada período e as observações sobre as maiores inten

sidades da chuva verificadas nesses mesmos períodos.

TABELA VII.1 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS ESTUDADOS

TIPO DE SOLO	CAULINITA (%)	GIBSITA (%)	$Fe_2O_3 + TiO_2$ (%)	QUARTZO (%)	MATERIAL AMORFO (*) (%)
SOLO TRANSPOR- TADO (colúvio)	40,0	7,4	11,0	41,6	—
HORIZONTE I - A	61,6	—	7,9	30,5	—
HORIZONTE I - B	47,7	—	23,4	17,3	11,6

(\*)material amorfo — alúmino-silicatos mal cristalizados, não são acusados pelos raios-x

TIPO DE SOLO	MIN. ARGÍLICOS caulinita, clorita, montmorilonita (%)	MICA (muscovita) (%)	$Fe_2O_3$ (livre) (%)	QUARTZO + FELDSPATO (%)	$SiO_2$ amorfo $Al_2O_3$ amorfo MnO (*) $Fe_2O_3$ (%) restante
HORIZONTE I - C (saprolito)	15 — 20	6 — 10	2	70 — 80	(%) restante

(\*) ÓXIDOS

**TABELA VII.2-PARÂMETROS DE IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS SOLOS COM RELAÇÃO A EROSÃO.**

T I P O D E S O L O	VALORES LIMITES DAS PROPRIEDADES DOS SOLOS COM COMPORTAMENTO BOM OU REGULAR, SEGUNDO SANTOS e CASTRO (74).*					
	EXPANSIBILIDADE L N E C (E) E ≤ 11%	PARÂMETRO GRANULOMÉTRICO 0,52 ≤ a ≤ 0,92	49% ≤ $\left  \begin{array}{c} \text{FRAÇÃO DOS} \\ \text{GRÃOS PASS.} \\ \# 40 \end{array} \right  \leq 96\%$	LIMITE DE PLASTIC. LP ≤ 32	INDICE DE PLASTIC. IP ≤ 17	COMPORTAMENTO DOS SOLOS ESTUDADOS
COLÚVIO	6,0	0,80	79	32	29	BOM
HORIZONTE I - A	12,1	0,74	71	37	26	REGULAR - BOM
HORIZONTE I - B	15,0	0,90	97	44	19	REGULAR - MAU
HORIZONTE I - C	9,7	0,59	54	NP	NP	MAU





## IX - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

## - CONCLUSÕES

## A - DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

- 1 - O comportamento de cada solo com relação a erosão varia para cada condição de umidade.
- 2 - O COLÚVIO foi o mais resistente a Erosão na umidade natural e menos resistente na condição de após ressecamento.
- 3 - O solo do Horizonte IA apresentou-se mais resistente na condição de após embebição e menos resistente na condição de após ressecamento.
- 4 - Para o solo do Horizonte IB, não houve tendência definida face a grande dispersão dos resultados dos ensaios.
- 5 - O solo do Horizonte IC (SAPROLITO), quando ensaiado nas mesmas condições dos outros solos foi o menos resistente de todos. Quando ensaiado com a camada superficial de limo natural, praticamente não erodiu.
- 6 - Houve uma correlação bem definida entre o comportamento do solo com relação a erosão e os resultados dos ensaios de desagregação com amostras parcialmente submersas.
- 7 - Com relação as propriedades dos solos estudados quando comparadas com a erosão observou-se que quanto:
  - maior quantidade de argila menor sua erodibilidade.
  - maior índice de plasticidade menor sua erodibilidade.
  - maior expansibilidade maior sua erodibilidade.
  - maior grau de Petrificação (amostra indeformada) menor sua erodibilidade.

## B - DOS DADOS COLETADOS E OBSERVADOS NO CAMPO

- 1 - Observações de campo sobre o comportamento da erosão dos solos estudados, foram razoavelmente coincidentes com os resultados dos ensaios de laboratório.
- 2 - Os Índices de Erodibilidade das duas Áreas-Teste variaram de apenas 10%, sendo maior o IE da AT<sub>2</sub>. O valor médio desses 2 índices foi igual a 0,0263g/cm<sup>2</sup>/cm de chuva.
- 3 - Houve uma correlação razoavelmente boa entre a precipitação (P) e a perda de solo das Áreas-Teste.
- 4 - Com relação a intensidade de chuva (I), não foi possível uma correlação definida entre ela e a erosão. No entanto, a boa coincidência entre a precipitação e a erosão (acumulada) registradas até agora, parece indicar não ser importante para o comportamento do talude com o tempo, a definição da relação entre a intensidade de cada precipitação e a perda do solo por ela provocada.

## - SUGESTÕES

- 1 - Continuação dos ensaios de Erosão no laboratório em outros tipos de solo, se possível com aplicação de chuva artificial. Deve-se fazer uma maior quantidade de ensaios para dar-se um tratamento estatístico.
- 2 - Estudo da Erosão em solo compactado, para aterros.
- 3 - Continuidade das observações nas Áreas-Teste já implantadas.
- 4 - Instalações de novas Áreas-Teste em locais diferentes dos atuais, tanto em clima quanto em tipo de solo.

## BIBLIOGRAFIA SOBRE EROÇÃO DE SOLOS E ASSUNTOS CORRELATOS

- 1 - ABEL-RAHMAN & NAINI MOHAMED. (1962) - "The Effect of Flowing Water on Cohesive Beds" - Thesis presented to Laboratory for Hydraulic Research and Soil Mechanics, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- 2 - ADAMS, J.E & KIRKLAND, D & SCHOLTES, W. H. (1958) "Soil Erodibility and other Physical Properties of some IOWA Soils" - IOWA State College Journal Science - Vol. 32 pp 485-540.
- 3 - AITCHINSON, G.D. & WOOD C.C. (1965) - "Some Interactions of Compaction, Permeability and Post-Construction Defloculation Affecting the Probability of Piping Failure in Small Earth Dams" - Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng. Montreal, Vol. II.
- 4 - ANDERSON, H. W. (1951) - "Physical Characteristics of Soils Related to Erosion" - Journal of Soils and Water Conservation - July pp 129-133.
- 5 - ANDERSON, H.W. (1953) - "Suspended Sediment Discharge as Related to Stream Flow, Topography, Soil and Land Use" Transactions, American Geophysical Union, Hidrology - Vol. 35-2 - pp 268-281.
- 6 - ANDERSON, H.W. (1957) - "Relating Sediment Yield to Watershed Variables". American Geophysical Union, Vol. 38 Nº 6 December.
- 7 - ANDRE, J.E & ANDERSON, H.W. (1961) - "Variation of Soil Erodibility with Geology, Geographic Zone Elevation and Vegetation Type in Northern California Wildlands" - Journal of Geophysical Research - Vol 66 nº 10, October - pp 3351 - 3358.
- 8 - ARULANANDAN, K; SARGUNAM, A; LOGANATHAN, P & KRONE, R.B. (1973) "Application of Chemical and Eletrical Parameters to Prediction of Erodibility" - HRB - SR-135.

- 9 - ARULANANDAM, K; LOGANATHAN, P & KRONE, R.B. (1972) - "The Influence of Pore Fluid Composition on the Erodibility of a Soil" - Univ. of California, Davis Tech. Note. September.
- 10 - ARULANANDAM, K; LOGANATHAN, P & KRONE R.B. (1975) - "Pore and Eroding Fluid Influences on Surface Erosion of Soil" - Journal of the Geotechnical Engineering Division - January.
- 11 - BAILEY, R.W. & COPELAND, O.L. (1961) "Vegetation and Engineering Structures in Flood and Erosion Control" 13<sup>th</sup> Congress of International Union of Forest Research Organizations - Vienna, September p. 23.
- 12 - BARME, R.C. Jr. (1973) - "Erosion Control Structures" -HRB - SR 135.
- 13 - BAVER, L.D. (1956) - "Soil Physics" - John Wiley & Sons Inc. New York.
- 14 - BENNETT, H. H. - (1962) "Some Comparisons of the Properties of Humid Tropical and Humid Temperate American Soils with Special Reference to the Indicated Relations Between Chemical Composition and Physical Properties" . Soil Science - pp 349-375.
- 15 - BERGHAGER, D & LADD, C.C. (1964) "Erosion of Cohesive Soils" Research Report R - 64 - 1, School of Engineering. Dept. of Civil Engineering, MIT, Cambridge, Mass. January.
- 16 - BRAUM, G.W. (1961) - "Contribuição ao Estudo da Erosão no Brasil e seu Controle" - Revista Brasileira de Geografia - n° 4 - Outubro - Dezembro - pp 591-641.
- 17 - CARLSON, E.J. & ENGER, P.P. (1963) - "Studies of Tractive Forces of Cohesive Soils in Earth Canals" - U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation, Hydraulic Branch Report N° Hyd. - 504 - Denver, Colo., October.
- 18 - CASTRO, E (1966) - "Soil Swelling Test" - Memória n° 235 - Lisboa - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

- 19 - CASTRO, E. (1974) - "Determination of Absorption Limits of Soils" - 2<sup>nd</sup> Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geology - São Paulo Vol. I.
- 20 - CHOUDHURY, A.N.D. (1949) - "A Fundamental Approach to Soil Erosion" - Thesis presented to Princeton University (M.Sc).
- 21 - CHITTENDEN, D.B. (1973) - "Prevention and Control as Soil Erosion: The State of the Art" - HRB - SR-135.
- 22 - CHRISTENSEN, R.W. & DAS, B.M. (1973) - "Hydraulic Erosion of Remolded Cohesive Soils" - HRB - SR-135.
- 23 - DEERE, D.W. & F.D. PATTON (1971) - "Slope Stability in Residual Soils" . IV - Conf. Panm, de M.S.E.F. - Porto Rico - 1971 - Vol. 1.
- 24 - DOUBT, P.D. (1965) - "Design of Stable Channels in Erodible Materials" - Proc. of Federal Inter-Agency Sedimentation Conference - Agricultural Research Service Miscellaneous Publication nº 970 - pp 373-376.
- 25 - DUNN, I.S. (1959) - "Tractive Resistance of Cohesive Channels". Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE Vol. 85 no SM3, June.
- 26 - DULEY, F.L. & HAYS, O.E. (1932) - "The Effect of the Degree of Slope in run-off and Soil Erosion" - Journal of Agriculture Research - Vol. A5 - pp 349-360.
- 27 - EINSTEIN, H.A. & KRONE, R.B. (1961) - "Estuarial Sediment Transport Patterns". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87 No HY2, March.
- 28 - ENGER, P.F. & MERRIMAN, J (1957) - "Progress Report of Canal Erosion and Tractive Force Study: Lower Cost Canal Lining Program". U.S. Depart. of the Interior, Bureau of Reclamation, Hydraulic Branch Report No HYD - 435, March.
- 29 - ENGER, P.F. & MERRIMAN, J. & PRICHARD, B.A. & RUFFATTI, M.J. - (1960) - "Progress Report Nº 3 - Canal Erosion and Tracti-

ve Force Study, Correlation of Laboratory Test Data: Lower Cost Canal Lining Program". U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation, Hydraulic Branch Report N<sup>o</sup>. HYD 474 - October.

- 30 - ENGER, P.F. (1964) - "Canal Erosion and Tractive Force Study - Analysis of Data Taken on a Boundary Shear Flume" - Bureau of Reclamation, Hydraulic Branch Report n<sup>o</sup> HYD - 532 - February.
- 31 - ESPEY, W.H. Jr. (1963) - "A New Test to Measure the Scour of Cohesive Sediments" - Tech. Rep. No HYD 01 - 6301, Hydraulic Engrg. Lab. Dept. of Civil Engrg. University of Texas. Austin - Texas, April.
- 32 - FLAXMAN, ELLIOTT, M. (1962) - "A Method of Determination the Erosion Potential of Cohesive Soils" - International Association of Scientific Hydrology Commission of Land Erosion. Publication N<sup>o</sup> 59, October - pp 114-123.
- 33 - FLAXMAN, E.M. (1963) - "Channels Stability in Undisturbed Cohesive Soils" - Journal of the Hydraulics Division, ASCE Vol. 89, N<sup>o</sup> HY2 - March.
- 34 - FONSECA, J.P. & SIQUEIRA, L.G. (1969) - "Revestimento Vegetal dos Canteiros Centrais, Taludes de Corte e Saias de Aterros das Rodovias". Instituto de Pesquisas Rodoviárias - Publicação n<sup>o</sup> 441.
- 35 - FORTIER, S. & SCOBAY, F.C. (1926) - "Permissible Canal Velocities" - Transactions, ASCE - Vol. 89 - Paper N<sup>o</sup> 1588.
- 36 - FOSTER, R.L. & MARTIN, G.L. (1969) - "Effect of Unit Weight and Slope on Erosion" - ASCE Proceedings - Vol. 95 -December pp 551-561.
- 37 - GRANT, W.J. & EPSTEIN, E (1967) - "Soil Losses and Crust Formation as Relates to Some Soil Physical Properties" Soil Science Society of America - Vol. 31.

- 38 - GRAY, M.D. (1973) - "FOREWORD" - HRB - SR-135.
- 39 - GRISSINGER, E.H. (1966) - "Resistance of Selected Clay System to Erosion by Water"..Water Resource Research, Vol. II No 1.
- 40 - INDERBITZEN, A.L. (1961) - "An Erosion Test for Soils". Materials Research & Standards - July, Vol. I no 7 - Technical Note.
- 41 - KOBASHI, S (1971) - "Erosion and Surface Stratum Failure of Steep Slopes and their Prevention Methods". Proc. 4<sup>th</sup> Asian Reg. Conf. Bangkok - Vol. 1.
- 42 - LAFLEN, J.M. & BEASLEY, R.P. (1960) - "Effects of Compaction on Critical Tractive Force in Cohesive Soils" - College of Agriculture - Agricultural Experiment Station - Research Bulletin 749 - Univ. of Missouri, Columbia, Mo September.
- 43 - LAMBE, W.T. & MICHAELS, A.S. (1960) - "Soil Stabilization by Chemical Methods" - Corps of Engineers - Waterways Experiment Station - Find Report XII, MIT, Cambridge, Mass. November.
- 44 - LUTZ, J.F. (1974) - "The Physico - Chemical Properties of Soils Affecting Soil Erosion - Agricultural Experiment Station Research Bulletin No 212, Univ. of Missouri, Columbia - July.
- 45 - LYLE, W.M. & SMURDON, E.T. (1965) - "Relation of Compaction and Other Soil Properties to the Erosion Resistance of Soils" - Transactions, American Society of Agricultural Engineers.
- 46 - MARTIN, R.T. (1962) - "Discussion of Experiments on Scour Resistance of Cohesive Sediments"..Journal Geophysical Research - Vol. 67 No 4, April.
- 47 - MASCH, F.D. Jr. (1968) - "Erosion of Cohesive Sediments" - Journal Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No HY4, Proc. Paper 6044, July.

- 48 - McQUEEN, I.S. (1961) - "Some Factors Influencing Streambank Erodibility" - Geological Survey Research.
- 49 - MECH, S.J. (1949) - "Effect of Slope and Length of Run on Erosion Under Irrigation". Agricultural Engineering - Vol. 30, No 8, August.
- 50 - MAYER, L.D. & KRAMER, L.A. (1963) "Relation Between Land Slope Shape and Soil Erosion" - Agr. Engrg. Vol. 50.
- 51 - MEYER, L.D. & WISCHMEYER, W.H. & FOSTER, G.R. (1970) - "Mulch Rates Required for Erosion Control on Steep Slopes" - Soil Sci, Soc. Amer. Proc. Vol. 34.
- 52 - MEYER, L.D. & WISCHMEYER, W.H. & DANIEL, W.H. (1971) - "Erosion, Run-off and Revegetation of Denuded Construction Sites" - Trans. ASAE - Vol. 14.
- 53 - MEYER, L.D. & JOHNSON, C.B. & FOSTER, G.R. (1972) - "Stone and Woodchip Mulches for Erosion Control on Construction Sites" - Journal Soils and Water Cons.
- 54 - MIDDLETON, H.E. (1930) - "Properties of Soils which Influence Erosion" - Tech. Bulletin No 178, U.S. Dept. of Agriculture, Washington - March.
- 55 - MIDDLETON, H.E. & SLATER, C.S. & BYERS, H.G. (1932) - "Physical and Chemical Characteristics of the Soils from the Erosion Experiment Stations" - Part. I - U.S. Dept. of Agriculture, Tech. Bulletin 316.
- 56 - MIDDLETON, H.E. & SLATER, C.S. & BYERS, H.G. (1934) - "Physical and Chemical Characteristics of the Soils from the Erosion Experiment Stations" - Part II - U.S. Depart. of Agriculture, Tech. Bulletin 430.
- 57 - MIRTSKHULAVA, T.E. (1966) - "Erosional Stability of Cohesive Soils" - Journal Hydr. Research No 1.



- 58 - MOORE, W.L. & MASCH, F.D. (1962) - "Experiments on the Scour Resistance of Cohesive Sediments" - Journal of Geophysical Research, Vol. 67, Nº 4 - April.
- 59 - MUSGRAVE, G.W. (1935) - "The Infiltration Capacity of Soils in Relation to the Control of Surface Run-off and Erosion" Journal Amer. Soc. Agron., 27.
- 60 - MUSGRAVE, G.W. & FREE, G.R. (1936) - "Some Factors Which Modify the Rate and Total Amount of Infiltration of Field Soils". Journal Amer. Soc. Agron., 28.
- 61 - NASCIMENTO, U (1952) - "Estudo da Regularização e Proteção das Barrocas de Luanda" - Pub. Nº 30 - LNEC.
- 62 - NASCIMENTO, U & CASTRO, E. (1974) - "Preventive Measures Against Slope Erosion" - Criteria for Soil Selection" - 2<sup>nd</sup> - Int. Cong. Int. Assoc. Engrg. Geology - São Paulo - Vol. II.
- 63 - NASCIMENTO, U ; BRANCO, F; & CASTRO, E. (1965) - "Identification of Petrification in Soils". 6<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. and Found Engineering - Canada.
- 64 - NEIDERT, S.H. & TULCHINSKI (1975) - "Estudo de Escoamento de Água, Superficiais em Regiões Sujeitas à Erosão". Revista Brasileira de Estradas de Rodagem - Ano I Nº 4.
- 65 - OLSEN, T.C. & WISCHMEIER, W.H. (1963) - "Soil Erodibility Evaluations for Soils on Run-off and Erosion Stations". Soil Sci. Soc. America - Proc. 27, pp 590-592.
- 66 - PAASWELL, R.E. (1973) - "Causes and Mechanisms of Cohesive Soil Erosion: The State of the Art" - HRB - Special Report 135 - January.
- 67 - PAASWELL, R.E. & PARTHENIADES, E. & COAD, R. & BLINCO, P. (1969) - "Experimental Study of Erosion of Cohesive Soils" - Presented 50<sup>th</sup> Annual Meetings of American Geophysical Union April.

- 68 - PARTHENIADES, E. (1964) - "A Summary of the Present Knowledge of the Behaviour of Fine Sediments in Estuaries" - Technical Note 8, Hydromechanics Laboratory, M.I.T., Cambridge, Mass., June.
- 69 - PARTHENIADES, E. (1965) - "Erosion and Deposition of Cohesive Soils" - Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 91, No. Hy1., Proc. Paper 4204, January.
- 70 - PARTHENIADES, E. & PAASWELL, R.E. (1968) - "Erosion of Cohesive Soils and Channel Stabilization" - Part I - State of Knowledge - Dept. of Civil Engrg. State University of New York, Civil Engrg. Report 19 - October.
- 71 - PARTHENIADES, E. (1972) - "Results of Recent Investigations on Erosion and Deposition of Cohesive Sediments" - Sedimentation (Symposium to Honor Prof. Hans A. Einstein) - Colorado State University, Fort Collins.
- 72 - PENCE, R.J. & LETEY, J. & PELISHEK, R.E. & OSBORN, J. (1962) - "New Aqueous Resinous Soil Stabilizers" - California Agriculture, Division of Agricultural Sciences, Vol. 18 Note 3, Univ. of California, Davis, March.
- 73 - PEELE, T.C. (1937) - "The Relation of Certain Physical Characteristics to the Erodibility of Soils" - Proc. Soil Science of America, Vol. 2.
- 74 - PETERS, J.D. & ROSTLER, J.D. & VALLERGA, B.A. (1973) - "Promising Materials and Methods for Erosion Control" - HRB - SR 135.
- 75 - REKTORIK, R.J. (1964) - "Critical Shear Stresses in Cohesive Soils" - Dept. of Agricultural Engrg., College Station, Texas, January.
- 76 - RILEY, J.P. & ARULANANDAM, K. (1972) - "A Method for Measuring the Erodibility of a Soil" - Dept. of Civil Engrg. University of California, Davis, Tech. Note 72/2.
- 77 - ROWLISON, D.L. & MARTIN, G.L. (1969) - "Rational Model Des-

cribing Slope Erosion" - ASCE - Annual and Environment Meeting - Chicago Preprint 1049, October.

- 78 - SANTOS, M.P. & CASTRO, E. (1965) - "Soil Erosion in Roads". Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech., Found Engrg. - Montreal.
- 79 - SANTOS, M.P. & CASTRO, E (1966) e (1967) - "Estudo das Soluções mais Convencionais Para Problemas de Erosão Continental" 3º e 4º Relatório LNEC, respectivamente.
- 80 - SANTOS, M.P. & CASTRO, E. (1967) - "Estudos sobre Erosão em Taludes de Estradas" - 2<sup>as</sup> Jorn. Luso-Bras. Eng. Civil - Rio de Janeiro - São Paulo.
- 81 - SANTOS, M.P. (1953) - "A New Soil Constant and its Applications" - Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Vol. 1-Zurich.
- 82 - SARGUNAN, A & RILEY, P & ARULANANDAM, K & KRONE, R.B. (1972) - "Effect of Psysico-Chemical Factors on Erosion of Cohesive Soils" - University of California, Davis, September.
- 83 - SCHROEDER, K.B. (1953) - "Interim Report on Channel Deterioration Study of Natural and Artificial Drainageways in Republican Loup, and Little Sioux River Areas, Nebraska and Iowa" U.S. Dept. of the Interior Bureau of Reclamation, Hydrology Branch, Denver, Colorado, September.
- 84 - SCHUMN, S.A. (1960) - "The Slope of Alluvial Channels in Relation to Sediment Type" - U.S. Geol. Survey, Professional Paper 352-B, Washington.
- 85 - SCHUMN, S.A. (1961) - "The Effect of Sediment Characteristics on Erosion and Reposition in Ephemeral Stream Channels" U.S. Geological Survey, Professional Paper No-352- C, Washington.
- 86 - SCHWAB, O.G & FREVERT, K.R. & EDMINSTER, W.T. & BARNES, K.K. (1966) - "Soil and Water Conservation Engineering" - John Willey & Sons Inc.

- 87 - SIMONS, D.B. & RICHARDSON, E.V. & HAUSHILD, W.L. (1961)- "Some Properties of Clay-Water Dispersions and their Effects on Flow". Geol. Survey, U.S. Dept. of the Interior. CER 61 DBS 50, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, August.
- 88 - SLATEN, C.S. & BYERS, H.G. (1931) - "A Laboratory Study of the Field Percolation Rates of Soils". U.S. Dept. of Agron. Tech. Bulletin 232.
- 89 - SMURDON, E.T. & BEASLEY, R.P. (1952) - "Tractive Force Theory Applied to Stability of Open Channels in Cohesive Soils" Agricultural Experiment Station, Research Bulletin No 1715, Univ. of Missouri, Columbia, October.
- 90 - SMURDON, E.T. & BEASLEY, R.P. (1961) - "Critical Tractive Forces in Cohesive Soils" - Agricultural Engrg. - January.
- 91 - SMURDON, E.T. (1964) - "Effect of Rainfall on Critical Tractive Forces in Channels with Shallow Flow" - Transactions - American Society of Agricultural Engineers. Vol. 7, No 3.
- 92 - TERRELL, P.W. & BORLAND, W.M. (1956) "Design of Stable Canals and Channels in Erodible Materials" - Journal of Hydraulics Division - ASCE, Vol. 82 - No HY1, February, 1956.
- 93 - TOVEY, R.M. & VICTOR, I & MARTIN, J.W. (1962) - "Furrow Erosion on Steep Irrigated Land". Agricultural Experiment Station, Dept. of Agricultural Engrg. Research Bulletin No 53. Univers. of Idaho, May.
- 94 - TURELLE, J.W. (1971) - "Factors Involved in the Use of Herbaceous Plants for Erosion Control on Roadways" - HRB SR 135.
- 95 - VANONI, V et al (1966) - "Sediment Transport Mechanics; Initiation of Motion" . Journal of Hydr. Division - Proc. ASCE No HY2, March.
- 96 - WALLIS, J.R. & WILLEN, D.W. (1963) - "Variation in Dispersion Ratio, Surface Aggregation Ratio, and Texture of Some California Surface Soils as Related to Soil-Forming Factors" Bulletin of Internat. Assoc. of Scientific Hydrology, Vol. 8, No 4

- 97 - WINTERKORN, H.F. (1942) - "Mechanism of Water Attack on Dry Cohesive Soil Systems" - Soil Science. Vol. 54, No 4.
- 98 - WINTERKORN, H.F. (1973) - "Experimental Study of the Attack of Water on Dry Cohesive Soil Systems" - HRB - SR-135.
- 99 - WISCHMEIER, W.H. & MANNERING, J.U. - "Relation of Soil Properties to Soil Loss" - Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Vol. 33.
- 100 - WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1958) - "Rainfall Energy and its Relation to Soil Loss" - Trans. American Geophysical Union - Vol. 39.
- 101 - WISCHMEIER, W.H. (1959) - "A Rainfall Erosion Index for a Universal Soil-Loss Equation" Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Vol. 23.
- 102 - WISCHMEIER, W.H. (1962) - "Rainfall Erosion Potential - Geographic and Locational Difference of Distribution" - Agr. Eng. Vol. 43.
- 103 - WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. (1965) - "Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains" - Agr. Handbook 282 - U.S. Govt. Print. Office.
- 104 - WISCHMEIER, W.H. & JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. (1971) - "A Soils Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites". Journal Soils & Water Cons. Vol. 26.
- 105 - WISCHMEIER, W.H. & MEYER, L.D. (1973) - "Soil Erodibility on Construction Areas" - HRB - SR-135.
- 106 - WOLMAN, G.M. (1959) - "Factors Influencing Erosion of a Cohesive River Bank" - American Journal of Science. Vol. 257. March.
- 107 - YODER, R.E. (1936) - "A Direct Method of Aggregate Analysis of Soils and a Study of the Physical Nature of Erosion Losses" - Journal of American Society of Agronomy. Vol. 28 - No 5, May.

- 108 - YOUNG, R.A. & MUTHCHER, C.K. (1969) - "Soil Movement on Irregular Slopes" - Water Resources Research Vol. 5.
- 109 - ZERNIAL, G.A. & LOURSEN, E.M. (1963) "Sediment Transporting Characteristics of Streams". Journal of the Hydraulic Division. ASCE - Vol. 89, No. HY1 - January.