

ESTUDO DOS SOLOS RESIDUAIS DO PLANALTO
MERIDIONAL DO RIO GRANDE DO SUL

WAI YING YUK GEHLING

Dissertação apresentada ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

PORTO ALEGRE

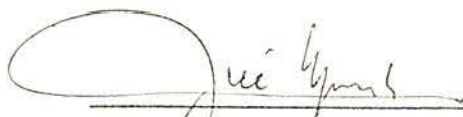
ABRIL - 1982

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

* Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL aprovada em sua forma final pelo Orientador e pelo Curso de Pós-Graduação



Prof. Ari Roisenberg
Orientador



Prof. José Serafim Gomes Franco
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Eng.Civil

A meus pais,
meu reconhecimento e gratidão

A meu esposo

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Ari Roisenberg, pela orientação e grande incentivo na elaboração deste trabalho;
- Ao Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Prof. José Serafim Gomes Franco, pelo apoio;
- À Prof^a. Regina Davison Dias, pelas sugestões e apoio na realização deste trabalho;
- Ao Prof. Adriano Bica, pelo incentivo e apoio;
- Ao Prof. Luís Fernando Nanni, pelas sugestões na área estatística;
- Aos auxiliares de pesquisa e laboratoristas do Departamento de Mecânica dos Solos, pela ajuda dispensada na obtenção dos dados;
- À colega e amiga Myrta Doldan de Gonzales, por sua parcela de contribuição;
- Ao CNPq, FINEP e CAPES, pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE QUADROS	XII
LISTA DE TABELA	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.1 - Relevo	6
2.2 - Clima e Vegetação	6
2.3 - Descrição Geológica	8
2.4 - Solos do Planalto Meridional	11
2.4.1 - Solos de arenito da Formação Tupancine- tã	11
2.4.2 - Solos de basalto	12
2.4.3 - Solos de riolito	13
2.5 - Classificação Pedológica	13
3 - METODOLOGIA	18
3.1 - Localização dos Pontos de Amostragem	18
3.2 - Métodos de Amostragem	18
3.3 - Ensaios de Laboratório	22
3.3.1 - Análises químicas	22
3.3.2 - Microscopia eletrônica	24
3.3.3 - Análises mineralógicas	24
3.3.4 - Ensaios de caracterização	25
3.3.5 - Ensaios de compactação de ISC	26
3.3.6 - Ensaios de comportamento mecânico	28
3.3.6.1 - Compressão confinada	28
3.3.6.2 - Colapsibilidade	29
3.3.6.3 - Cisalhamento direto	29

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	31
4.1 - Análises Químicas	31
4.2 - Microscopia Eletrônica	37
4.3 - Mineralogia	41
4.4 - Caracterização	51
4.4.1 - Densidade real dos grãos	51
4.4.2 - Granulometria	56
4.4.3 - Consistência	63
4.5 - Compactação de ISC	83
4.6 - Comportamento Mecânico	87
4.6.1 - Compressibilidade	87
4.6.2 - Colapsibilidade	93
4.6.3 - Resistência ao cisalhamento	97
5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	126
5.1 - Método de Análise Aplicado aos Resultados dos Ensaio de Caracterização, Compactação e ISC ..	127
5.1.1 - Comparação dos desvios padrão	128
5.1.2 - Comparações das médias	129
5.1.3 - Determinação de valores espúrios	130
5.1.4 - Exemplo do Programa COMP-VAR	131
5.1.4.1 - Aplicação do método de compa- ração múltipla das médias do ensaio de limite de liquidez.	134
5.1.4.2 - Determinação dos valores espú- rios do ensaio de limite de liquidez	135
5.1.5 - Análise dos resultados	137
5.2 - Método de Regressão Linear Aplicado aos Resulta- dos de Cisalhamento Direto	141
5.2.1 - Interpretação dos parâmetros	141
5.2.2 - Exemplo do programa REG-SIMPLES	143
5.2.3 - Análise dos resultados	146
6 - CONCLUSÕES	148
7 - SUGESTÕES	151
8 - BIBLIOGRAFIA	152
9 - APÊNDICE	162

LISTA DE FIGURAS

- 1 - Esboço geológico do grau de Passo Fundo/
- 2 - Aspecto da rocha vulcânica ácida (riolito) com típico diaclasamento horizontal/
- 3 - Perfil de um solo de riolito/
- 4 - Classificação pedológica segundo Lemos e colaboradores/
- 5 - Localização da amostragem/
- 6 - Processo de extração de amostra indeformada na cidade de Carazinho/
- 7 - Vedação com parafina após a extração da amostra indeformada/
- 8 - Gráfico da determinação da umidade ótima em função dos limites de liquidez e de plasticidade dados por Bowles/
- 9 - Relação entre CTC e porcentagem de argila/
- 10 - Micrografia de amostra de solos de riolito (Soledade) demonstra a porosidade do material (aumento de 1000x)/
- 11 - Micrografia de amostra de solos de basalto (Marau) demonstra a porosidade do material (aumentado de 1000x)/
- 12 - Micrografia de amostra de solos de arenito (Carazinho) demonstra a porosidade do material (aumento de 1000x)/
- 13 - Micrografia de amostra de solos de arenito (Carazinho) demonstra um material com relativa orientação dos graus de partículas (aumento de 4000x)/
- 14 - Micrografia de amostra de solos de basalto (Marau) demonstra um material com relativa orientação dos grupos de partículas (aumento 1000x)/

- 15 - Difratogramas ao Raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinada. Solos de arenito da Formação Tupanciretã. Ponto 7, Fração $< 2 \mu$, (velocidade 29/min). Presença de amorfos/
- 16 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de arenito da Formação Tupanciretã, Ponto 18, Fração $< 2 \mu$ (velocidade 29/min)/
- 17 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de arenito da Formação Tupanciretã. Ponto 20, Fração $< 2 \mu$ (velocidade 29/min)/
- 18 - Difratograma de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de riolito. Ponto 21, Fração $< 2 \mu$ (velocidade 29/min)/
- 19 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de riolito. Ponto 10, Fração $< 2 \mu$ (velocidade 29/min)/
- 20 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de riolito. Ponto 31, Fração $< 2 \mu$ (velocidade de 29/min)/
- 21 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de basalto. Ponto 4, Fração $< 2 \mu$ (velocidade de 29/min)/
- 22 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de basalto. Ponto 2, Fração $< 2 \mu$ (velocidade de 29/min)/
- 23 - Difratogramas de Raio X, amostras orientadas, natural, glicolada e calcinada. Solos de basalto. Ponto 26, Fração $< 2 \mu$ (velocidade 29/min)/
- 24 - Faixas granulométricas dos três solos típicos da região/
- 25 - Faixa granulométrica de solos de arenito comparada com a de Cruz/
- 26 - Faixa granulométrica de solo de riolito comparada com a de solos oriundos de granito estudados por Cruz/

- 27 - Faixa granulométrica de solos de basalto comparada com a de Cruz/
- 28 - Faixa granulométrica de solo de basalto comparada com a de Vargas/
- 29 - Faixa granulométrica de solo de arenito comparada com a de Vargas/
- 30 - Diagrama triangular da classificação de solos segundo USBS/
- 31 - Gráfico de plasticidade de solos da região de Passo Fundo (Casagrande)/
- 32 - Inserção, no gráfico de plasticidade de Cruz, dos valores obtidos/
- 33 - Inserção, no gráfico de plasticidade de Vargas, dos valores obtidos/
- 34 - Inserção, no gráfico de plasticidade, dos valores obtidos em função do mineral argílico/
- 35 - Relação entre sensibilidade e índice de liquidez dada por Skempton e Northey (67)/
- 36 - Relação entre índice de plasticidade e fração argilosa ($< 2 \mu$) segundo Skempton/
- 37 - Inserção, no gráfico de atividade de Cruz, dos valores obtidos/
- 38 - Relação entre índice de plasticidade e fração argilosa, segundo Skempton/
- 39 - Gráfico de umidade ótima x densidade seca máxima de solos da região de Passo Fundo/
- 40 - Inserção, no gráfico de Cruz, dos valores obtidos/
- 41 - Curvas de índice de vazios versus logaritmo de pressões dos solos/
- 42 - Relação entre "Cc" e "e" em solos indeformados, segundo Sowers/
- 43 - Gráfico do índice de vazios versus pressão com indicação dos colapsos, segundo Vargas/

- 44 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Soledade (riolito), na umidade natural/
- 45 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Soledade (riolito), com inundação/
- 46 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Passo Fundo (riolito), na umidade natural/
- 47 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Passo Fundo (riolito), com inundação/
- 48 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Carazinho (arenito), na umidade natural/
- 49 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Carazinho (arenito), com inundação/
- 50 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Tapera (arenito), na umidade natural/
- 51 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Tapera (arenito), com inundação/
- 52 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Marau (basalto), na umidade natural/
- 53 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Marau (basalto), com inundação/
- 54 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Anta Gorda (basalto), na umidade natural/
- 55 - Resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas de solos de Anta Gorda (basalto), com inundação/

LISTA DE QUADROS

- I - Perfis de transições propostos por diversos autores, segundo Marques/
- II - Classificação pedológica dos solos/
- III - Coordenadas geográficas/
- IV - Valores de densidade real dos grãos de solos lateríticos de diferentes países, citados por Bawa/
- V - Classificação dos solos pelos sistemas SUCS E HBR/
- VI - Correlação entre atividade, localização, geologia e mineralogia de algumas argilas, segundo Skempton/
- VII - Atividade das argilas em função de sua história geológica, segundo Salas/
- VIII - Relação entre CP e grau de gravidade do problema, segundo Clemence e colaboradores/
- IX - Valores de limites de liquidez para cada tipo de solo/

LISTA DE TABELAS

- I - Valores de pH, cátions trocáveis, relações catiônicas e matéria orgânica do grau de Passo Fundo/
- II - Características físico-químicas dos solos lateríticos de Uganda/
- III - Valores dos complexos de laterização dos solos de Passo Fundo/
- IV - Resultados dos ensaios de caracterização, compactação e ISC/
- V - Valores de limites de Atterberg dos minerais argílicos referidos por Lambe/
- VI - Valores de limites de Atterberg para diversos argilominerais e cátions trocáveis, referidos por Perloff/
- VII - Influência dos tamanhos de partículas nos valores de limites de Atterberg em função do mineral argílico, segundo Whitte/
- VIII - Valores de limites de Atterberg obtidos no presente trabalho e por Lambe e Grim em função do mineral argílico e cátion trocável/
- IX - Influência da lixiviação em solos lateríticos nos valores de Atterberg, segundo Ola/
- X - Atividade coloidal de vários minerais, segundo Mitchell/
- XI - Valores de limites de Atterberg para diversos argilominerais, segundo Mitchell/
- XII - Características de compressibilidade dos solos em amostras indeformadas na umidade natural/
- XIII - Características de compressibilidade dos solos em amostras

- tras indeformadas inundadas/
- XIV - Valores obtidos a partir das correlações estabelecidas por Vargas para solos porosos/
- XV - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Soledade (riolito) na umidade natural/
- XVI - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Soledade (riolito) com inundação/
- XVII - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Passo Fundo (riolito) na umidade natural/
- XVIII - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Passo Fundo (riolito), com inundação/
- XIX - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Carazinho (arenito) na umidade natural/
- XX - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Carazinho (arenito) com inundação/
- XXI - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Tapeira (arenito) na umidade natural/
- XXII - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Tapeira (arenito) com inundação/
- XXIII - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Marau (basalto) na umidade natural/
- XXIV - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Marau (basalto) com inundação/
- XXV - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Anta Gorda (basalto) na umidade natural/
- XXVI - Resumo dos parâmetros de resistência do bloco de Anta Gorda (basalto) com inundação/
- XXVII - Parâmetros estatísticos das características dos solos de basalto/
- XXVIII - Parâmetros estatísticos das características dos solos de riolito/

- XXIX - Parâmetros estatísticos das características dos solos de arenito da Formação Tupanciretã/
- XXX - Resumo da análise estatística do parâmetro de resistência/
- XXXI - Resumo dos parâmetros obtidos para solos de basalto/
- XXXII - Resumo dos parâmetros obtidos para solos de riolito/
- XXXIII - Resumo dos parâmetros obtidos para solos de arenito (Form. tupanciretã)/
- XXXIV - Resumo dos parâmetros obtidos para amostras indeformadas/

LISTA DE SÍMBOLOS

δ	- Densidade real dos grãos do solo
γ	- Peso específico da amostra ensada
γ_s	- Peso específico da amostra seca
δs_{max}	- Densidade máxima seca
γs_{max}	- Peso específico seco máximo
h_{ot}	- Umidade ótima do ensaio Proctor Normal
h_{nat}	- Umidade natural
h_i	- Teor de umidade inicial
h_f	- Teor de umidade final
S	- Grau de saturação
S_i	- Grau de saturação inicial
S_f	- Grau de saturação final
LL	- Limite de liquidez
LP	- Limite de plasticidade
IP	- Índice de plasticidade
IL	- Índice de liquidez
Ac	- Atividade coloidal
Cc	- Índice de compressão
Cs	- Índice de expansão
σ_c	- Pressão de sobreadensamento
σ_p	- Pressão atuante
e	- Índice de vazios
e_i	- Índice de vazios inicial
e_f	- Índice de vazios final
\bar{e}_i	- Índice de vazios médio
OCR	- Relação entre a pressão de sobreadensamento e pressão atuante
CP	- Potencial de colapso
τ	- Tensão de cisalhamento

τ_{\max}	- Tensão de cisalhamento máximo (na ruptura)
ϵ	- Deformação específica
ϕ'	- Ângulo de atrito efetivo
C'	- Coesão efetiva
\bar{X}	- Média
n	- Número de observações
s	- Desvio padrão
s_d	- Desvio padrão dentro dos grupos
s_e	- Desvio padrão entre os grupos
CV	- Coeficiente de variação
V_{\min}	- Valor mínimo
V_{\max}	- Valor máximo

RESUMO

O presente trabalho estuda as propriedades geotécnicas de solos residuais que se situam no Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, na área pertencente ao chamado grau de Passo Fundo (28° - 29° e 52° - 53° de Greenwich).

O mapeamento geológico mostrou a ocorrência de arenito da Formação Tupanciretã e rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, constituídas por basaltos e riolacitos, estes últimos de descrição recente (69,77).

Foram coletadas 36 amostras deformadas e 6 blocos indeformados de solos residuais de arenito da Formação Tupanciretã, de riolito e de basalto, situados no horizonte superficial, abrangendo uma área global de 10.000km^2

Realizaram-se análises químicas e mineralógicas, estudos de microscopia eletrônica, ensaios de caracterização, compactação, Índice Suporte Califórnia, compressibilidade, colapsibilidade e resistência, além de um estudo pedológico.

Os solos estudados apresentaram características de solos lateríticos, com propriedades particulares que os distinguem dos demais solos do Brasil. Observaram-se diferenças nas propriedades dos solos de arenito em relação aos solos de basalto e riolito.

Por fim, procedeu-se a um estudo estatístico, verificando-se a variabilidade entre os resultados obtidos, que demonstraram uma relativa compatibilidade entre as características da rocha mãe e dos solos originados.

A partir dos dados obtidos será possível estender a análise às demais áreas da região, com vistas a uma ampliação e sistematização dos estudos de solos vermelhos residuais do Planalto Meridional.

ABSTRACT

This work presents the geotechnical properties of residual soils located in the Planalto Meridional do Rio Grande do Sul in the area belonging to the so called Passo Fundo Region (28°-29° and 52°-53° Greenwich).

The geological mapping showed the presence of the Tupanciretã Formation, volcanic rocks from the Serra Geral Formation, which according to a recent description (69, 77) are made up of basalts and riolite.

A collection was made of thirty six deformed samples and six undeformed blocks of residual soils of sandstone from the Tupanciretã Formation and of riolite and basalt, which were located in a horizontal surface covering a global area of 10.000 km².

The following, types of analyses and tests were performed: mineralogical, chemical, characterization, compaction, California Bearing Ration, compressibility, collapsibility and resistance, in addition to a pedological study.

The soils analysed showed lateritic soils characteristics with special properties that single them out with respect to the other Brazilian soils. Differences were observed between the properties of the sandstone and those from basalts and riolite.

A quantification of the variability of the results was obtained by means of a statistical analysis of the data, that a relative compatibility between the characteristics of the source rock and its original soils.

Using the results obtained extension of their study can be made to other areas in the region in order to obtain a wider and sistematic view of the residual red soils of the Planalto Meridional.

1 - INTRODUÇÃO

Os solos originados pela decomposição "in situ" de rochas cobrem uma larga faixa da superfície da crosta terrestre, correspondente às zonas de clima úmido, onde as espessuras, por vezes agigantadas, podem alcançar várias centenas de metros. A estrutura física e as propriedades de tais solos são diferentes daqueles ditos transportados ou sedimentares. Do ponto de vista mineralógico, preservam parte dos constituintes da rocha mãe na fração areia (resistratos) e, sob o aspecto estrutural, retêm muito da configuração interna da litologia original.

Os estudos realizados sobre o comportamento de solos residuais, de uma maneira geral, têm sido dirigidos para a composição mineralógica, propriedades físicas e químicas, bem como para determinações das características de resistência e compressibilidade. Dentre os vários autores, destacamos os que seguem: Henry e Grace (37), em 1948, e Tombinson e Holt (86), em 1953, estudaram alguns aspectos de solos resultantes da decomposição de granitos; Lumb (48), em 1962, tratou das propriedades da decomposição de granito; em 1967, Rudock (72) descreveu os solos residuais do Distrito de Ghana; Vargas (88, 89, 91), em 1953, 1971 e 1974, e Cruz (26, 27), em 1969 e 1971, descreveram algumas propriedades de solos residuais do Brasil; Sandroni (74) e Miranda (54), em 1973, e Castro (20), um ano depois, analisaram o comportamento do solo de migmatito do Estado da Guanabara; Mori e colaboradores (58) apresentaram resultados de compressibilidade de solos residuais e transportados de basalto; Tanaka (85), em 1976, estabeleceu considerações sobre resistência ao cisalhamento de solos residuais de basalto de São Simão; Rennô (68), no ano seguinte, estudou as propriedades geotécnicas de solos residuais de basalto de Salto Santiago-Paraná e Nudelmann (62), em

1980, tratou da caracterização e do comportamento de um solo residual de migmatito do Rio Grande do Sul.

Na região do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, são praticamente inexistentes os estudos sistemáticos de solos, sob o ponto de vista geotécnico. Reconhecimentos regionais, com ênfase agrônômica, foram relatados por Lemos e colaboradores (46) a partir de estudos de aspectos da área, como os efetuados por Goedert (31), Klamt (41) e Moreira (57).

A ausência de estudos geotécnicos dessa região motivou a realização do presente trabalho, cujo objetivo é estudar as propriedades dos solos residuais de diferentes origens, mas com a mesma evolução pedogenética, e suas relações com a rocha mãe, nas condições climáticas vigentes.

O estudo centra-se em uma área do Planalto Meridional pertencente ao grau de Passo Fundo, entre as coordenadas 28° e 29° sul e 52° e 53° oeste de Greenwich.

Foram selecionadas e analisadas amostras deformadas e indeformadas, estas últimas de acordo com a sua litologia.

Os dados obtidos possibilitaram a comparação com solos residuais estudados por outros autores e emprego das correlações conhecidas entre os diversos parâmetros, bem como permitiram a identificação dos solos estudados dentro de regiões propostas pelos mesmos. Os resultados não chegaram a ser conclusivos, devido ao pequeno número de amostras de alguns tipos de solos e dispersões dos valores obtidos em alguns ensaios, decorrentes provavelmente da heterogeneidade própria do solo. Mas a tentativa de ampliar os conhecimentos sobre solos residuais da região foi bastante satisfatória, permitindo acrescentar mais um trabalho nessa área. De uma forma geral, é possível que esses resultados encontrados sejam estendidos a todo solo residual do Planalto Meridional.

Finalmente, foi feita uma análise estatística, calculando-se média, desvio padrão, valores mínimos e máximos e coeficientes de variação e verificando a existência de corre-

lações entre as propriedades e os solos estudados, comparando as médias de um tipo de solo em relação ao outro.

2 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA EM ESTUDO

Os solos residuais são os originados pela decomposição do substrato "in situ". O termo decomposição indica transformação gradual por desagregação e alteração química da rocha mãe. Os responsáveis por esta transformação gradativa são as condições climáticas e a natureza da rocha mãe.

Os agentes da decomposição, atuando conjuntamente sobre a rocha sã, vão aos poucos desintegrando-a, formando, em sua parte superior, uma camada intemperizada denominada de manto de intemperismo. Esse manto vai tomando características particulares devido a fenômenos de adições químicas, perdas e transformações, que se dão de diferentes modos e a diferentes distanciamentos da rocha de origem. O quadro I apresenta perfis de transições propostos por diversos autores, segundo Marques e colaboradores (51). Entre nós, um perfil completo de solo residual está baseado na classificação dada por Deere e Patton (51) e em termos de pedologia.

A região do Planalto Sul-riograndense é caracterizada por espessos derrames basálticos, pertencentes à Formação Serra Geral, ocorridos no período cretáceo-jurássico sobre a Formação Botucatu.

No extremo sul do Planalto, Menegotto e colaboradores (53) descreveram uma seqüência sedimentar sobre Formação Serra Geral, a qual denominaram de Formação Tupanciretã, constituída por arenitos quartzos com rara ocorrência de argilitos. Segundo Coulon e colaboradores (24), essa formação ocorre sem continuidade física e sob a forma de exposições isoladas.

Roisenberg (69) abordou recentemente a existência de uma nova seqüência da Formação Serra Geral de filiação ácida, ocorrida no mesmo período dos derrames basálticos. Os

QUADRO I

Perfis de transições propostos por diversos autores, segundo Marques.

PERFIS DE ALTERAÇÃO PROPOSTOS					CARACTERÍSTICA DO MATERIAL		
VARGAS-53	NOGAMI-67	DEERE e PATTON-71	DE MELLO-72	ELETROSUL-COPEL-80			
SOLO RESIDUAL MADURO	SOLO SUPERFICIAL	I - SOLO RESIDUAL	IA-HORIZONTE "A"	SOLO MADURO	SOLO	SOLO COLÚVIO-RESIDUAL MADURO	Solo de aspecto maciço, marrom-avermelhado, siltico-argiloso, poroso ("terra roxa").
			IB-HORIZONTE "B"			SOLO SAPROLÍTICO OU RESIDUAL JOVEM	HOMOGENEO	Solo de aspecto maciço, cores mais claras, muito variadas, argilo-siltoso-finamente arenoso.
SOLO RESIDUAL JOVEM	SOLO DE ALTERAÇÃO		IC-HORIZONTE "C" (SAPRÓLITO)	SOLO RESIDUAL		COM ESTRUTURAS RELICTAS	Solo com estruturas relictas bem aparentes, cores muito variadas, argilo-siltoso-finamente arenoso, c/ fragmentos de rocha alterada.
ROCHA DESINTEGRADA	ROCHA ALTERADA	II - ROCHA ALTERADA	IIA-TRANSIÇÃO (de solo residual e saprólito a rocha alterada)	OU SAPRÓLITO	SAPRÓLITO	SAPRÓLITO BRANDO	Saprólito semiterroso, compacto, pouco a medianamente pedregoso, alteração generalizada, evidências de decomposição esferoidal, que escava sob a forma de fragmentos brandos, angulosos, e compacta à forma de solo impermeável.
			IIB - ROCHA PARCIALMENTE ALTERADA	ROCHA ALTERADA		SAPRÓLITO DURO	Saprólito predominantemente pedregoso, muito heterogêneo, formado por rocha dura muito fraturada e zonas semiterrosas em menor proporção, que escava a lâmina do trator e mantém-se pedregoso, semipermeável, após compactação.
						ROCHA DURA POUCO ALTERADA	Rocha pouco alterada, dura, com fraturas amareladas ou com alguma decomposição incipiente ao longo de fraturas, trechos descolorados porém firmes, que não pode ser escavada a lâmina de trator pesado.
ROCHA SÃ	ROCHA VIVA	III-ROCHA SÃ	ROCHA SÃ		ROCHA	ROCHA SÃ	Rocha praticamente sem qualquer alteração ou em que esta não prejudica as suas propriedades.

vulcânicos de filiação ácida variam sua composição de dacitos a riolitos, com ampla dominância de riodacitos. Uma das características dessa litologia é a completa ausência de fenocristais de quartzo cuja ocorrência restringe-se à matriz.

Os basaltos são de caráter toleítico, contendo alternâncias de arenitos, provenientes da deposição de sedimentos clásticos semelhantes à Formação Botucatu. A composição mineralógica das rochas basálticas, foi abordada por Schneider (78), compreende principalmente plagioclásio e piroxênio, com proporções menores de magnetita.

2.1 - Relevo

O principal papel do relevo se faz sentir na sua influência sobre o escoamento superficial e subterrâneo. No caso das águas superficiais, quanto maior sua velocidade, maior a erosão provocada e menor a absorção pelo solo. Em se tratando de águas subterrâneas, a sua rápida renovação, transportando em solução os íons liberados dos minerais formadores das rochas, evita o restabelecimento do equilíbrio químico e diminui o valor do pH, o que acelera o processo, provocando uma desagregação mais rápida e uma lixiviação mais efetiva.

A topografia é um fator essencial nas diferenciações climáticas e na cobertura vegetal. A própria altitude provoca uma queda de temperatura.

Na parte norte da área em estudo, ocorre um relevo de ondulado a forte ondulado, formado por elevações com declives. Na parte sul, onde existe arenito, o relevo é ondulado, composto por um conjunto de elevações arredondadas que formam entre si depressões abertas ou fechadas.

2.2 - Clima e Vegetação

O clima é constituído por uma série de fatores que

podem ser mensuráveis, dos quais os mais importantes são temperatura, precipitação e umidade. A combinação desses fatores permite uma condição climática que acarreta desgastes, de composição e posterior transporte da rocha originadora dos solos. Hoff (47) chegou a estabelecer que um acréscimo de 10°C provoca um aumento de 2 a 3 vezes na velocidade de reação. Mota (59) enquadrou o clima do Planalto Meridional na variação C_{fbg}, da classificação climática de Köppen, que apresenta características de subtropical úmido, sem estação seca e com a temperatura do mês mais quente ultrapassando a 22°C e a do mês mais frio sendo superior a 3°C e inferior a 18°C .

Moreno (56) confirma a predominância desse clima, com exceção da temperatura média do mês mais frio, que oscilava entre -3°C e 18°C .

Machado (50) avaliou para essa região uma precipitação pluviométrica média anual de 1970 mm, com dominância de chuvas de inverno.

Mota e Goedert (60), estudando a evapotranspiração potencial anual no Rio Grande do Sul, indicaram valores intermediários para o Planalto, mostrando que normalmente não ocorre deficiência de água durante todo o ano, mas que, devido à variabilidade de chuvas de um ano para outro, pode, ocasionalmente, ocorrer seca no verão.

Outro fenômeno de grande importância no processo de intemperismo é o vento que, atuando na remoção da umidade do ar, provoca o secamento das camadas superficiais do solo com a conseqüente ascensão capilar. O desgaste físico das rochas se deve, em parte, à erosão eolítica.

As condições climáticas da região em estudo favorecem a predominância do intemperismo químico na decomposição das rochas.

A vegetação nessa área, segundo Barreto e Kappel (11), é formada por grama forquilha ("paspalum notatum"), barba de bode ("aristida pallens"), algumas samambaias, pinheiros solitários e matas de galerias junto aos arroios.

2.3 - Descrição Geológica

A porção do Planalto Meridional abrangida no presente estudo caracteriza-se, sob o ponto de vista geológico, pela ocorrência de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (jurássico-cretáceo) e um pacote sedimentar sobreposto, pertencente à Formação Tupanciretã (terciária). O panorama geológico pode ser apreciado na figura 1.

Os vulcanitos da Formação Serra Geral são constituídos por duas seqüências de natureza distinta. Na área ocidental da região estudada, bem como ao longo de vales e escarpas mais profundos, afloram rochas de composição basáltica, que constituem a parte basal do pacote vulcânico. Entretanto, uma grande porção do Planalto Meridional consiste de derrames de composição ácida de cor cinza, que variam entre dácitos e riolitos, com dominância de tipos riódacíticos recentemente descritos (69, 70, 71) e de extensiva aplicação na Engenharia Civil, onde erroneamente a rocha é denominada "laje de basalto" (Fig. 2).

As diferenças de comportamento entre as duas seqüências, em relação aos parâmetros de resistência ao intemperismo, são notáveis, registrando-se solos espessos nas zonas de ocorrência de basaltos, enquanto as rochas ácidas raramente possuem uma capa de alteração superior a 1,0 metro. Estas últimas, além disso, caracterizam-se, em escala de afloramento, pela presença de escarpas desprovidas de alteração e um largo e extenso diaclasamento horizontal, que representa a feição estrutural mais marcada.

A cobertura sedimentar da Formação Tupanciretã apresenta exposições na parte setentrional da região estudada, embora, na grande maioria dos casos, apareça como um pacote extremamente alterado e pedogenizado. São dominantes os arenitos quartzosos, os sub-arcoseanos ou mesmo os líticos, mais raros os argilitos, enquanto os conglomerados são encontrados na base. Estruturas deposicionais são distintas em alguns casos, com aparecimento de feições acanaladas.

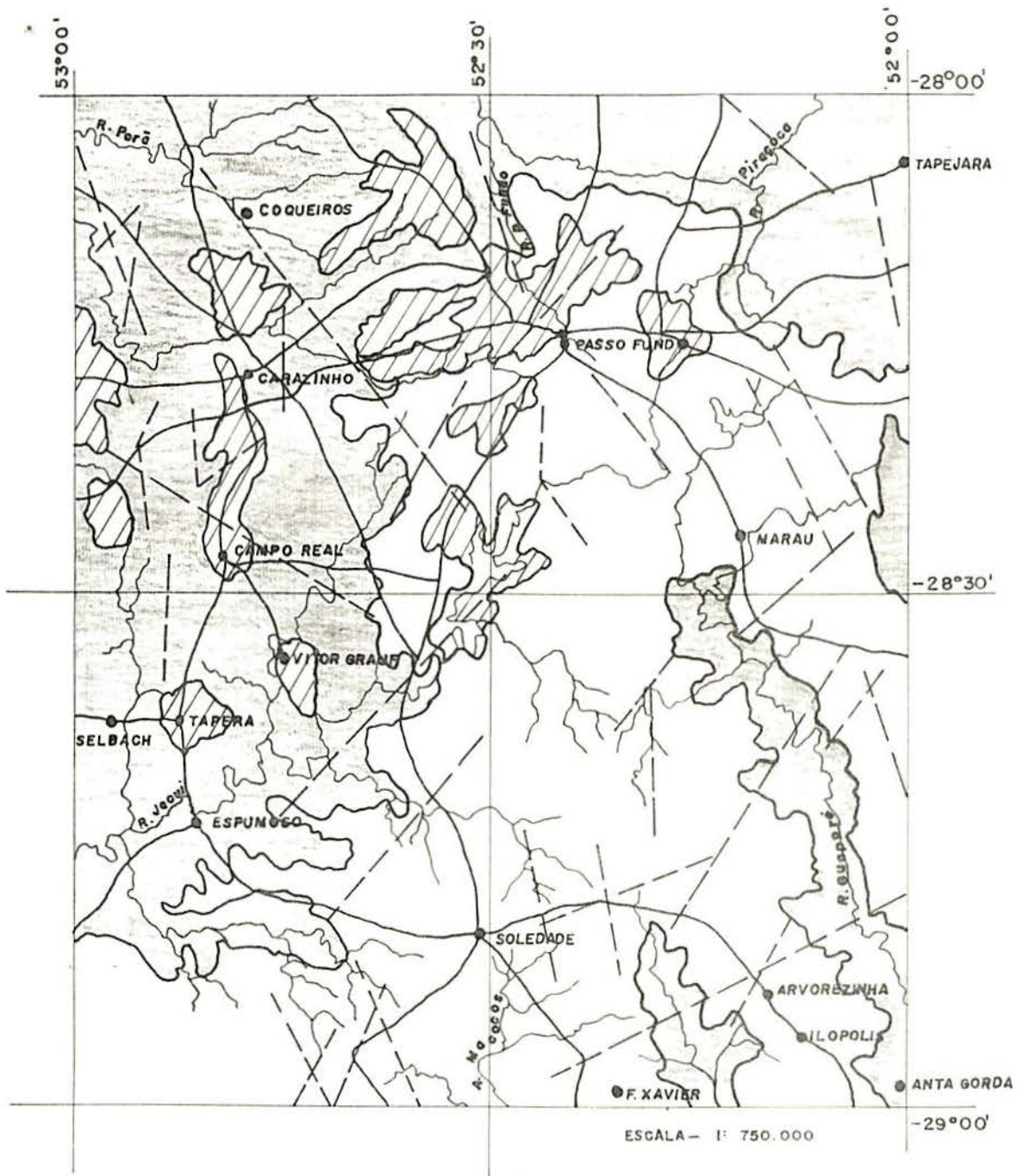


fig. 1. — ESBOÇO GEOLÓGICO AO GRAU DE PASSO FUNDO

CONVENÇÃO:









-  - FORMAÇÃO TUPANCIRETÃ (TERCIÁRIO)
 -  - VULCÂNICAS ÁCIDAS
 -  - VULCÂNICAS BÁSICAS
 -  - CONTATO
 -  - ALINHAMENTOS TECTÔNICOS
 -  - CIDADE
 -  - DRENAGEM
 -  - ESTRADAS
- FORMAÇÃO SERRA GERAL (CRETÁCEO-JURÁSSICO)



FIG. 2 - ASPECTO DA ROCHA VULCÂNICA ÁCIDA (RIOLITO)
COM TÍPICO DIACLASAMENTO HORIZONTAL



FIG. 3 - PERFIL DE UM SOLO DE RIOLITO

2.4 - Solos do Planalto Meridional

Os solos da região possuem características próprias que dependem de fatores intrínsecos como rocha mãe e condições climáticas, além de fatores menores como topografia e drenagem, entre outros.

As condições climáticas laterizantes favorecem a formação de solos tipicamente vermelhos, semelhantes a tantos outros que ocorrem em várias regiões do globo com latitude semelhante (64).

A rocha mãe, por outro lado, influencia nas características próprias dos solos, tais como granulometria, mineralogia e espessura.

Estes fatores, aliados às características geológicas do Planalto, permitem uma perfeita distinção entre os solos originados a partir dos sedimentitos da Formação Tupanciretã e os das rochas basálticas e riolíticas.

Os solos estudados situam-se no horizonte B, apresentam aspecto poroso, laterizados e cor marrom-avermelhada.

2.4.1 - Solos de arenito da Formação Tupanciretã

Os solos desta formação são diferenciados dos demais pela presença de uma abundante fração de areia, que se concentra nas valetas de rodovias e nas bases de corte, além de possuírem uma boa drenagem, propiciando a formação de frequentes vassorocas.

A espessura de tais solos é geralmente avantajada, superior a 2,50 m, do que resulta a inexistência de afloramento da rocha sã.

Um perfil típico de solo é descrito a seguir.

O horizonte A possui uma espessura da ordem de 50cm, apresentando uma coloração bruno-avermelhada e textura de

franco-arenosa e franco-argilosa.

O horizonte B tem uma espessura, em geral, superior a 200 cm, coloração vermelha escura e textura argilo-arenosa.

O horizonte C mostra uma espessura variável, sendo constituído por arenitos e/ou conglomerados arenosos intemperizados.

2.4.2 - Solos de basalto

Os solos residuais de basalto apresentam, pela disponibilidade de ferro na rocha mãe, uma cor vermelha intensa característica, com ocasional aparecimento de concreções ferruginosas.

A textura de tais solos é argilosa, com uma drenagem bem desenvolvida. O registro de uma fração areia e silte resulta de minúsculas amígdalas de quartzo na rocha mãe ou de uma contribuição coluvial de solos da Formação Tupanciretã. A espessura é igualmente avantajada, pois o basalto possui elevado potencial de alterabilidade pelas condições de drenagem e relevo associado.

Selecionou-se, na área do projeto, um perfil de solo de basalto, cujos horizontes revelam as seguintes características:

O horizonte A possui uma espessura, em geral, superior a 60 cm, coloração bruno-avermelhada e textura argilosa a argilo-arenosa.

O horizonte B apresenta espessuras superiores a 200 cm, coloração vermelha escura e textura argilosa.

O horizonte C é de espessura variável e consiste de basalto intemperizado.

2.4.3 - Solos de riolito

Tais solos caracterizam-se por uma espessura reduzida que, em certos locais, não ultrapassa a 60 cm, resultando em estradas de leitos empedrados e lajeados. Este comportamento é explicável pela extrema resistência que tais rochas apresentam e uma fraca alterabilidade, sob o ponto de vista mineralógico (Fig. 3).

A cor desses solos é geralmente cinza (cinza-claro, marrom-claro), o que se explica pelo baixo teor de ferro na rocha mãe, embora a presença de rochas basálticas próximas possa fornecer pigmentos vermelhos.

A textura do solo, em parte, assemelha-se à de rocha basáltica, com registro de uma fração arenosa local.

O perfil típico de um solo de riolito na área é descrito da seguinte maneira:

O horizonte A possui uma espessura de 20 a 30 cm, coloração bruno-amarelada e bruno-escuro e textura argilosa.

O horizonte B é pouco espesso, em torno de 50 cm, de coloração cinza-amarronada a vermelho-amarelada e textura argilosa a argilo-siltosa.

O horizonte C é de espessura reduzida, formado por rocha semi-intemperizada, sob forma de lajes.

2.5 - Classificação Pedológica

O conhecimento pedológico é de essencial importância nos estudos de solos. A integração dos conhecimentos de pedologia, geologia e mecânica dos solos, fornecendo uma grande riqueza de informações sobre o comportamento dos mesmos, permite classificá-los com maior precisão no tocante às propriedades de engenharia.

A classificação pedológica dos solos do Rio Grande do Sul foi baseada em levantamentos de reconhecimentos que,

segundo Lemos e colaboradores (46), compreendem unidades de mapeamentos que são, por sua vez, formadas por subdivisões de classes de solos.

Com base no trabalho de levantamento e reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul levado a efeito por Lemos e colaboradores (46), foi possível classificar os solos da área conforme mostram a figura 4 e o quadro II.

A maioria dos solos estudados classifica-se como latossolos vermelho-escuros (PF), constituindo-se os demais em latossolos roxos (EC), lateríticos bruno-avermelhados (E e O), brunizens avermelhados (C), litólicos (CH e G) e podzólicos vermelho-escuros (JC).

Uma conceituação sumária das classes de solos acima mencionados, segundo Larach e colaboradores (45) e Lemos e colaboradores (46), é dada a seguir:

a) latossolos vermelho-escuros (PF) - caracterizam-se por serem solos profundos, bem drenados, de coloração avermelhada e muito friáveis. Normalmente apresentam uma anisotropia vertical pouco acentuada.

b) latossolos roxos (EC) - são solos moderadamente ácidos, com elevado teor de óxido de ferro, apresentando B latossólico e de cores vermelho-escuro-acinzentado e vermelho-escuro. São bastante porosos, friáveis e bem drenados.

c) lateríticos bruno-avermelhados (E e O) - compreendem solos com B textural, relativamente drenados, apresentando cor bruno-avermelhado-escuras. Quimicamente são ácidos, com saturação de bases baixas e teores altos de alumínio trocável.

d) brunizens avermelhados (C) - são solos profundos e apresentam uma coloração marrom-avermelhado-escura e são relativamente bem drenados.

e) litólicos (CH e G) - são solos poucos desenvolvidos que, a uma profundidade em torno de 40 cm, apresentam rocha consolidada. Abrangem desde solos com horizonte A direta

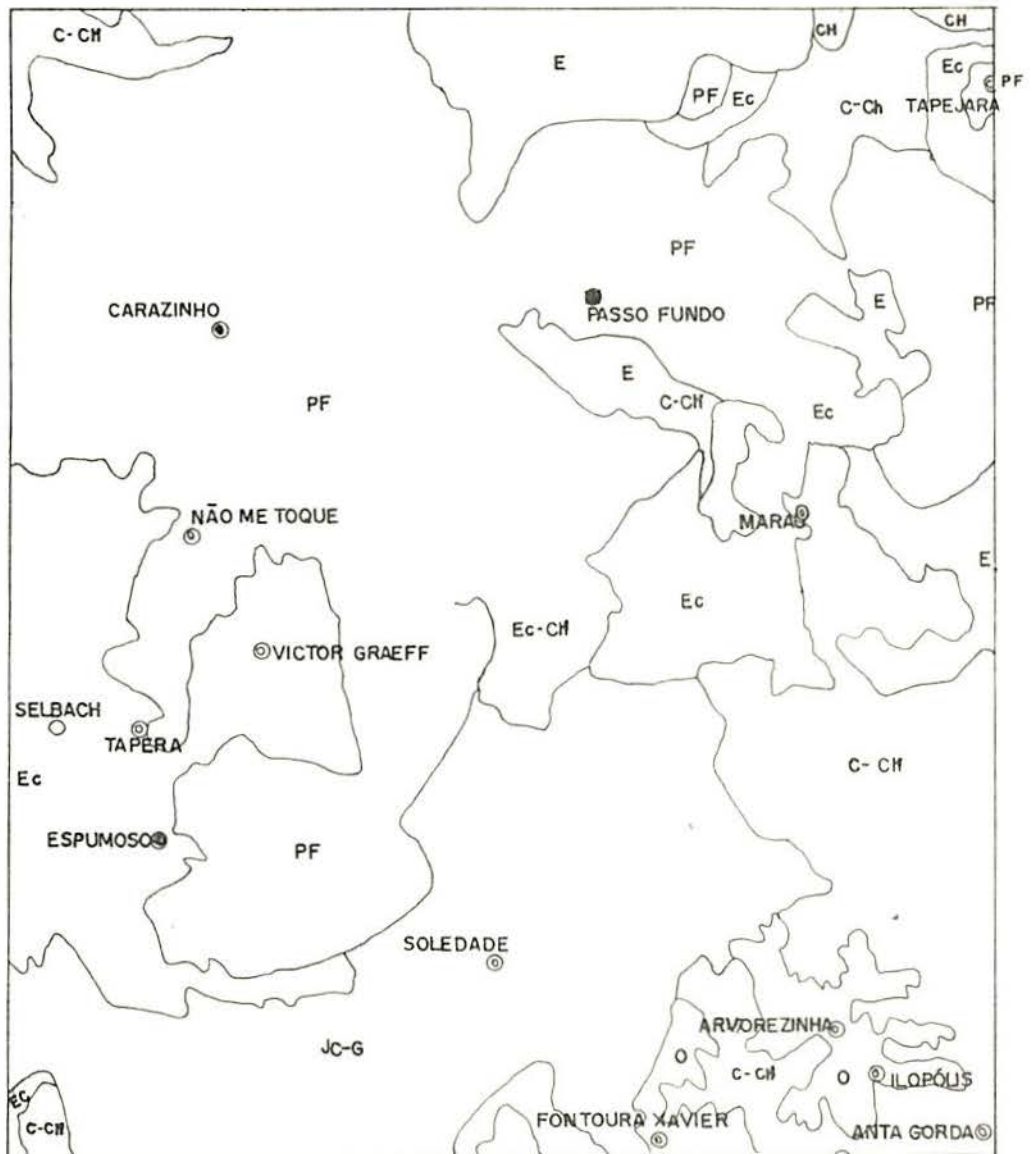


fig. 4 - CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICA SEGUNDO LEMOS

CONVENÇÃO DAS CLASSES DE SOLOS :

PF - LATOSSOLOS VERMELHO - ESCUROS
 E e O - LATERÍTICOS BRUNO - AVERMELHADOS
 EC - LATOSSOLOS ROXOS
 C - BRUNIZENS AVERMELHADOS
 CH e G - LITÓLICOS
 JC - PDOZÓLICOS VERMELHO - ESCUROS

QUADRO II

CLASSIFICAÇÃO PEDOLÓGICAS DOS SOLOS

Ponto	Litologia	Localização	Classificação Pedológica
1	basalto	Alm. Tramandarê	PF
2	basalto	Coqueiros	PF
3	arenito	Capão Bonito*	PF-E
4	basalto	Col. Araújo*	E
5	basalto	Eng. Englert	E
6	basalto	Tapejara	EC
7	arenito	Cruzinha*	PF
8	arenito	Carazinho	PF
9	arenito	Bela Vista*	PF
10	riolito	Passo Fundo	PF
11	riolito	Mato Castelhana*	PF
12	riolito	Faxinal*	PF
13	arenito	Arroio Cotovelos*	PF
14	arenito	Não-me-Toque	PF
15	arenito	Pessegueiro*	PF
16	riolito	Carreta Quebrada*	PF
17	riolito	Marau	C-CH
18	basalto	Vila Gentil*	E
19	arenito	Tapera	EC
20	arenito	Vitor Graeff	EC
21	riolito	Ibirapuitã*	PF
22	basalto	P. do Rossoji*	EC
23	basalto	Camargo	EC
24	riolito	Montauri*	E
25	basalto	L. Progresso*	EC
26	basalto	São Lourenço*	PF
27	riolito	Soledade	JC-G
28	riolito	Rincão Policarpo	JC-G
29	basalto	Alvorada	C-CH
30	riolito	L. São Paulo*	C-CH
31	riolito	S. Júlio Cardoso*	JC-G
32	riolito	R. Oliveiras*	JC-G
33	riolito	São Tomé*	JC-G
34	riolito	Fontoura Xavier	O
35	riolito	Arvorezinha	O
36	basalto	Anta Gorda	C-CH

*localidade mais próxima

Convenção das classes de solos:

PF- latossolos vermelho-escuros

E e O - lateríticos bruno-avermelhados

EC - latossolos roxos

C - brunizens avermelhados

CH e G - litólicos

JC - pdozólicos vermelho-escuros

mente sobre a camada rochosa até aqueles com horizonte B relativamente desenvolvido, porém pouco espesso.

f) podzólicos vermelho-escuros (JC) - são solos que apresentam um B textural de cor vermelhada, de boa drenagem e com pH menor que 5,0.

3 - METODOLOGIA

As amostras estudadas foram coletadas de solos seguramente residuais, através de um controle rígido de campo, que permitiu definir ausência de feições de colúvios nos pontos selecionados, retirando-se o material de terrenos planos.

A área em estudo foi dividida em uma malha, cujos nós distavam, aproximadamente, 20 km entre si e nos quais situavam-se os pontos de coleta.

A amostragem foi feita com base em mapa geológico, aerofotointerpretação e reconhecimento de campo.

3.1 - Localização dos Pontos de Amostragem

A região fisiográfica estudada situa-se no chamado Planalto Meridional, entre as coordenadas 28º-29º sul e 52º 53º oeste de Greenwich, ocupando uma extensão da ordem de 10.000 km², pertencente à área chamada grau de Passo Fundo.

Na figura 5 estão localizados os pontos de amostragem, que são, paralelamente, apresentados no quadro III.

3.2 - Métodos de Amostragem

Coletou-se um total de 36 amostras deformadas e 6 blocos indeformados, distribuídos por critérios litológicos de seleção. As amostras indeformadas seguiram o processo de extração de blocos cúbicos de 40 cm de aresta (Figs. 6 e 7). Procedeu-se à vedação com parafina, preenchendo-se os espaços vazios com serragem e isopor, transporte cuidadoso e estocagem em câmara úmida.

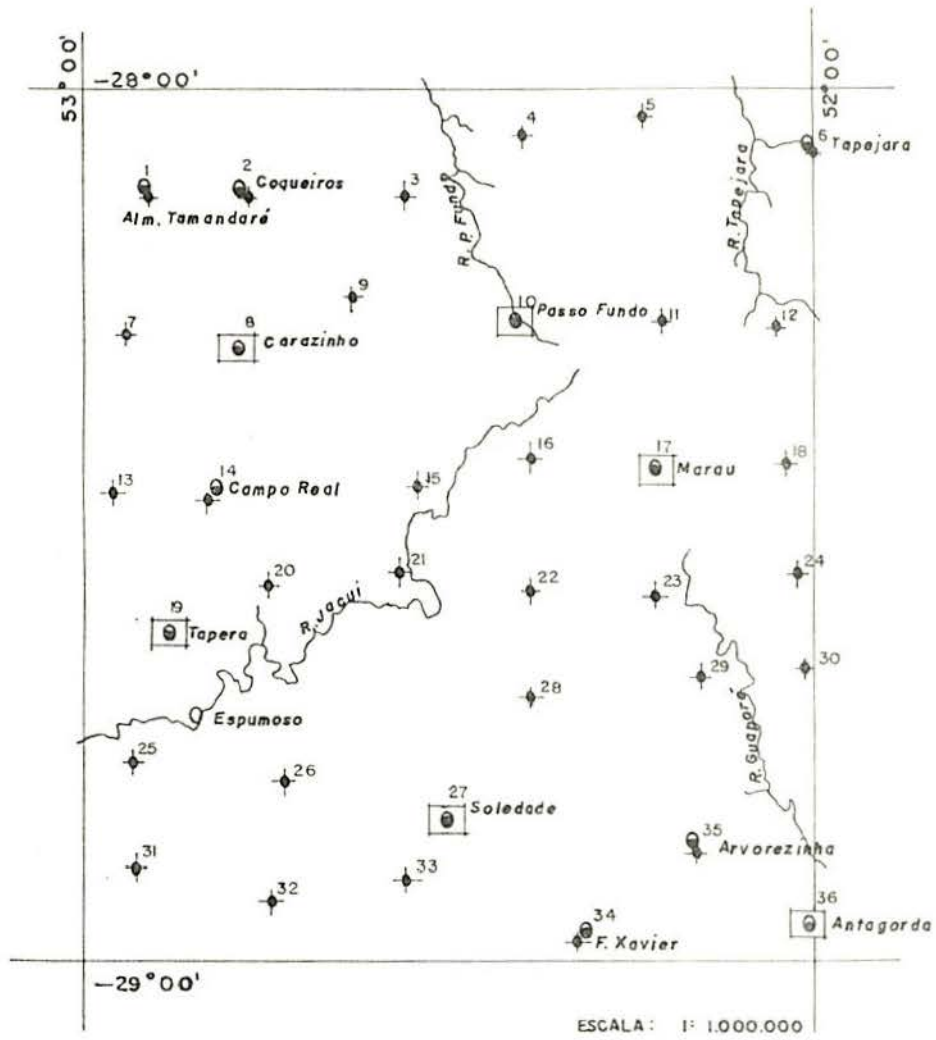


fig 5 - LOCALIZAÇÃO DA AMOSTRAGEM

- CONVENÇÃO
- RIO
 - AMOSTRA DEFORMADA
 - CIDADE
 - AMOSTRA INDEFORMADA



QUADRO III

COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Ponto	Latitude (w de Greenwich)	Longitude	Altitude (m)	Localização
1	52°54'50"	28°06'50"	560	Alm. Tamandaré
2	52°46'50"	28°07'00"	600	Coqueiros
3	52°34'20"	28°06'10"	680	Capão Bonito*
4	52°22'30"	28°02'30"	700	Col. Araújo*
5	52°14'20"	28°01'30"	680	Eng. Englert
6	52°02'00"	28°04'20"	720	Tapejara
7	52°57'10"	28°16'20"	560	Cruzinha*
8	52°47'20"	28°17'10"	580	Carazinho
9	52°33'30"	28°14'40"	600	Bela Vista*
10	52°27'00"	28°16'00"	680	Passo Fundo
11	52°12'40"	28°16'20"	740	Mato Castelhano*
12	52°03'10"	28°15'40"	770	Faxinal*
13	52°48'00"	28°27'20"	460	Arroio Cotovelos*
14	52°49'10"	28°27'30"	490	Não-me-Toque
15	52°33'00"	28°26'40"	530	Pessegueiro*
16	52°22'20"	28°27'10"	540	Carreta Quebrada
17	52°12'20"	28°27'00"	580	Marau
18	52°02'00"	28°25'30"	770	Vila Gentil*
19	52°52'10"	28°37'28"	460	Tapera
20	52°43'40"	28°33'30"	400	Vitor Graeff
21	52°35'30"	28°35'20"	560	Ibirapuitã*
22	52°24'50"	28°35'00"	640	P. do Rossoji*
23	52°12'10"	28°35'00"	530	Camargo
24	52°01'50"	28°33'10"	620	Montauri*
25	52°55'10"	28°45'50"	370	L. Progresso
26	52°42'00"	28°48'20"	520	São Lourenço*
27	52°30'50"	28°49'30"	680	Soledade
28	52°27'00"	28°49'50"	720	Rincão Policarpo
29	52°09'40"	28°40'20"	500	Alvorada
30	52°02'20"	28°40'20"	640	L. São Paulo*
31	52°55'30"	28°53'50"	560	S. Júlio Cardoso*
32	52°45'10"	28°55'00"	570	R. Oliveiras*
33	52°32'10"	28°55'00"	680	São Tomé*
34	52°20'50"	28°59'00"	700	Fontoura Xavier
35	52°11'50"	28°52'20"	760	Arvorezinha
36	52°00'50"	28°59'10"	400	Anta Gorda

*Localidade mais próxima

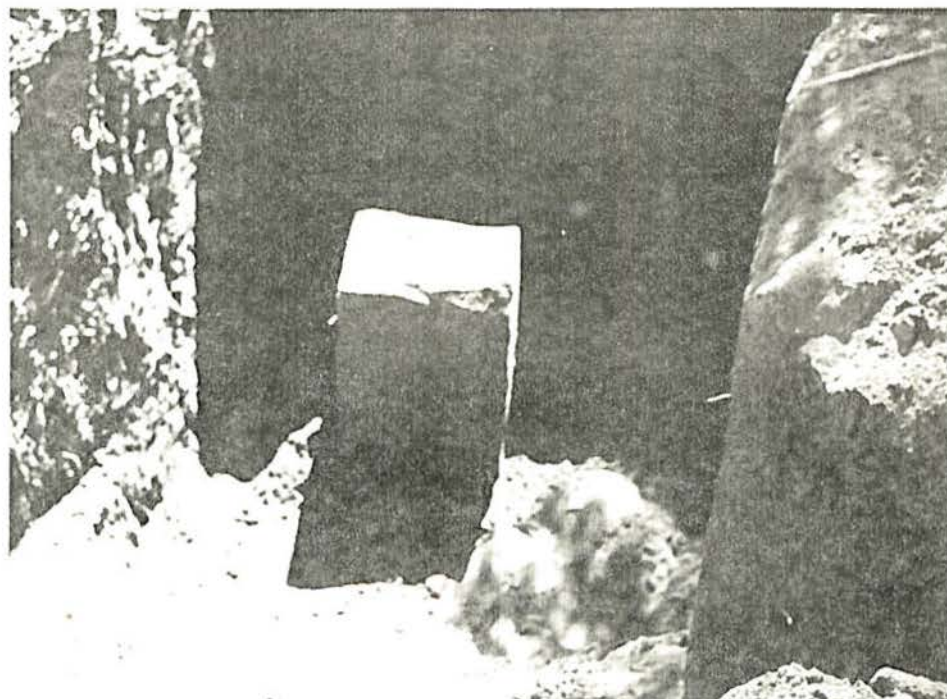


FIG. 6 - PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE AMOSTRA INDEFORMADA NA CIDADE DE CARAZINHO



FIG. 7 - VEDAÇÃO COM PARAFINA APÓS A EXTRAÇÃO DA AMOSTRA INDEFORMADA

Para a coleta de amostras deformadas, manteve-se, como critério básico e restritivo, uma profundidade de 50 a 100 cm (no horizonte B). Estas foram condicionadas em sacos plásticos de 15 kg, aí mantidos até a sua utilização.

3.3 - Ensaio de Laboratório

Foram realizados 417 ensaios, compreendendo 6 análises químicas e 6 estudos de microscopia eletrônica nas amostras indeformadas, 36 análises por difratograma de raio X, 235 ensaios de caracterização (54 de densidade real dos grãos, 72 granulometrias e 109 ensaios de Atterberg), 36 de compactação, 24 de Índice Suporte Califórnia (ISC) e 72 ensaios de comportamento mecânico (48 de compressão confinada e 24 de cisalhamento direto).

3.3.1 - Análises químicas

A determinação das análises conduz a um conhecimento mais amplo das propriedades químicas dos solos e possibilitar explicar com maior eficiência o seu comportamento geotécnico, contribuindo para uma identificação dos argilo-minerais presentes nos solos estudados.

Foram feitas as seguintes determinações:

- . pH
- . cátions trocáveis (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ e K^+)
- . alumínio trocável (Al^{+++}) e hidrogênio (H^+)
- . matéria orgânica
- . sílica (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

Para a realização destas análises, foram adotados os seguintes procedimentos:

- a determinação do pH dos solos foi feita usando o potenciômetro elétrico com eletrodos de vidro na proporção solo/líquido de 1:1, com o tempo de contato superior a meia hora, sendo a amostra homogeneizada imediatamente antes da leitura (65).

- Os cátions trocáveis Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ e K^+ foram determinados segundo métodos complexométrico e titulação pelo EDTA e fotométrico e espectrofotométrico descritos por Jackson (38) e lidos no fotômetro de chama de Coleman.

- O alumínio trocável (Al^{+++}) e o hidrogênio (H^+) foram obtidos pelo método complexométrico e titulação pelo hidróxido de sódio descrito por Vettori (92).

- A matéria orgânica é determinada multiplicando-se os resultados do carbono orgânico por 1,724. O carbono orgânico determinou-se segundo método volumétrico pelo bicromato de potássio e titulação com uma solução padrão de sulfato ferroso.

- As determinações de SiO_2 , Al_2O_3 foram realizadas após o ataque de H_2SO_4 durante meia hora, em refluxo, SiO_2 e Fe_2O_3 foram medidos pelo método volumétrico de oxirredução, utilizando como agente titulante $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ - 0,1N na presença do íon PO_4 para complexar o ferro trivalente e, como indicador, a difenilamina. Al_2O_3 , pelo método complexométrico direto com solução de tritiplex III, usando como titulador o sulfato de zinco na presença da ditizona como indicador.

Com os valores obtidos, foram calculadas capacidade de troca de cátions (CTC), saturação de cátions (V) e Kr.

A capacidade de troca de cátions (CTC) calcula-se somando algebricamente os seguintes valores: $S + (\text{H}^+ + \text{Al}^{+++})$, sendo S a soma de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ e K^+ .

A saturação de cátion (V) foi calculada pela fórmula $V = S \cdot 100/\text{CTC}$.

A relação Kr é determinada em função dos valores expressos em porcentagem de SiO_2 , Al_2O_3 , divididos por seus res

pectivos pesos moleculares, dada pela seguinte expressão:

$$K_r = \frac{1,70 \text{ SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,64 \text{ Fe}_2\text{O}_3}$$

As análises químicas foram determinadas por laboratoristas do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

3.3.2 - *Microscopia Eletrônica*

Os princípios e as técnicas deste método foram desenvolvidos em análises de rochas e outros materiais e, mais recentemente, têm sido aplicados para mecânica dos solos.

O estudo de vários níveis de macro e microestrutura é de grande importância para o conhecimento do comportamento de solos argilosos em engenharia.

A técnica usada no estudo da preparação do solo foi a sugerida por Barden e Sides (12,13,14). Este método consiste em realizar 50 a 100 aplicações e remoções de fita adesiva ("peeling") na superfície da amostra de 1 cm^3 , a fim de minimizar a perturbação que possa ter ocorrido na preparação.

Após a fase de preparação, as amostras eram recobertas por uma fina película metálica de alumínio de espessura em torno de 2000 \AA , em câmaras de metalização e vácuo da GEOL-JEE-4B.

As observações eram feitas em microscópio de varredura Cambridge S-600, do Instituto de Geociência da UFRGS, com aumentos que variaram de 50X a 20.000X.

3.3.3 - *Análises mineralógicas*

Na identificação dos argilo-minerais, utilizou-se di

fratômetro Phillips, Modelo Norelco, com registro gráfico, sendo o estudo realizado com lâminas orientadas e tubo de cobre, mantendo-se a velocidade de 20-280/min.

As argilas foram dispersas em água destilada, à qual era adicionado defloculante (hexametáfosfato de sódio), caso houvesse floculação, de modo a formar uma suspensão homogênea, a fim de selecionar para estudo a fração menor de 2 μ . A metodologia prescreve a extração da coluna de suspensão acima de 5 cm após 2 horas de decantação. Parte da suspensão recolhida era espalhada em lâminas de vidro secada ao ar para orientação preferencial das partículas. Uma das lâminas era calcinada a uma temperatura de 600°C durante 4 horas, enquanto a outra era glicolada durante 2 horas a uma atmosfera saturada de vapor de glicoletilênico em um dissecador.

Além de analisar a fração argila, foi feito um estudo de minerais na fração areia, retida em peneira 200, utilizando microscopia petrográfica do tipo polarizadora. Para este tipo de análise, espalha-se uma porção de amostra sobre uma lâmina de vidro, adicionando-se óleo de imersão adequado para estudos mineralógicos.

3.3.4 - Ensaios de caracterização

A determinação de propriedades físicas de solos residuais deformados é feita para dar uma indicação do comportamento mecânico do material, bem como para situá-lo de um modo comparativo frente a outros materiais já classificados. Como ocorrem variações nas metodologias empregadas nos diversos ensaios, elas serão indicadas a seguir.

Para caracterização geotécnica das amostras coletadas com suas respectivas litologias, executaram-se ensaios de densidade real dos grãos, granulometria (peneiramento e sedimentação), limites de liquidez e plasticidade.

Conhecidas as consequências da secagem do material

na utilização dos ensaios citados por Grim (36) e Pena Carvalho (66), adotou-se o processo de secagem ao ar.

Todas as amostras foram deixadas secar ao ar antes de serem destorradas e quarteadas. O destorramento foi feito em almofariz de porcelana, com mão de gral envolvida por borracha.

Na sedimentação, usou-se hexametáfosfato de sódio como defloculante, a uma concentração de 45,7 g/l. O tempo de dispersão foi de 15 minutos, de acordo com a norma MB-32 (6) da ABNT, tendo sido de 24 horas o tempo de permanência na concentração.

A determinação dos limites de liquidez, dos limites plasticidade e da densidade real dos grãos seguiu as normas da ABNT: MB-30 (4), MB-31 (5) e MB-28 (3) respectivamente.

3.3.5 - Ensaios de compactação e ISC

Inicialmente foi feita uma homogeneização geral do material coletado de cada amostra para neutralizar algumas diferenças que porventura existissem. Todo material apresentou o diâmetro inferior ao da peneira nº 4.

Procedeu-se ao ensaio de compactação segundo o método brasileiro MB-33 (7) da ABNT, com a reutilização do material.

Cada curva era composta, no mínimo, de 5 pontos, distribuindo-se 3 no ramo seco e 2 no ramo úmido, com uma diferença de 3% de umidade em relação ao ponto anterior.

A previsão da umidade ótima em função dos limites de liquidez e de plasticidade de Bowles (18) (Fig. 8) não resultou satisfatória, razão pela qual foi determinada por tentativas.

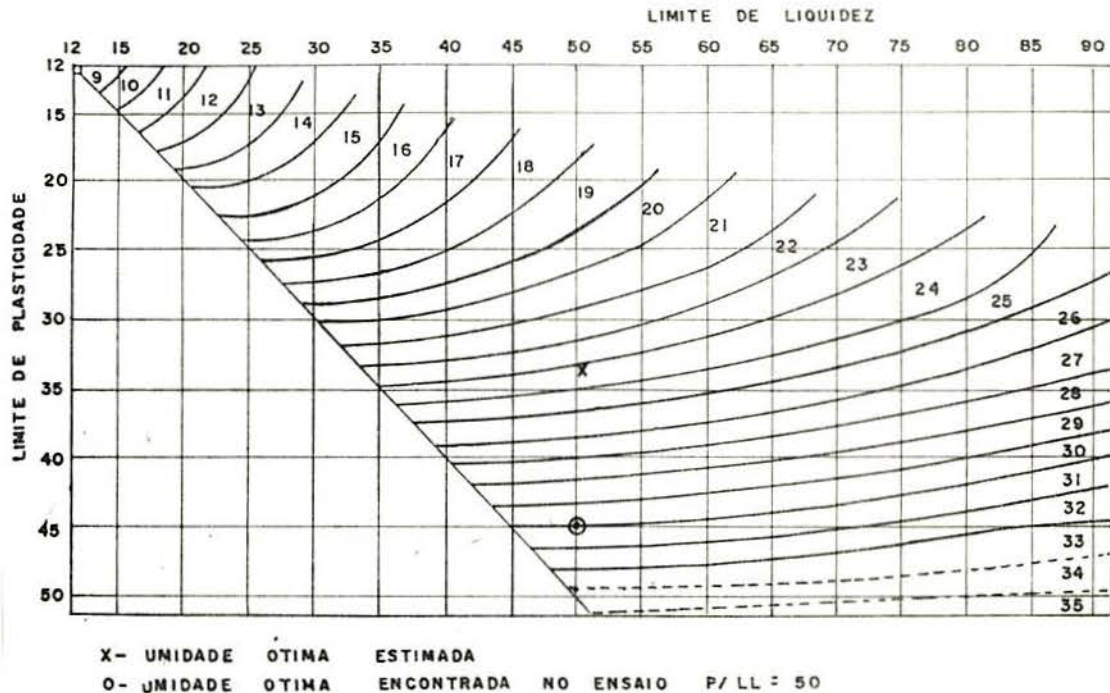


fig. 8 - GRÁFICO DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE ÓTIMA EM FUNÇÃO DOS LIMITE DE LIQUIDEZ E DE PLASTICIDADE DADOS POR BOWLES

A energia empregada foi de próctor normal em ambos os ensaios.

Os ensaios de ISC seguiram as normas do DNER (DNER-ME 50-64). As amostras foram compactadas na umidade ótima obtida no ensaio de compactação e rompidas após quatro dias de imersão, determinando-se a expansão final para cada amostra em saída.

Os ensaios de compactação foram realizados em todas as amostras coletadas, o mesmo não ocorrendo com os de ISC, para os quais foram selecionados 7 amostras por litologia.

3.3.6 - Ensaaios de comportamento mecânico

Estes ensaios se dividiram em três tipos: compressão confinada, colapsibilidade e cisalhamento direto.

Em todos os casos as amostras foram extraídas dos blocos indeformados. Os anéis de compressão confinada e cisalhamento direto eram lubrificados internamente com graxa de silicone, e as amostras eram introduzidas por cravação lenta, à medida que o solo era extraído do bloco. O excesso de solo em volta do anel era cuidadosamente retirado durante a moldagem da amostra, determinando-se a umidade inicial das amostras a serem ensaiadas.

3.3.6.1 - Compressão confinada

O ensaio de compressão confinada ou consolidação é definido como fenômeno de redução de volume devido à expulsão da água dos vazios do solo. O processo de expulsão da água é em geral, bastante lento, resultando com isso o desenvolvimento de pressões neutras. O desenvolvimento e a dissipação de poro-pressão estão relacionados com a velocidade de carregamento, comprimento do caminho de drenagem, permeabilidade e compressibilidade do solo. Normalmente, nas argilas de deposição, o processo de adensamento é bastante lento, o mesmo não ocorrendo para as argilas porosas, que são bem drenadas.

As amostras do solo em estudo foram submetidas a ensaio de compressão confinada de forma a se obter parâmetros de compressibilidade.

O equipamento utilizado é de fabricação de WYKEHAM FARRANCE e as prensas são tipo Bishop. As células de compressão confinada usadas permitiram ensaiar amostras de 5 cm de diâmetro por 1,9 cm de altura.

Em todos os ensaios foram aplicadas pressões de 0,25 kgf/cm², 0,50 kgf/cm², 1,0 kgf/cm², 2,0 kgf/cm², 4,0 kgf/cm².

cm^2 e $8,0 \text{ kgf/cm}^2$, em estágios de 24 horas, ou seja, correspondendo a uma relação $\frac{\Delta P}{P} = 1$

Realizaram-se ensaios com amostras na umidade natural e inundadas, sendo que as primeiras eram envolvidas com um pano úmido para não perderem a umidade nelas contida.

3.3.6.2 - Colapsibilidade

Os ensaios de colapsibilidade foram realizados, utilizando os aparelhos de compressão confinada, com pressões de $0,25 \text{ kgf/cm}^2$, $0,50 \text{ kgf/cm}^2$, $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ e $2,0 \text{ kgf/cm}^2$. Para cada pressão aplicada após 24 horas, até atingir a pressão requerida, a amostra era inundada.

3.3.6.3 - Cisalhamento direto

A previsão da resistência ao cisalhamento pode ser feita através de ensaios de laboratório em que se procura simular uma situação existente. Há limitações de ordem prática e teórica, pois nem sempre se consegue impor a uma amostra ensaiada em laboratório os estados de tensões existentes no campo. Por causa dessas limitações de conhecimento real "in situ" e dos próprios equipamentos de ensaios e amostragem, muitos dos procedimentos de laboratório para medir as propriedades dos solos são basicamente de natureza empírica.

Os ensaios foram realizados em equipamentos Wykeham Farrance com amostras extraídas dos blocos indeformados. As amostras apresentaram dimensões de 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura, ensaiadas sob quatro níveis de tensões de adensamento para cálculo de envoltória de Mohr-Coulomb, a saber: $0,50 \text{ kgf/cm}^2$, $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ e $3,0 \text{ kgf/cm}^2$.

Os ensaios são do tipo consolidado drenado (CD) com uma velocidade de $0,0061 \text{ mm/min}$, definida através de pesquisa.

Segundo Lambe (43), a velocidade entre 0,005mm/min e 0,008 mm/min tem sido satisfatória para amostras de 19 cm² para muitas argilas.

As amostras foram ensaiadas ou na umidade natural, ou inundadas, sendo que as últimas permaneceram 24 horas imersas sob uma pressão de adensamento igual à do ensaio a ser realizado.

As tensões normais e cisalhantes foram calculadas sem considerar a área efetiva. Segundo Mello (52), a correção ou não da área efetiva de contato durante o cisalhamento tem influência desprezível na curva tensão de cisalhamento versus tensão normal. O autor considerou que as diferenças são inferiores às imprecisões experimentais.

4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentadas e analisadas as propriedades e as características das três unidades de solos residuais: basalto, riolito e arenito.

4.1 - Análises Químicas

Pelo exame dos valores apresentados na tabela I, verifica-se que solos oriundos da decomposição dos diversos tipos de litologias estudadas apresentam pH baixo, isto é, são ácidos. Observam-se também valores baixos referentes aos cátions trocáveis, capacidade de troca de cátions, soma de cátions e de matéria orgânica, sendo possível notar que:

- O cátion trocável presente é o Ca^{++} , com exceção dos solos de arenito (Carazinho e Tapera) que apresentam o Mg^{++} , conduzindo a uma argila cálcica e magnesianas. Isto indica que estes solos apresentam um elevado grau de plasticidade (76). Este aumento do valor de plasticidade nas argilas cálcicas e magnesianas em relação às argilas de forma sódica é explicado por Grim (34) como sendo devido à formação de uma película de água rígida, possibilitando o acréscimo do teor de água necessário para se ter água líquida. Nos solos de Erexim e Passo Fundo, caracterizados por Klamt (41), nota-se também a dominância de íon de Mg^{++} sobre o Ca^{++} . O autor justifica ser o Mg^{++} mais resistente à lixiviação, podendo ocorrer um maior carreamento de íon de Ca^{++} nestes solos.

- Valores baixos de capacidade de troca de cátions (CTC) indicam a existência de argilo-mineral do tipo 1:1 (caulinita ou haloisita), apresentado por Grim (34), o que é confirmado em análises mineralógicas. Outros fatores que contribuíram para valores baixos de capacidade de troca de cátions fo

TABELA I

VALORES DE PH, CÂTIONS TROCÁVEIS, RELAÇÕES CATIÔNICAS E MATÉRIA ORGÂNICA DO GRAU DE PASSO FUNDO

LOCALIDADE	PH	CÂTIONS TROCÁVEIS (mE/100g)				SOMA DAS BASES				MATÉRIA ORGÂNICA (%)
		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	S (mE/100g)	H ⁺ +AL ⁺⁺⁺ (mE/100g)	AL ⁺⁺⁺ (mE/100g)	C.T.C (mE/100g)	
SOLEDADE.....	5,5	4,990	1,342	0,069	0,143	6,544	6,70	1,71	13,244	4,5
TAPERA	5,1	0,222	0,258	0,013	0,027	0,518	3,53	1,92	4,048	0,2
MARAU	5,0	0,845	0,230	0,009	0,179	1,263	4,87	1,83	6,133	0,2
CARAZINHO....	5,1	0,045	0,179	0,013	0,054	0,291	3,65	1,51	3,941	0,2
PASSO FUNDO..	4,9	0,745	0,214	0,035	0,900	1,084	5,60	2,83	6,684	0,8
ANTA GORDA...	4,9	2,685	1,376	0,078	0,240	4,379	5,70	2,03	10,079	0,2

ram os elevados teores de óxido de ferro e alumínio e a pequena porcentagem de material orgânico que fornece nutriente para o acréscimo de CTC. A camada em estudo apresenta características próprias de baixa matéria orgânica.

- A soma de cátions (S) é baixa, notando-se uma variação de 6,544 a 0,291. O horizonte B, caracterizado por Lemos e colaboradores (46), apresenta, na unidade de Passo Fundo, valores de soma de cátions inferiores aos do horizonte estudado no presente trabalho.

- A quantidade de matéria orgânica nos solos foi pequena, com exceção dos solos de Soledade, que apresentaram valores um pouco elevados. Esta pequena quantidade se deve ao fato de se estar em presença do horizonte B.

Os dados obtidos confirmam os resultados encontrados por Evans (30) quanto aos valores baixos de pH e de matéria orgânica. Segundo o autor, estes valores baixos estão relacionados, em grande parte, com as condições climáticas, a vegetação e a natureza da rocha mãe. Os valores encontrados por ele estão relacionados na tabela II

Outra relação de grande importância que aponta o grau de laterização dos solos é o Kr (relação molecular sílica/sesquióxidos de alumínio e ferro). Vargas (89) comenta que o processo de laterização está quase sempre presente nos solos residuais provenientes de rochas ígneas que formam os constituintes lateríticos, isto é, alumina e sesquióxido de ferro, sendo as concreções de sesquióxido responsáveis pela cor avermelhada dos solos lateríticos.

Vários autores, tais como Winterkorn (94) e Bawa (16), limitaram intervalos para classificação dos solos em função de Kr.

Na tabela III, verifica-se que os valores obtidos no presente estudo enquadram-se dentro dos intervalos estabelecidos para solos lateríticos (94,75). Entretanto, Santana (75) comenta que a relação Kr dada por diversos autores para a classificação de solos lateríticos, não é um fator determinante.

TABELA II

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS SOLOS LATERÍTI
COS DE UGANDA

AMOSTRA Nº	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	MATÉRIA ORGÂNICA (%)	pH
1	2,91	0,4	5,4
2	2,925	0,7	4,3
3	2,865	0,4	4,5
4	2,775	0,2	8,1
5	2,690	1,0	4,6
6	2,790	0,2	4,3

Fonte: Gidigasú (30)

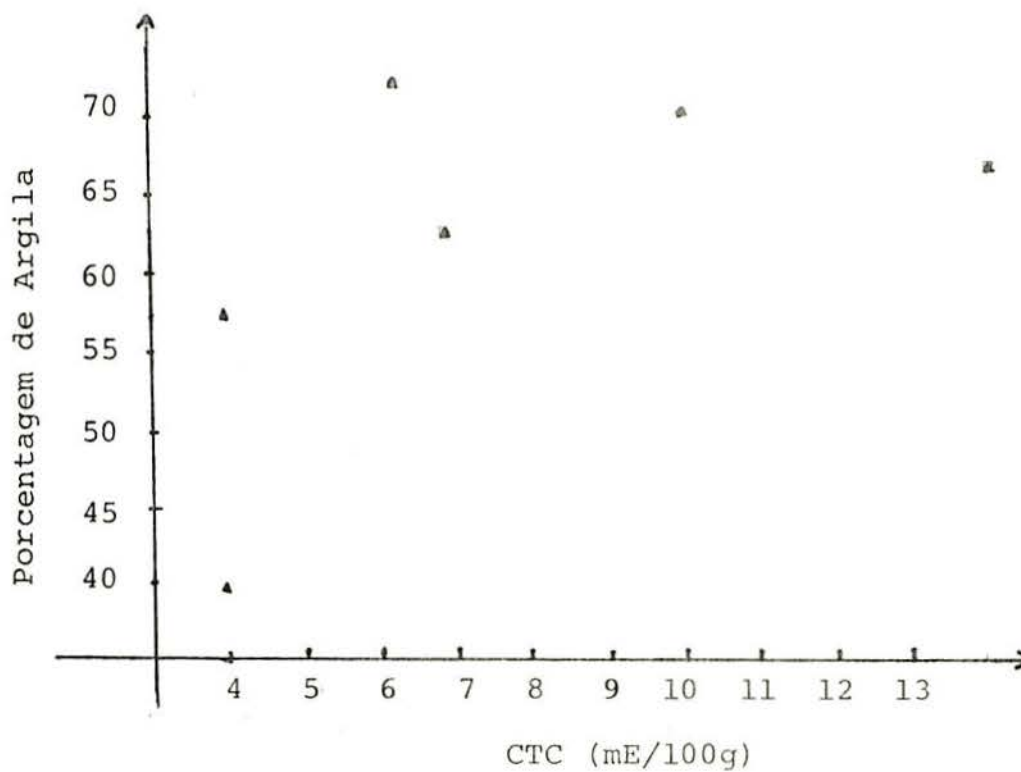


FIG. 9 - RELAÇÃO ENTRE CTC E PERCENTAGEM DE ARGILA

TABELA III

VALORES DOS COMPLEXOS DE LATERI-
ZAÇÃO DOS SOLOS DE PASSO FUNDO

LOCALIDADE	COMPLEXO DE LATERIZAÇÃO			Kr
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
SOLEDADE.....	8,6	23,1	26,1	1,55
TAPERA.....	7,8	13,9	16,2	1,46
MARAU	15,7	27,3	29,7	1,35
CARAZINHO...	5,7	17,3	17,7	1,36
PASSO FUNDO.	9,0	27,1	26,6	1,38
ANTA GORDA	13,9	21,9	27,4	1,51

Demonstra o referido autor que outros fatores, tais como cor do solo, presença de matéria orgânica, tipo de argilo-mineral e expansibilidade devem ser considerados na análise desses solos. Um estudo realizado pela Agency for International Development (2) observa que as análises químicas não são suficientes para revelar a origem e a natureza da composição de solos lateríticos e que outros fatores devem ser analisados para melhor classificá-los.

Importantes trabalhos têm sido realizados com solos lateríticos em muitos países, durante anos, e um estudo detalhado da literatura disponível já foi apresentado por Maignien (2), Little (2) pela Agency for International Development (2) e Gidigasú (30) que identificaram os três principais estágios no processo de laterização.

O primeiro estágio é caracterização pelo processo de decomposição dos minerais primários. O segundo envolve a lixiviação, sob condição de drenagem apropriada, de bases e sílicas combinadas e acúmulo relativo ou enriquecimento de óxidos e hidróxidos de sesquióxidos (principalmente Al_2O_3 e Fe_2O_3). As condições do solo sob as quais os vários elementos são solúveis e removidos através de lixiviação ou combinação com outras substâncias dependem grandemente do pH do solo/água e das condições de drenagem. A ocorrência do segundo estágio depende da natureza e da extensão do intemperismo químico dos minerais primários. O terceiro estágio envolve parcial ou completamente desidratação de sesquióxidos e minerais secundários.

Existe uma relação direta entre CTC e quantidade de argila nos resultados obtidos, como mostra a figura 9. No entanto para teores elevados de argila se observa que a CTC é muito variável.

Os solos com uma porcentagem de argila maior apresentam também valores de capacidade de troca de cations elevados.

4.2 - Microscopia Eletrônica

As observações de microestrutura dos solos estudados permitiram visualizar a existência de vazios (canais) ocasionados pela presença de matéria orgânica e pela desagregação do mineral, como mostram as Figs. 10, 11 e 12.

Nos solos de Carazinho (arenito), a presença de vazios é mais elevada que nos demais, chegando a ser superior a 50%, resultando daí solos mais porosos.

As amostras apresentam, em geral, um arranjo de pilhas de partículas dispostas com uma relativa orientação, como mostram as Figs. 13 e 14.

Segundo Barden e Sides (14), a estrutura deste solo é do tipo dispersa.

Não foi observada morfologia que indicasse partículas individuais ou cristais individuais de argila, devido, talvez, ao tamanho reduzido das mesmas.

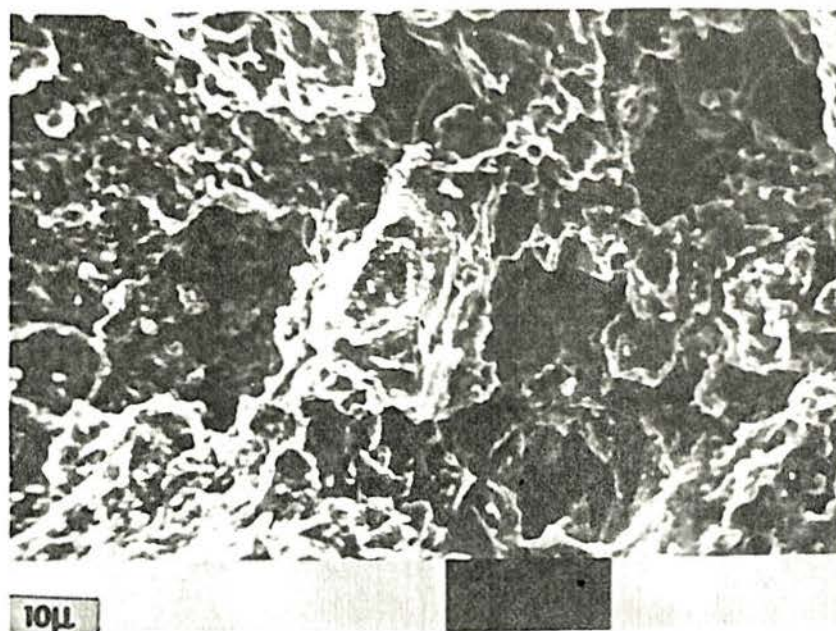


FIG. 10 - MICROGRAFIA DE AMOSTRA DE SOLOS DE RIOLITO (SOLEDADE) DEMONSTRA POROSIDADE MATERIAL (AUMENTO DE 1000X)

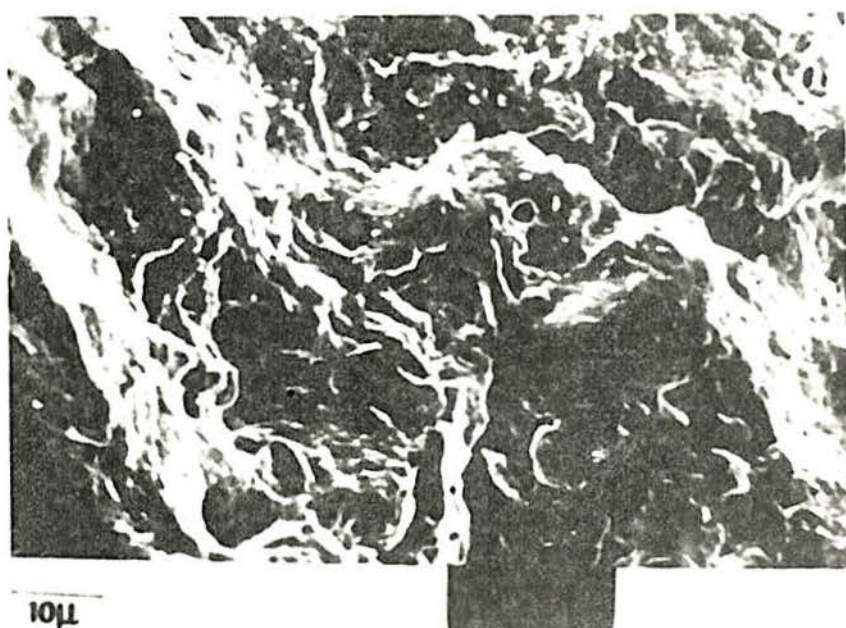


FIG. 11 - MICROGRAFIA DE AMOSTRA DE SOLOS DE BASALTO (MARAU) DEMONSTRA POROSIDADE MATERIAL (AUMENTO DE 1000X)

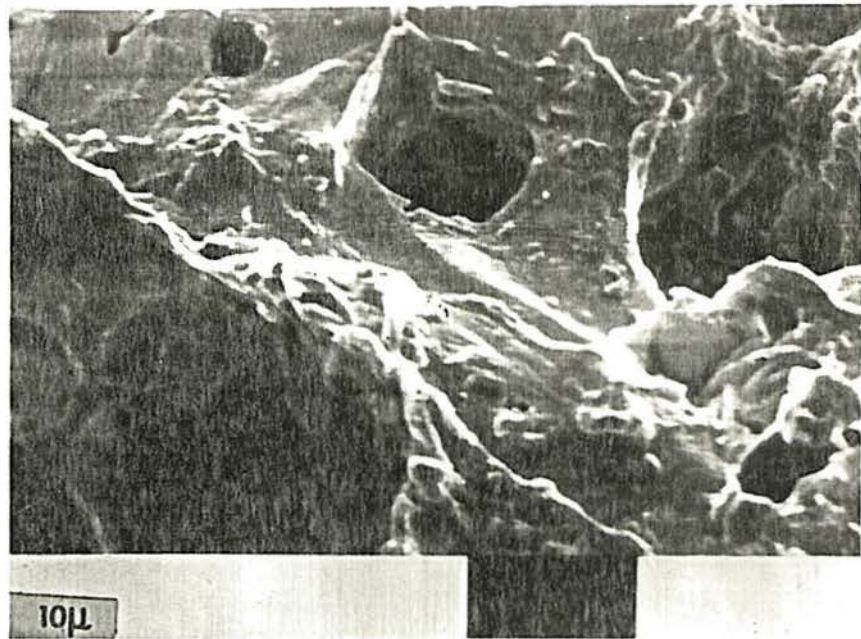


FIG. 12 - MICROGRAFIA DE AMOSTRAS DE SOLOS DE ARENITO (CARAZINHO) DEMONSTRA POROSIDADE MATERIAL (AUMENTO DE 1000X)

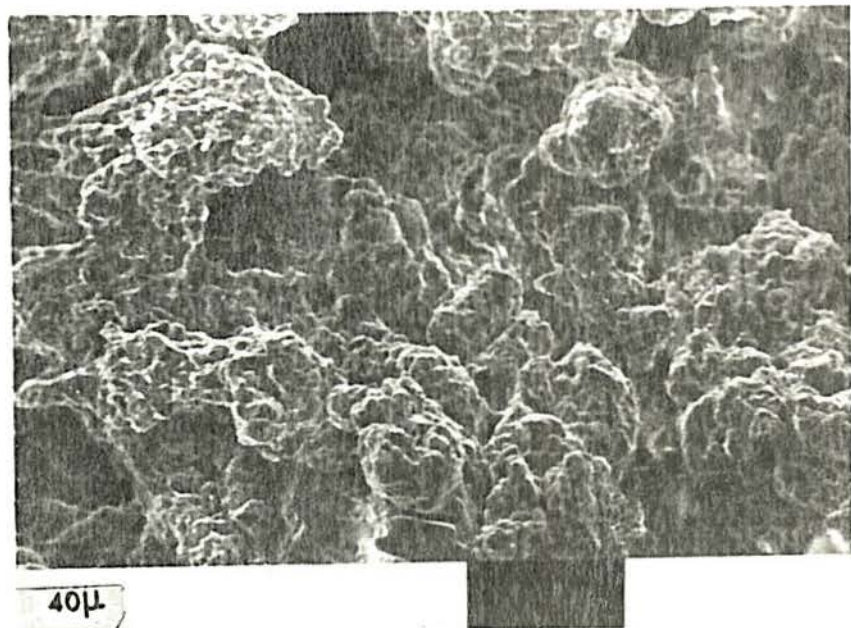


FIG. 13 - MICROGRAFIA DE AMOSTRAS DE SOLOS DE ARENITO (CARAZINHO) DEMONSTRA UM MATERIAL COM RELATIVA ORIENTAÇÃO DOS GRUPOS DE PARTÍCULAS (AUMENTO DE 4000X)

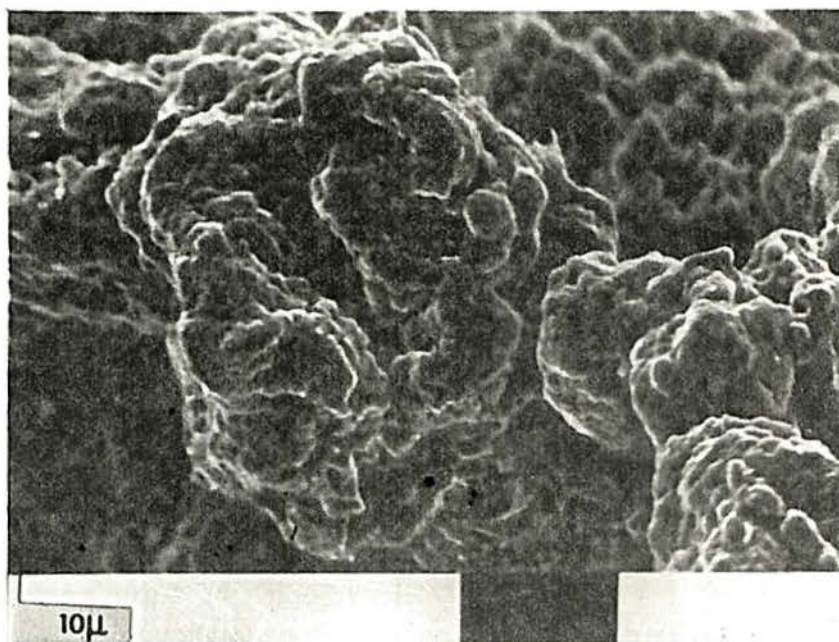


FIG. 14 - MICROGRAFIA DE AMOSTRA DE SOLOS DE BASALTO (MARAU) DEMONSTRA UM MATERIAL COM RELATIVA ORIENTAÇÃO DOS GRUPOS DE PARTÍCULAS (AUMENTO DE 1000X)

4.3 - Mineralogia

As condições de drenagem, o horizonte considerado e os minerais existentes na rocha mãe são fatores que controlam a mineralogia de um solo. Nos solos residuais, as características são determinadas pela rocha mãe e pelo clima em que se formam.

Os estudos difratométricos dos solos aqui analisados indicam a ocorrência de caulinita como argilo-mineral predominante, bem como traços de cloritas e presença de amorfos em alguns pontos. Selecionamos 3 difratogramas característicos de cada litologia, apresentados nas figuras 15 a 23.

A caulinita presente nestes solos ocorre de forma bem cristalizada, dada pelos picos acentuados, apresentados nos difratogramas.

A presença de caulinita nos solos residuais é confirmada por diversos autores, entre eles Deere e Quimones (40), que constataram a presença de caulinita nos solos residuais estudados e atribuíram sua predominância às condições climáticas e de drenagem, próprias da região. Brock (19) verificou a ocorrência de caulinita nos solos provenientes de granitos, e Tanaka (85), nos solos residuais de basalto.

O argilo-mineral caulinita é também encontrado nos solos lateríticos. Segundo vários autores (30, 75), isso indica que os solos em questão assemelham-se aos lateríticos quanto à mineralogia.

Na análise da fração areia por microscopia petrográfica polarizadora, os minerais presentes nos solos de arenitos foram quartzo, com uma porcentagem bastante elevada, em torno de 96%, opaco (3%) e turmalina (1%). Nos solos de basalto, o quartzo apresentou-se com uma porcentagem reduzida em relação aos solos de arenito, em torno de 65%. Verificou-se também a presença de outros minerais tais como intercrescimento de quartzo feldspático (4%), opaco (25%) e alterito (6%). Nos solos de riolito, os minerais presentes são semelhantes aos dos so-

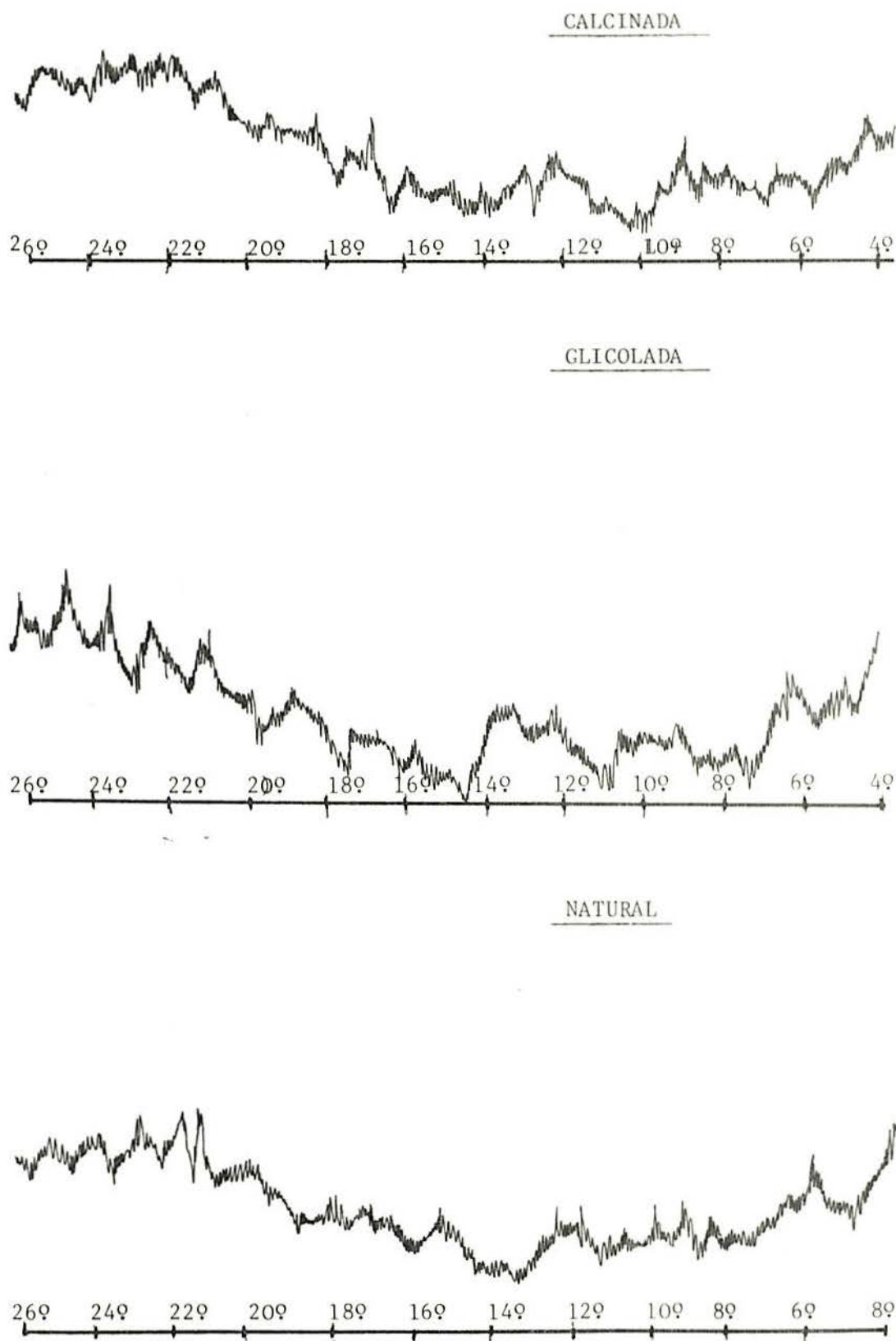


FIG. 15 -Difratogramas de raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinadas. Solo da Form. Tupanciretã-ponto 7, fração $< 2 \mu$. (velocidade $2^\circ/\text{MIN}$) PRESENÇA DE AMORFOS.

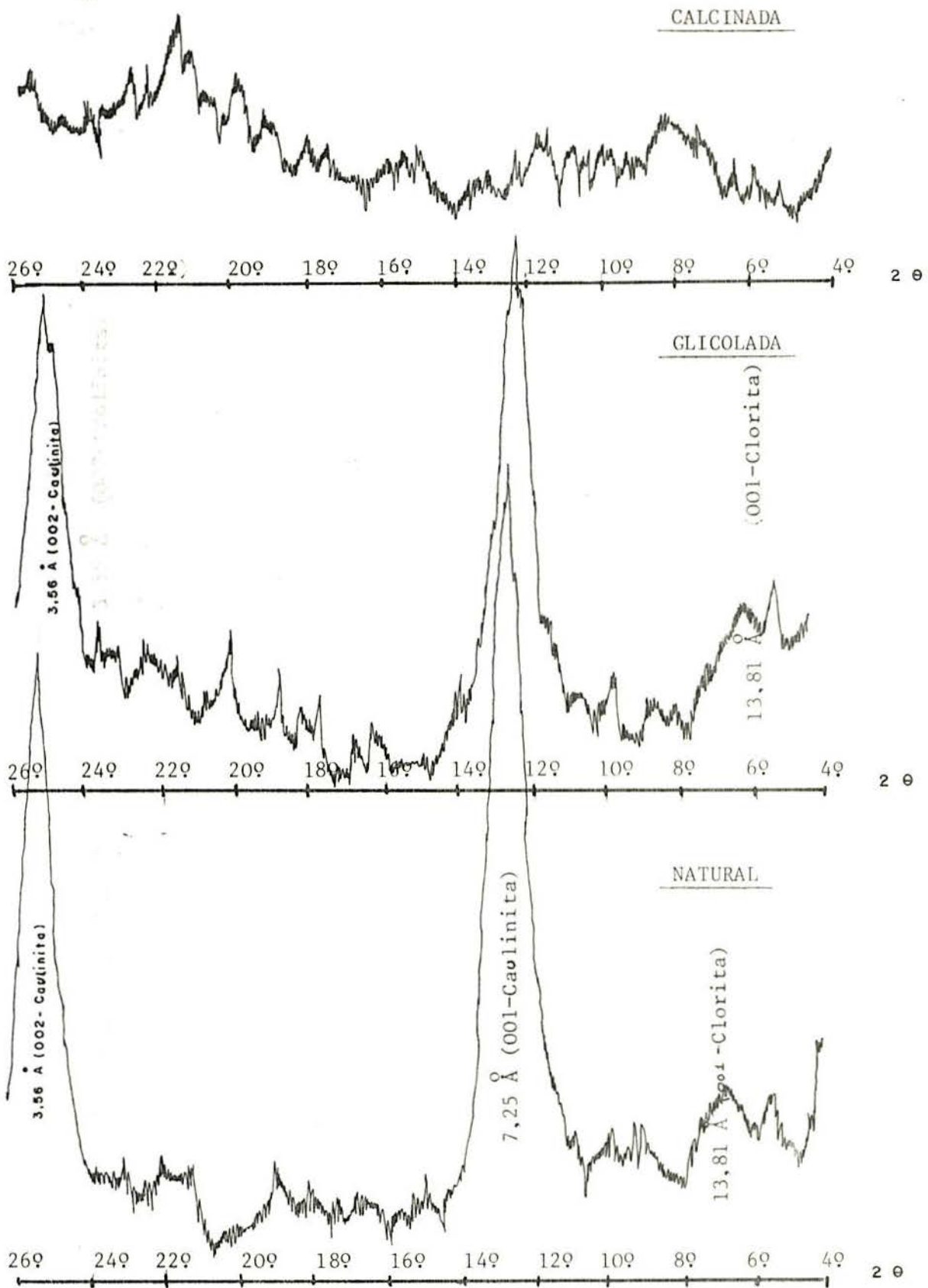


FIG. 16 -Difratogramas de raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinada. Solo da Form. Tupanciretã-ponto 18', fração $< 2 \mu$, (velocidade $2^\circ/\text{min}$)

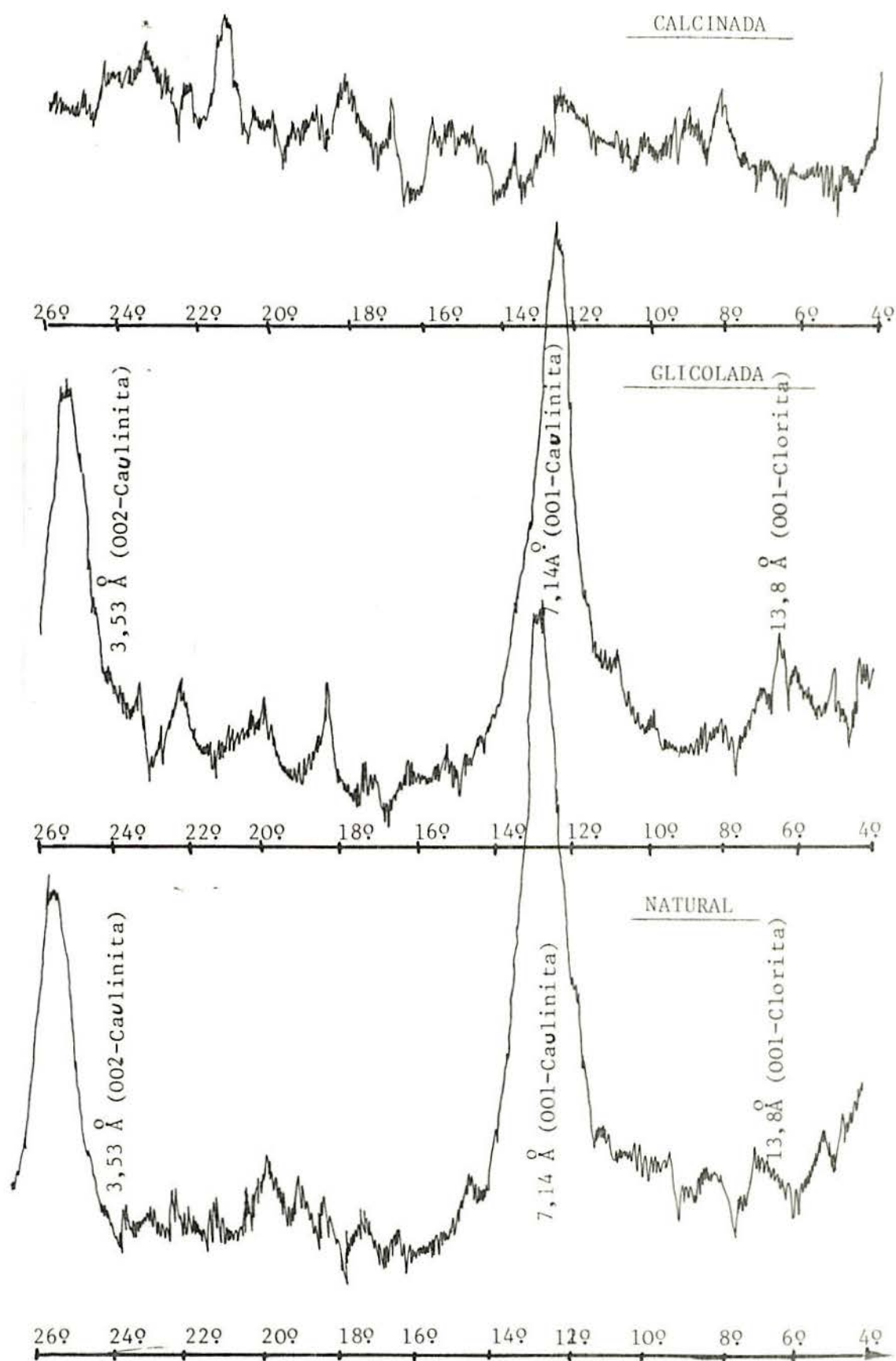


FIG. 17 -Difratogramas de raio X , amostras orientadas natural, glicolada e calcinada, Solo da Form. Tupanciretã-ponto 20 , fração $< 2 \mu$.
(velocidade $2^\circ/\text{min}$)

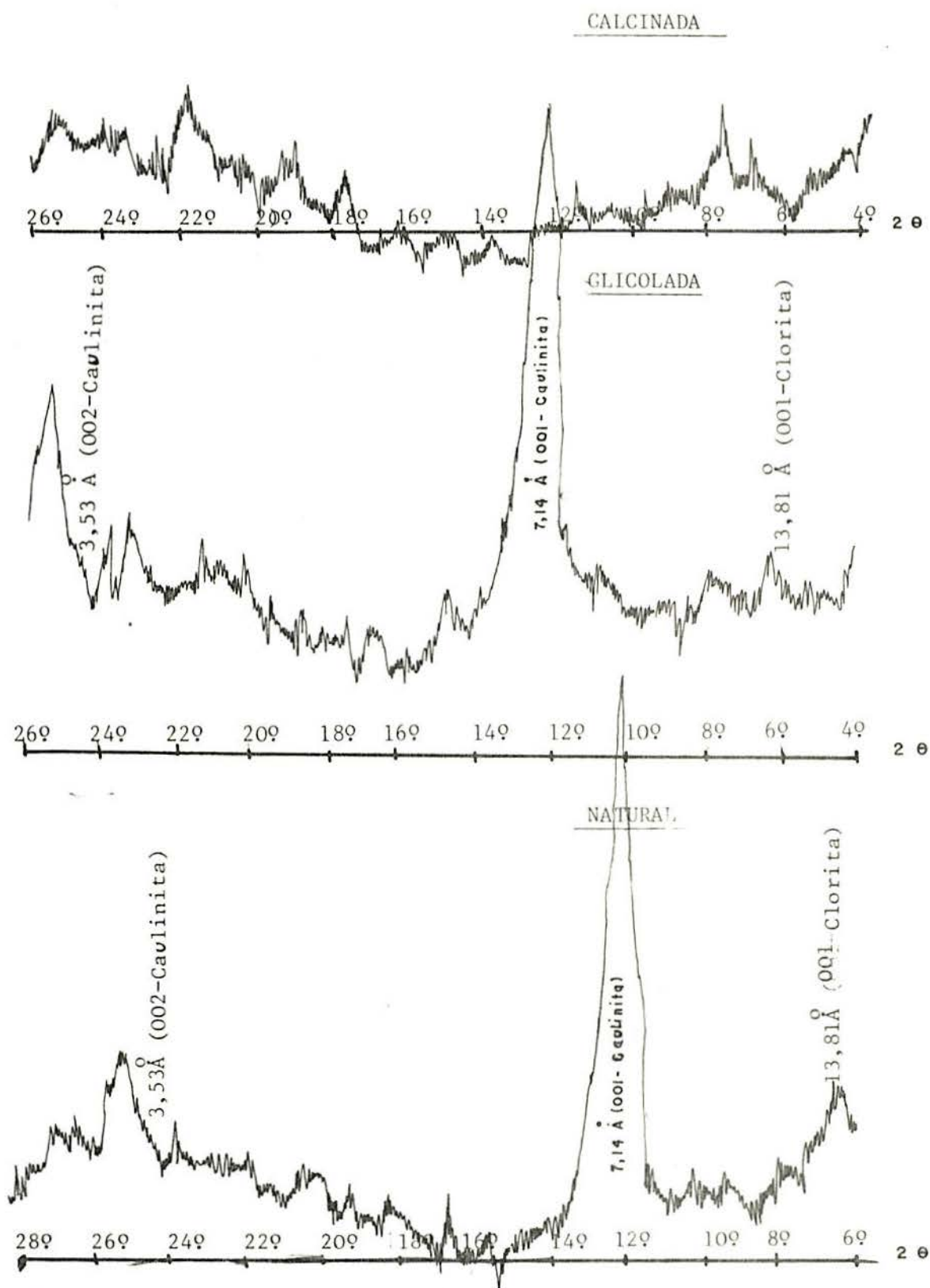


FIG. 18 -Difratogramas de raio X amostras orientadas natural, glicolada e calcinada, Solo de riolito-ponto 21', fração $< 2 \mu$. (velocidad $29/\text{min}$)

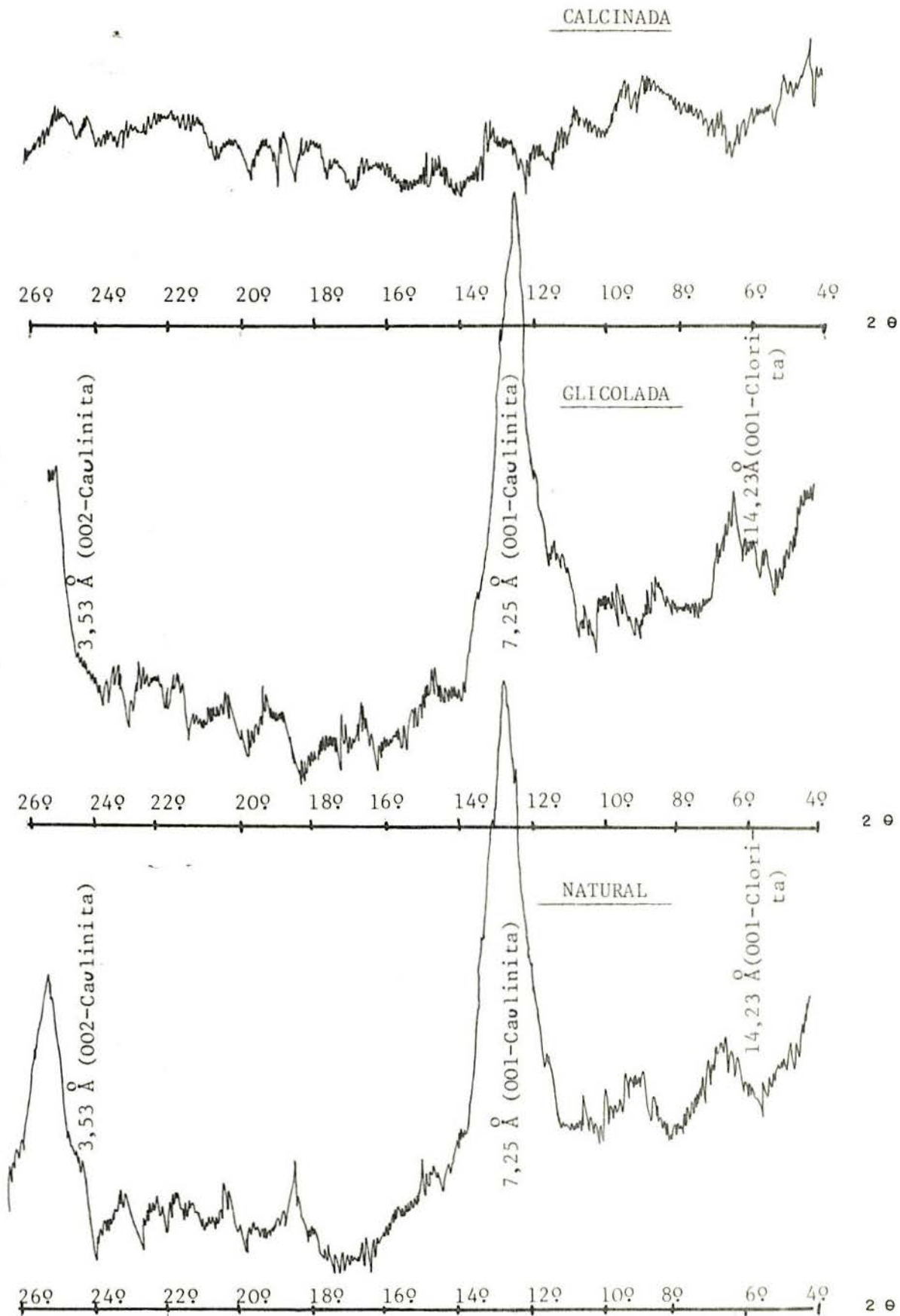


FIG. 19 -Difratogramas de raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinada, Solo de riolito-ponto 10', fração $< 2 \mu$, (velocidade $2^\circ/\text{min}$)

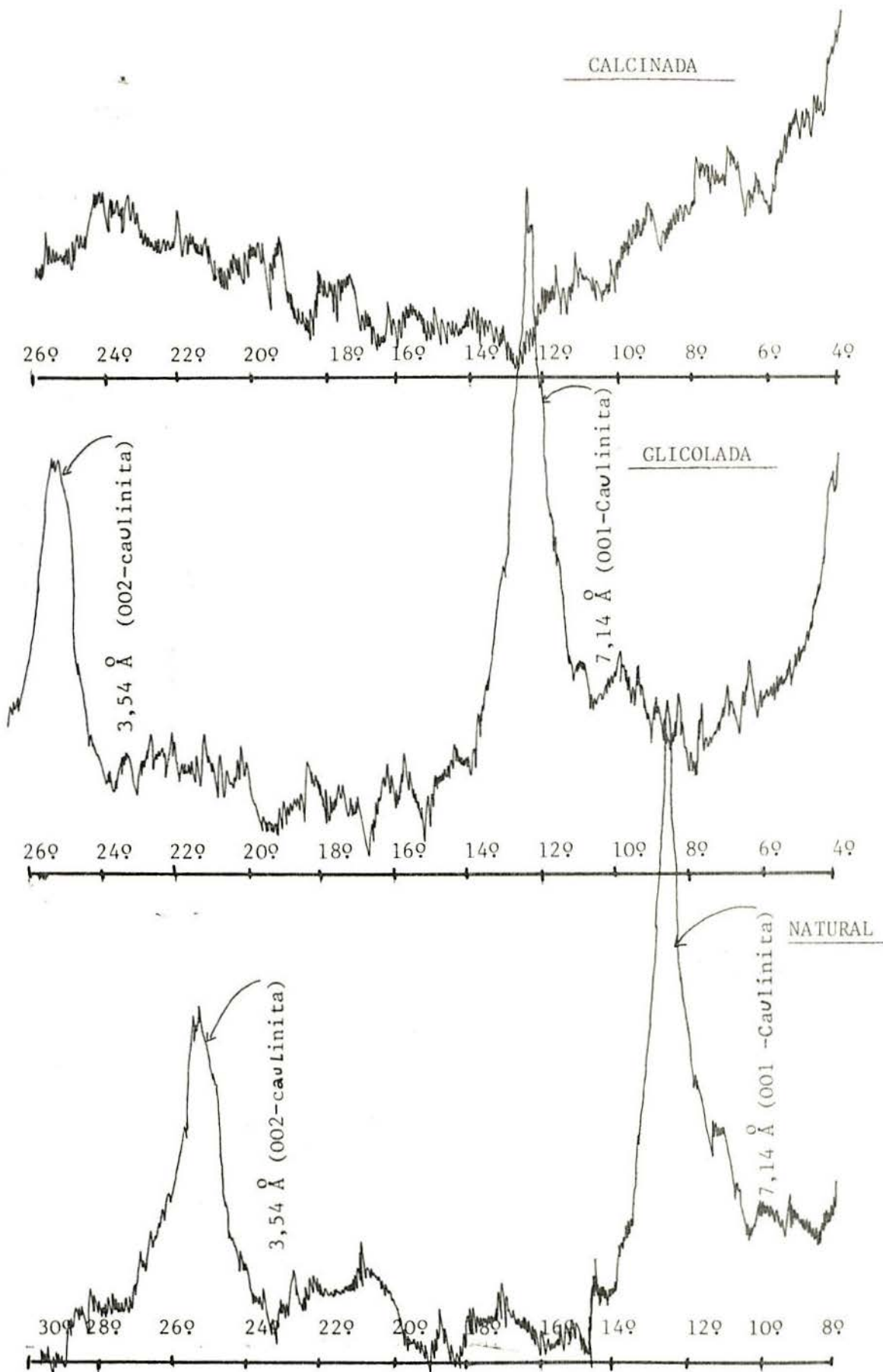


FIG. 20 -Difratogramas de raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinada. Solo de riolito-ponto 31, fração $< 2 \mu$. (velocidade de 2°/min)

CALCINADA

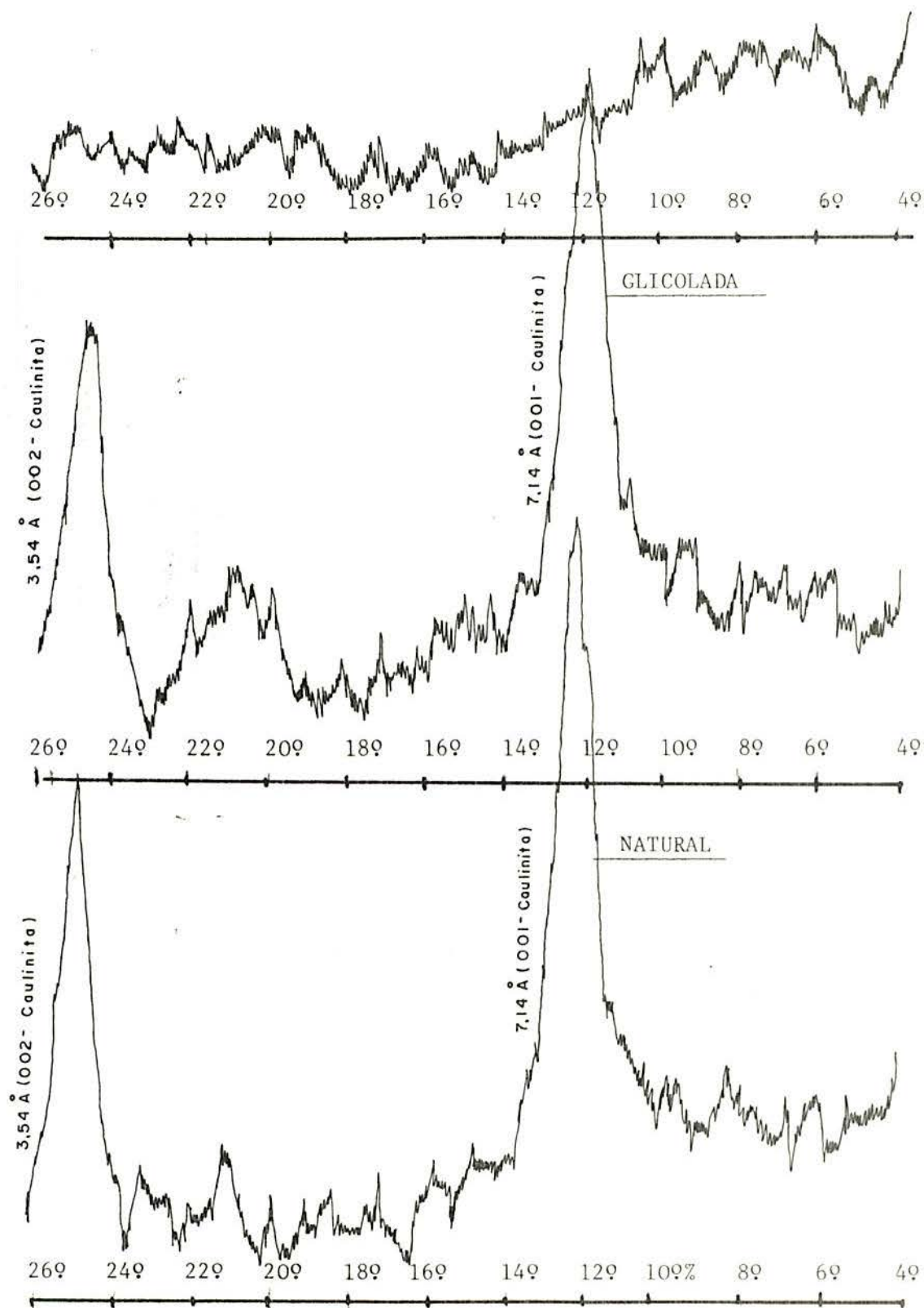


FIG. 21 - Difratogramas de raio X, amostras orientadas natural, glicolada e calcinada, Solo de basalto-ponto 4, fração $< 2 \mu$. (velocidade de $2^\circ/\text{min}$)

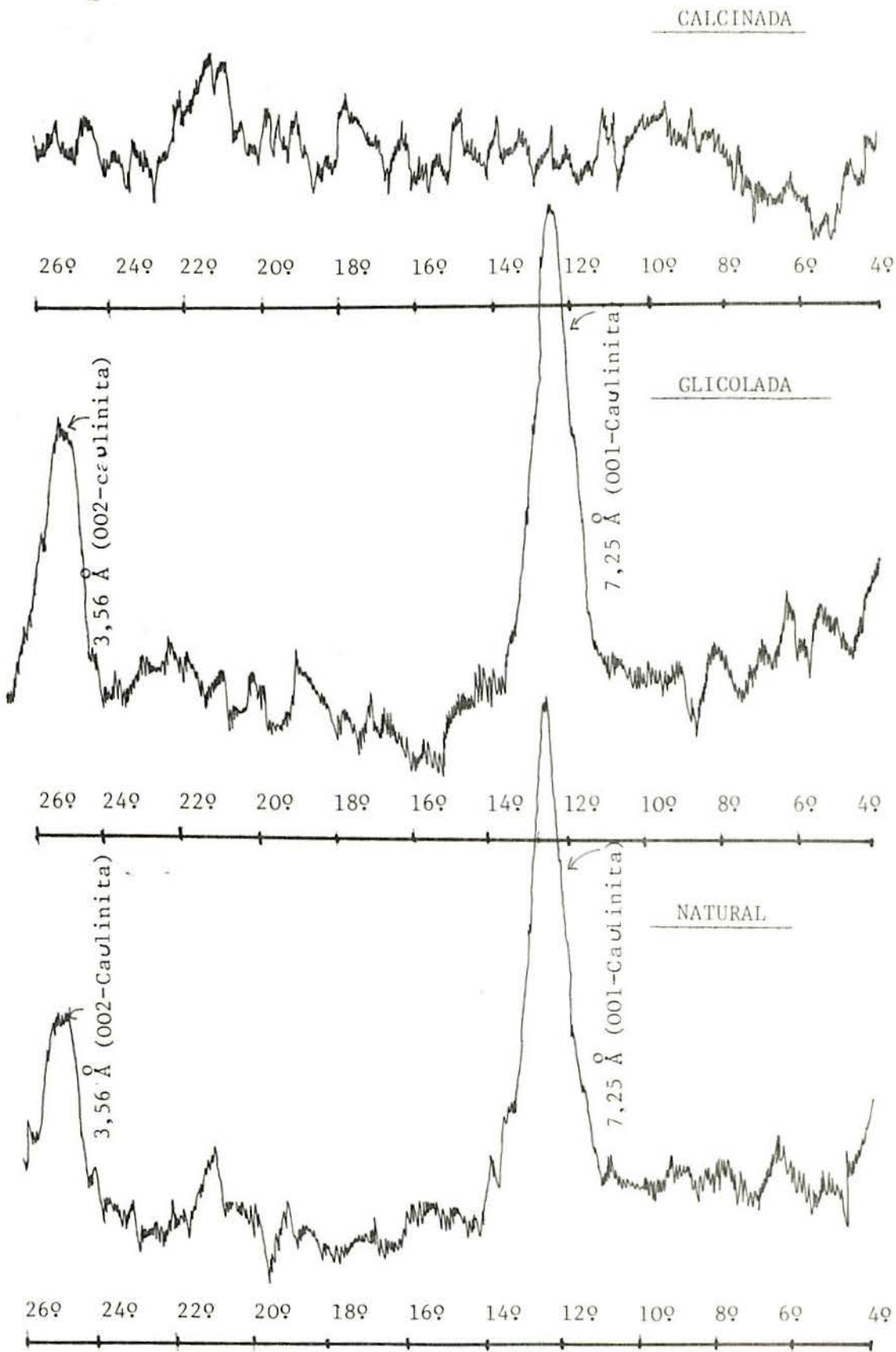


FIG. 22 -Difratogramas de raio X, amostras orientadas **natural** glicolada e calcinada. Solo de basalto-ponto 2, fração <math>< 2 \mu</math>, (velocidade 2°/min)

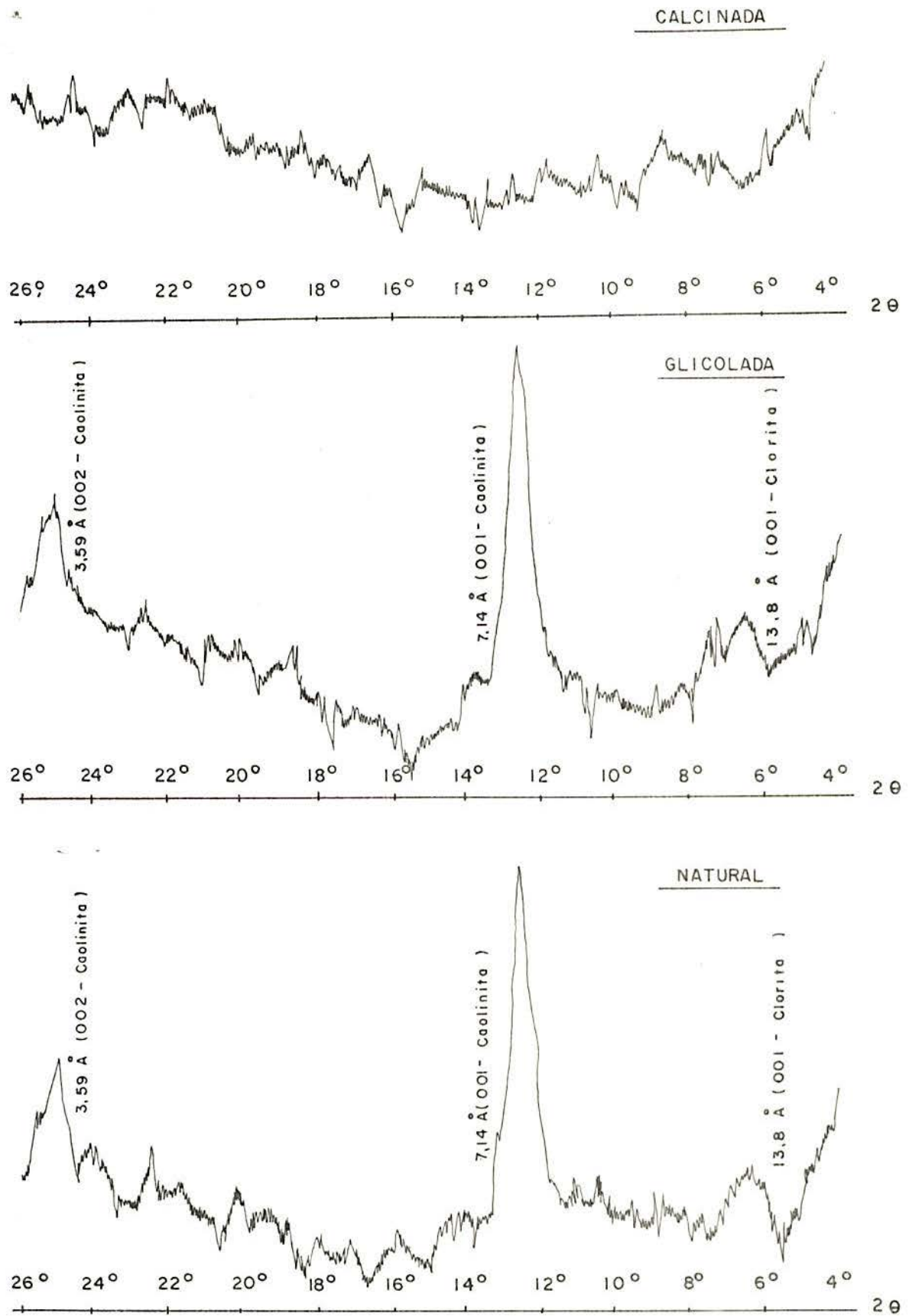


FIG. 23 - DIFRATOGRAMAS DE RAIOS X, AMOSTRAS ORIENTADAS NATURAL, GLICOLADA, CALCINADA. SOLO DE BASALTO - PONTO 26° , FRAÇÃO $< 2 \mu$ (VELOCIDADE $2^\circ/\text{MIN}$)

los de basalto, com variações pequenas em relação ao mineral quartzo.

4.4 - Caracterização

A seguir, serão analisados os dados referentes aos ensaios de densidade real dos grãos, granulometria e consistência (Tabela IV).

4.4.1 - Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos tem sido utilizada como uma medida do grau de maturidade ou laterização, por alguns autores (1).

Pela tabela IV, pode-se constatar que os valores de densidade apresentam-se elevados e não diferem muito em termos de litologia. Sabe-se que a presença de óxido de ferro provoca um aumento de densidade.

Segundo Salas (73) e Lambe (44), existe uma relação entre os valores de densidade real dos grãos e mineral argílico presente no solo.

Lambe (44), Salas (73) e Nudelmann (62) apresentam para caulinita os valores de 2,61, 2,63 e 2,65 respectivamente, no tocante à densidade real dos grãos. Como se vê, tais valores são inferiores aos aqui encontrados.

Valores elevados de densidade também são encontrados em solos lateríticos estudados por Bawa (16), Graft-Johnson e Bhatia (33) e por Gidigasú (30).

A densidade real dos grãos dada por Bawa (16) para solos lateríticos apresenta um intervalo de variação de 2,7 a 3,5. O quadro IV apresenta valores de densidade encontrados em solos lateríticos de diferentes países. Um outro intervalo é dado por Graft-Johnson (33), situando os seus valores en

TABELA IV

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E ISC

PONTO	ROCHA DE ORIGEM	PROFUNDIDADE (m)	UMIDADE NATURAL DE CAMPO (%)	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	GRANULOMETRIA			LIMITES DE ATTENBERG			ATIVIDADE COLOIDAL	IL	COMPACTAÇÃO		I.S.C. (%)	EXPANSÃO (%)
					AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)			hot (%)	γ_{smax} (g/cm ³)		
1	Basalto	0,50	36	2,71	23	12	65	50	33	17	0,29	0,176	30,00	1,42	7,01	1,07
2	Basalto	1,00	36	2,70	24	14	62	59	41	18	0,31	-0,28	33,00	1,40	--	--
3	Arenito	1,0	33	2,80	29	6	65	57	31	26	0,42	0,08	29,00	1,43	12,36	0,73
4	Basalto	1,50	37	2,96	30	6	64	67	44	23	0,40	-0,30	36,00	1,38	12,24	0,3
5	Basalto	1,00	30	2,96	21	10	69	61	43	18	0,28	-0,72	31,00	1,42	16,70	0,77
6	Basalto	1,00	36	2,76	23	15	62	61	43	18	0,31	-0,39	36,00	1,36	--	--
7	Arenito	0,50	24	2,74	40	12	48	48	27	21	0,47	-0,14	25,00	1,51	12,86	0,56
8	Arenito	1,50	16	2,75	40	8	48	39	25	14	0,36	-0,64	20,00	1,69	17,03	0,27
9	Arenito	1,00	12	2,66	29	6	65	32	19	13	0,48	-0,53	16,00	1,71	16,43	0,22
10	Riolito	0,50	36	2,80	26	11	63	54	32	22	0,37	0,18	29,00	1,44	--	--
11	Riolito	4,00	31	2,69	21	10	69	78	52	26	0,39	-0,80	28,00	1,50	--	--
12	Riolito	0,50	33	2,60	17	21	62	56	37	19	0,37	-0,21	28,00	1,47	16,20	0,38

TABELA IV

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E ISC (continuação)

PONTO	ROCHA DE ORIGEM	PROFUNDIDADE (m)	UMIDADE NATURAL DE CAMPO (%)	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	GRANULOMETRIA			LIMITES DE ATTERBERG			ATIVIDADE COLOIDAL	IL	COMPACTAÇÃO		I.S.C. (%)	EXPANSÃO (%)
					AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)			hot (%)	γ_{smax} (g/cm ³)		
13	Arenito	1,00	31	2,77	35	17	48	46	31	15	0,37	0	25,00	1,52	19,29	0,67
14	Arenito	2,00	23	2,71	39	8	53	48	27	21	0,44	-0,19	25,00	1,54	--	--
15	Arenito	5,00	27	2,71	43	5	52	51	32	19	0,34	-0,26	26,00	1,50	19,21	0,15
16	Riolito	1,00	42	2,80	12	13	75	60	39	21	0,38	0,14	33,00	1,41	--	--
17	Riolito	1,50	44	2,77	18	10	72	73	48	25	0,39	-0,16	34,00	1,36	--	--
18	Basalto	1,00	28	2,67	21	10	69	60	35	26	0,39	-0,26	30,00	1,43	8,52	0,17
19	Arenito	2,00	40	2,74	32	10	58	48	27	21	0,40	0,63	25,00	1,55	16,87	0,33
20	Arenito	2,50	33	2,90	29	8	63	56	32	24	0,37	0,04	29,00	1,47	--	--
21	Riolito	1,00	28	2,73	18	15	67	56	33	23	0,67	-0,22	31,00	1,38	15,03	0,70
22	Basalto	0,50	69	2,61	23	25	52	90	58	32	0,31	0,34	49,00	1,09	6,90	2,24
23	Basalto	1,00	39,5	2,81	12	13	75	65	44	21	0,50	-0,21	36,00	1,33	17,03	0,46
24	Riolito	1,50	46	2,71	18	18	64	81	52	29	0,33	-0,21	36,00	1,31	--	--
25	Basalto	1,00	17	2,81	22	22	56	41	25	16	0,58	-0,5	24,00	1,59	12,85	0,35
26	Basalto	0,50	21	2,72	24	28	46	55	30	25	0,29	-0,36	27,00	1,47	20,29	0,44
27	Riolito	1,00	33	2,82	15	19	66	59	33	17	0,51	0,00	28,00	1,41	7,57	1,12

TABELA IV
 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO, COMPACTAÇÃO E ISC (conclusão)

PONTO	ROCHA DE ORIGEM	PROFUNDIDADE (m)	UMIDADE NATURAL DE CAMPO (%)	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	GRANULOMETRIA			LIMITES DE ATTERBERG			ATIVIDADE COLOIDAL	IL	COMPACTAÇÃO		I.S.C. (%)	EXPANSÃO (%)
					AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)			hot (%)	γ_{smax} (g/cm ³)		
28	Riolito	0,50	38,5	2,70	21	19	60	76	49	27	0,59	-0,39	36,00	1,26	--	--
29	Basalto	0,50	41	2,82	21	15	64	72	38	34	0,59	0,09	34,00	1,35	--	--
30	Riolito	0,50	35,5	2,95	21	19	60	70	36	27	0,51	-0,02	31,00	1,42	5,25	3,71
31	Riolito	1,50	47	2,84	20	15	65	85	48	37	0,63	-0,03	36,00	1,27	6,68	3,42
32	Riolito	0,50	24	2,71	17	21	62	55	36	19	0,34	-0,63	30,00	1,41	12,23	1,12
33	Riolito	0,50	32	2,72	14	22	64	55	36	19	0,36	-0,21	29,00	1,37	11,19	1,15
34	Riolito	0,50	37,0	2,64	12	24	64	52	33	19	0,36	0,21	28,00	1,38	13,86	1,16
35	Riolito	0,50	41,0	2,69	27	11	62	70	43	27	0,48	0,07	36,00	1,24	--	--
36	Basalto	0,50	36,0	2,71	22	8	70	61	40	21	0,32	-0,19	31,00	1,42	12,36	0,38

QUADRO IV

VALORES DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS DE SOLOS LATERÍTICOS DE DIFERENTES PAÍSES, CITADOS POR BAWA

TIPO DE SOLOS	INTERVALO DE DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	AUTORES
Solos lateríticos do Havai	2,73-3,12	Andrews
Solos lateríticos do Havai	2,84-3,10	Fruhauf
Lateritas da Índia	3,00-3,50	Central Road Research Institute
Lateritas da África	2,76-2,89	Florentin e colaboradores
Lateritas da África	2,79	Remillon
Lateritas de Cuba	2,90	Winterkorn e colaboradores

tre 2,6 e 3,4. Gidigasu (30) apresentou uma faixa de variação dos solos lateríticos, com um valor mínimo de 2,69 e máximo de 2,925.

Os valores do presente estudo enquadram-se dentro dos intervalos determinados pelos autores referidos. Comentam eles que valores elevados encontrados nesses solos devem ser atribuídos, geralmente, ao alto teor de ferro.

4.4.2 - *Granulometria*

A figura 24 mostra as faixas onde caem as curvas granulométricas dos três solos residuais típicos da região. A primeira faixa refere-se aos solos de arenito da Formação Tupanciretã. Observa-se a grande amplitude da faixa, onde ocorreu uma porcentagem mais elevada de silte e areia. A segunda diz a respeito aos solos provenientes da decomposição de riolito. Nota-se que esta faixa apresenta-se mais restrita que as demais. A terceira faixa corresponde aos solos provenientes de decomposição de basalto. Tanto a segunda como a terceira são solos finos constituídos principalmente por argila e silte; a fração arenosa presente nestes tipos de solos é proveniente dos grãos de óxido de ferro (concreções lateríticas) e da presença da Formação Tupanciretã próxima.

Pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), os solos estudados pertencem ao grupo MH e ML, exceto três pontos que se classificam em CH e CL (solo da Formação Tupanciretã). Já segundo a classificação Highway Road Bureau (HBR) os solos respondem aos grupos A7-6 e A7-5, com exceção de dois pontos que se classificam em A-6. O quadro V apresenta uma classificação dos solos para cada ponto, utilizando os sistemas SUCS e HBR.

As faixas granulométricas de Cruz (1969) mostraram uma certa dispersão nos solos de arenito da Formação Tupanciretã e riolito em estudo, não ocorrendo o mesmo para solos de basalto que situam-se dentro da área limitada por ele (Figs.

QUADRO V

CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS PELOS SISTEMAS SUCS E HRB

PONTO	CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	
	SUCS	HRB
1	MH	A 7-6
2	MH	A 7-5
3	MH	A 7-5
4	MH	A 7-5
5	MH	A 7-6
6	MH	A 7-6
7	ML	A 7-6
8	ML	A 6
9	CL	A 6
10	MH	A 7-5
11	MH	A 7-6
12	CH	A 7-6
13	ML	A 7-5
14	ML	A 7-6
15	ML	A 7-5
16	MH	A 7-6
17	MH	A 7-6
18	MH	A 7-6
19	ML	A 7-6
20	MH	A 7-5
21	MH	A 7-5
22	MH	A 7-6
23	MH	A 7-6
24	MH	A 7-6
25	ML	A 7-6
26	MH	A 7-5
27	MH	A 7-5
28	MH	A 7-6
29	MH	A 7-6
30	MH	A 7-6
31	MH	A 7-5
32	MH	A 7-5
33	MH	A 7-5
34	MH	A 7-6
35	CH	A 7-6
36	MH	A 7-6

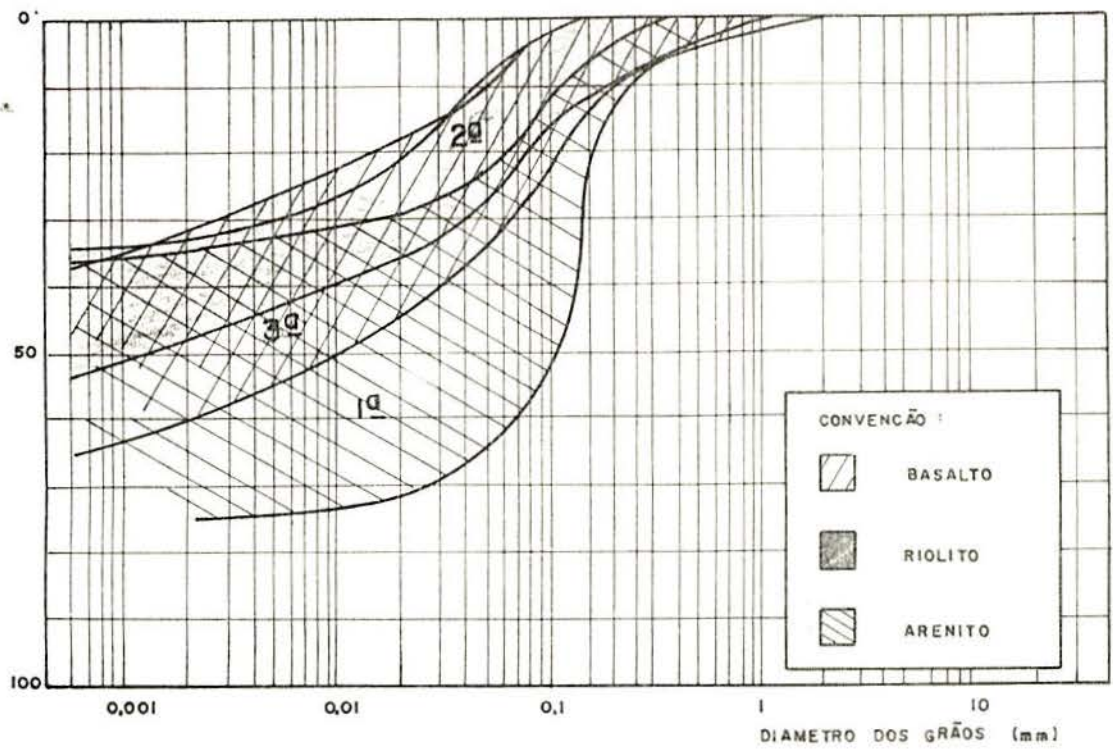


fig. 24 .- FAIXAS GRANULOMÉTRICA DOS TRÊS SOLOS TÍPICOS DA REGIÃO

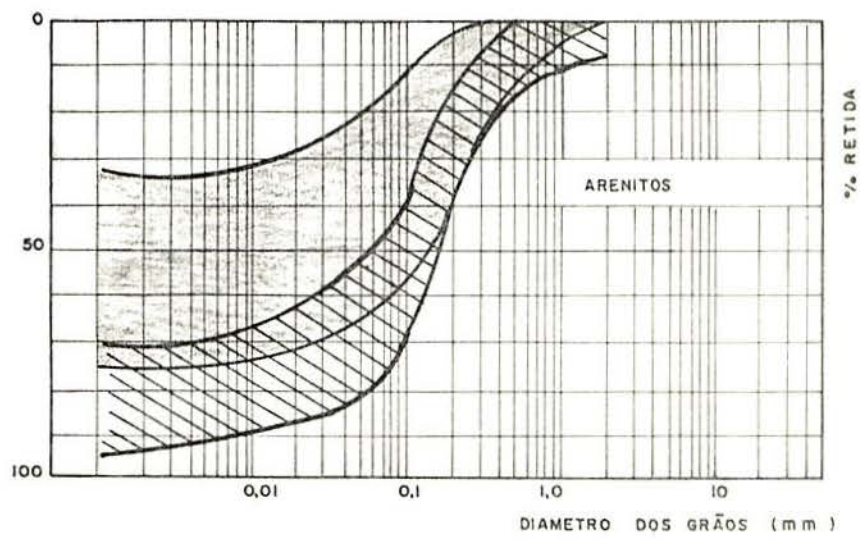




fig. 25 - FAIXA GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE ARENITO COMPARADA COM A DE CRUZ

-  SOLO ESTUDADO
-  SOLO DE CRUZ

25 a 27).

Convém ressaltar que a comparação da faixa granulométrica de riolito é feita na de granito, sendo que essa comparação pode ocasionar dispersões por apresentarem os riolitos uma matriz afanítica e p \ddot{u} rfira.

Os estudos de Vargas (88, 89,91) sobre solos residuais apresentaram curvas granulométricas para diferentes tipos de solos. Comparando nossas faixas com as dele (Figs.27 e 29), verifica-se uma dispersão bastante acentuada em todos os nossos solos. Essa dispersão deve-se ao fato de que os solos trabalhados por estes autores (88, 26) estão localizados em regiões diferentes, sujeitas a uma formação geológica particular e a um clima determinado.

A figura 30 apresenta a posição dos solos dentro do diagrama granulométrico triangular da classificação textural USB. Pode-se constatar o agrupamento ocorrido nos solos de basalto e riolito, enquadrando-se dentro da área denominada de argila. Nos solos de arenito da Formação Tupanciretã, os pontos apresentaram dispersões, situando-se na mesma área.

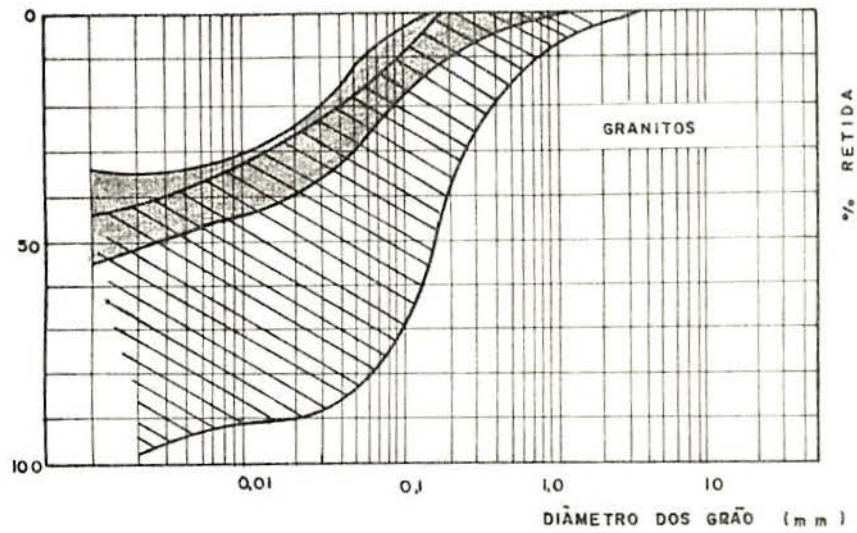


fig. 26. - FAIXA GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE RIOLITO
COMPARADA COM A DE SOLOS ORIUNDOS
DE GRANITO ESTUDADOS POR CRUZ

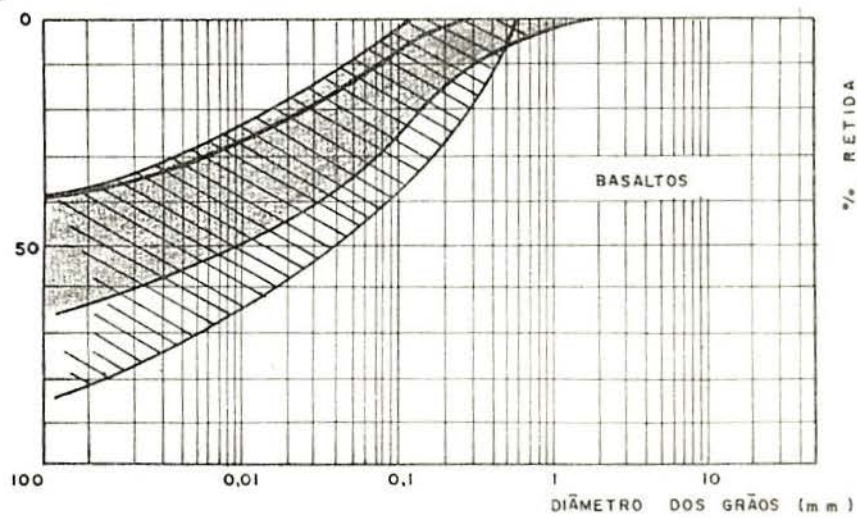


fig. 27. - FAIXA GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE BASALTO
COMPARADA COM A DE CRUZ

- SOLO ESTUDADO
- SOLO DE CRUZ

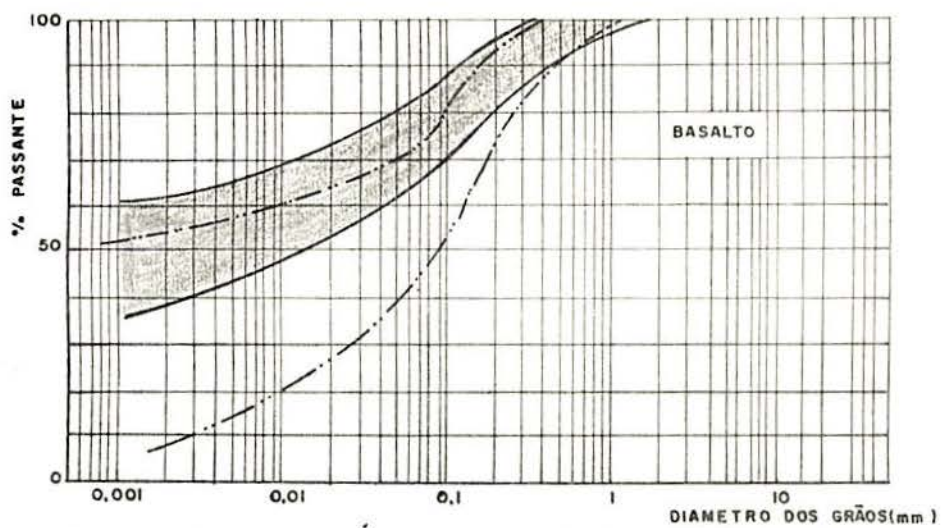


fig. 28- FAIXA GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE BASALTO COMPARADA COM A DE VARGAS

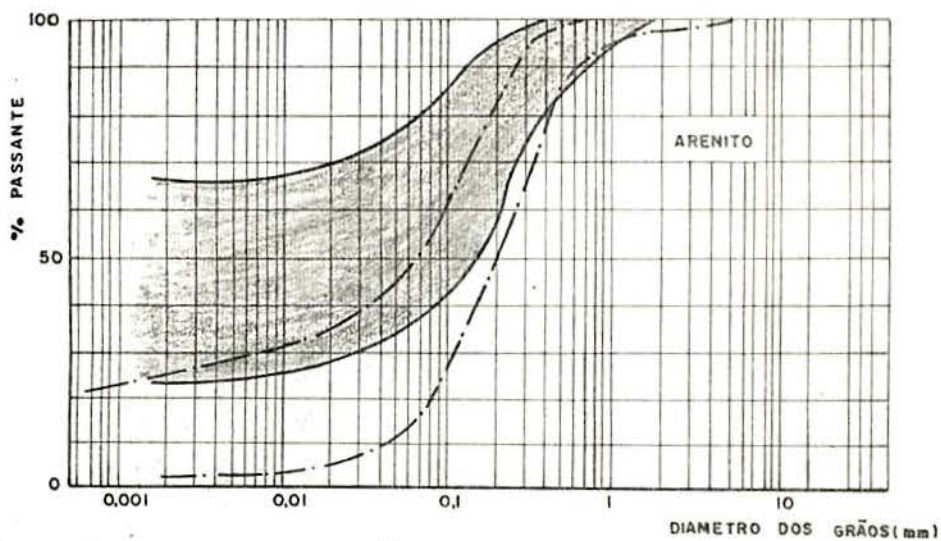
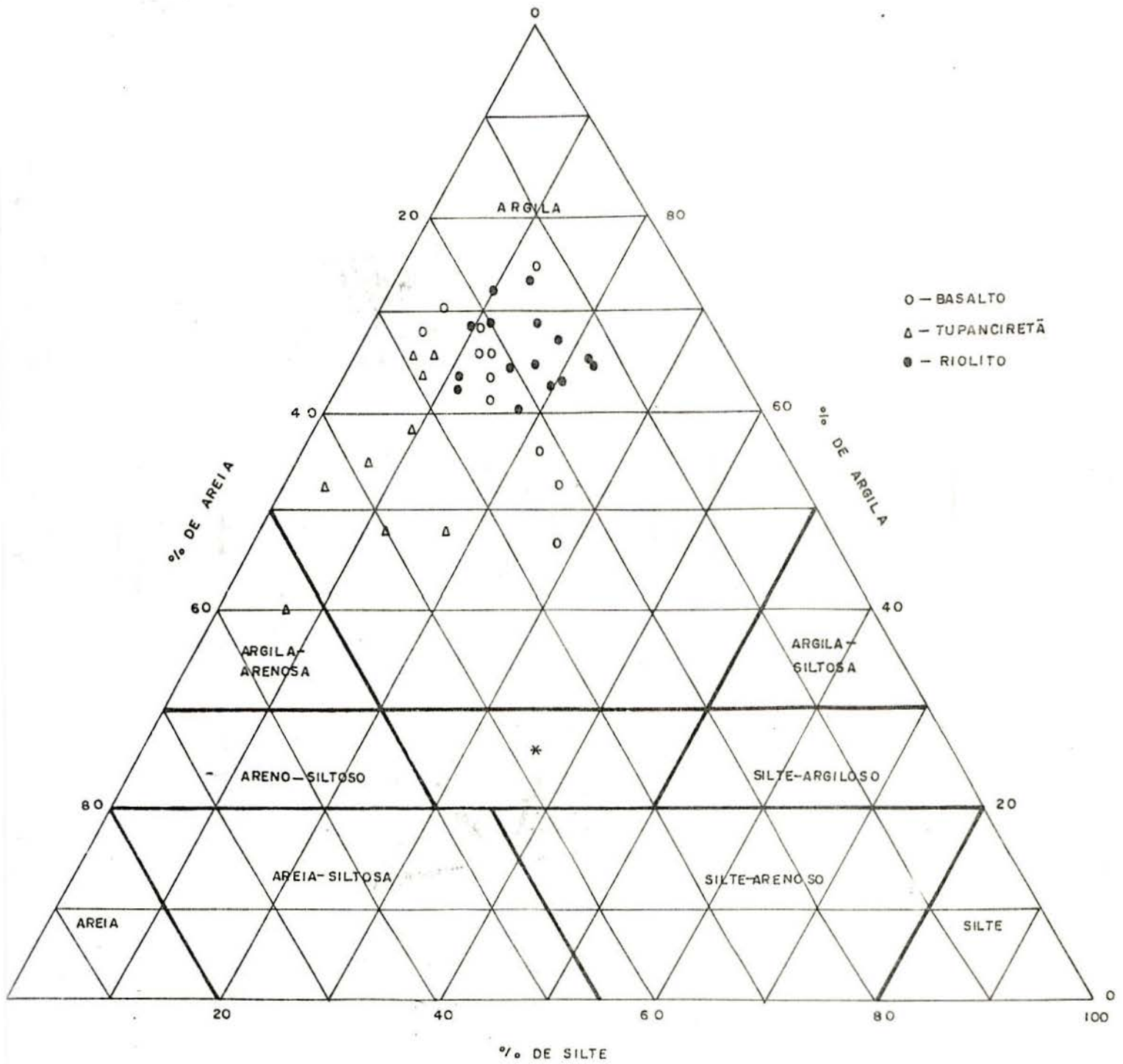


fig. 29- FAIXA GRANULOMÉTRICA DE SOLO DE ARENITO COMPARADA COM A DE VARGAS

- SOLO ESTUDADO
- SOLO DE VARGAS



* - SOLOS COM CONTEÚDO DE AREIA, DE SILTE E DE ARGILA

fig. 30 - DIAGRAMA GRANULOMÉTRICO TRIANGULAR DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS, SEGUNDO USBS

4.4.3 - Consistência

Os limites de Atterberg são muito utilizados na classificação dos solos em termos de comportamento para fins de engenharia.

Os valores de limite de liquidez (LL) e de índice de plasticidade (IP) plotados no gráfico de plasticidade (Fig 31) permitem classificar os solos de riolito e basalto em siltes inorgânicos de alta compressibilidade (MH), ocorrendo pequena dispersão no último. Já os solos de arenito da Formação Tupanciretã, na sua maioria, enquadram-se na faixa de argila inorgânica de média plasticidade (CL). Esta classificação apresenta incoerência para estes tipos de solos, quando analisados paralelamente com sua granulometria. Isto porque eles apresentam uma porcentagem de argila superior a 50%. Entretanto, os solos basalto e de riolito caracterizam-se por um conteúdo maior da argila do que os de arenito e classificam-se como siltes inorgânicos. A inadequação desse gráfico aplicado a solos brasileiros foi apontada por Cruz (25). Afirma ele que o gráfico de plasticidade foi proposto a partir de um grande número de ensaios em solos pertencentes, na sua maioria, a regiões não tropicais. Faz-se necessária a construção de um novo gráfico para classificação dos solos tropicais, evitando que os nitidamente argilosos situem-se na área dos solos siltesos de alta plasticidade.

No gráfico de plasticidade, os solos provenientes de basalto e riolito distribuem-se abaixo da linha A, e os solos de arenitos, em torno da linha (Fig. 31). A situação dos solos de basalto abaixo da linha A é coincidentes com os dados apontados no trabalho de Cruz (26), o mesmo não ocorrendo com os de arenito que, segundo ele, devem estar distribuídos acima dela.

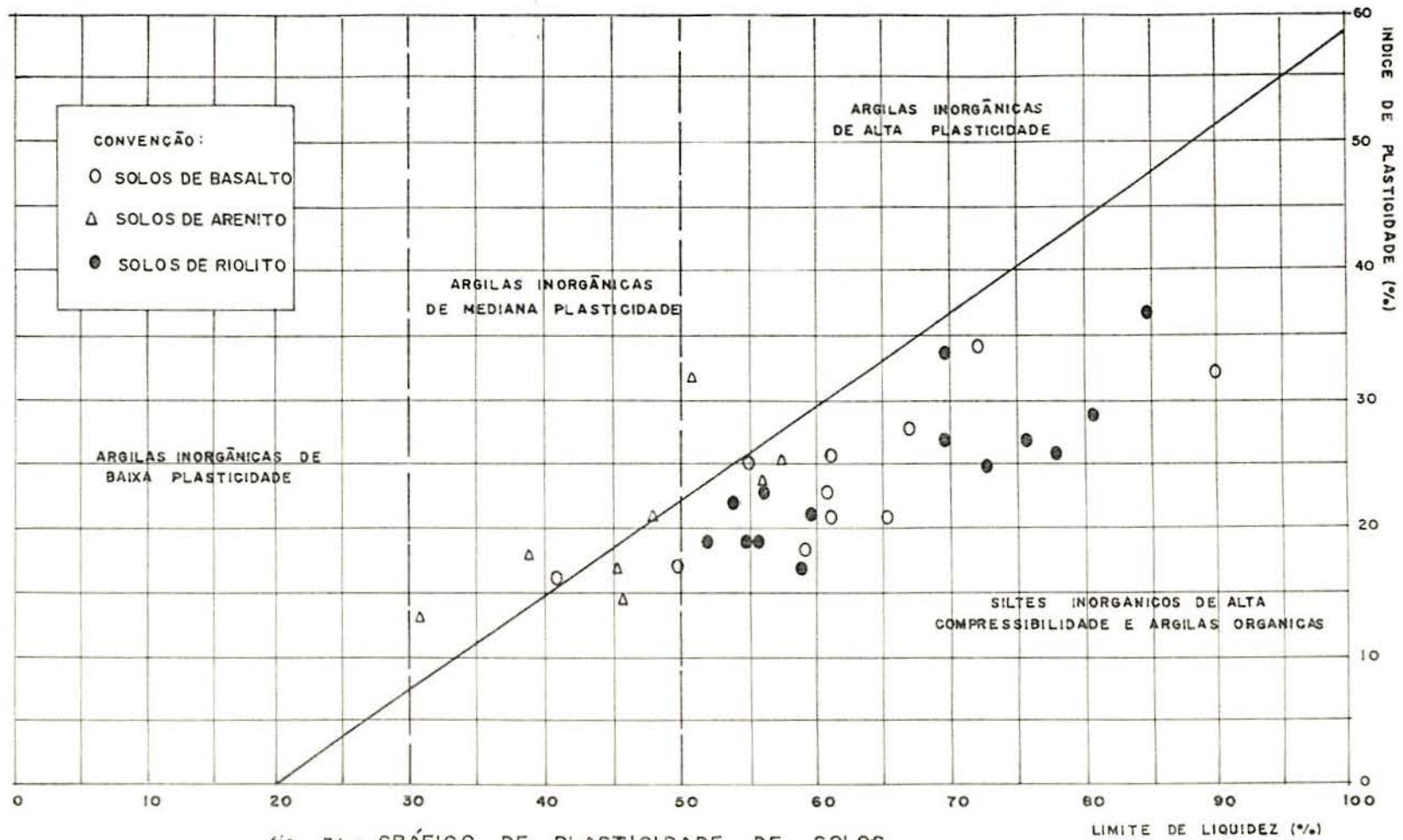


fig. 31 - GRÁFICO DE PLASTICIDADE DE SOLOS DA REGIAO DE PASSO FUNDO (CASAGRANDE)

Plotando os dados obtidos dos solos residuais em estudo, no gráfico de plasticidade apresentado por Cruz (26), onde o autor colocou os valores obtidos em ensaios de Atterberg (Fig 32), verifica-se que os solos de basalto se enquadram perfeitamente dentro da área, e que há dispersões nos solos de arenito e riolito. As dispersões ocorridas na área de solos de arenito são devidas à elevada porcentagem de argila.

Na figura 33, a área limitada por Vargas apresenta pequenas dispersões comparadas com os dados aqui encontrados.

A afirmação de Badillo (10) se aplica aos nossos solos. Segundo esse autor, se a argila de um solo é do tipo caulinita derivada de feldspatos, esse solo situa-se muitas vezes abaixo da linha A, com limite de liquidez menor ou maior que 50 e, em certos casos, ocorre na fronteira ML-CL ou MH-CH, apesar da alta porcentagem de argila proporcionando características correspondentes a siltes inorgânicos.

A partir de uma análise mineralógica e química das amostras, pode-se ter uma certa idéia dos valores aproximados das propriedades dos solos. Lambe (44) apresenta uma tabela de limites de Atterberg de alguns minerais argilícos e cãtions trocáveis (Tabela V). Perloff (67) também refere uma tabela de autoria de Grim, na qual os valores de limites de Atterberg são apresentados para cada tipo de mineral argilíco e cãtion trocável (Tabela VI). Como se pode observar nas duas tabelas, existe uma grande dispersão dos limites de Atterberg de um mesmo mineral argilíco com o mesmo cãtion trocável. Grim (34) explica que grande parte dessa diferença é atribuída ao tamanho das partículas e à perfeição dos cristais. A tabela VII apresenta dados obtidos por Whitte (93) que levaram a concluir que os valores dos limites aumentam com uma diminuição no tamanho das partículas e que o limite de liquidez tende a aumentar algumas vezes mais que o de plasticidade. Isto induz a concluir que a dispersão dos valores apresentados nos nossos solos pode ser derivada da variação no tamanho das partículas de cada solo.

A tabela VIII mostra a variação que ocorre nas pro-

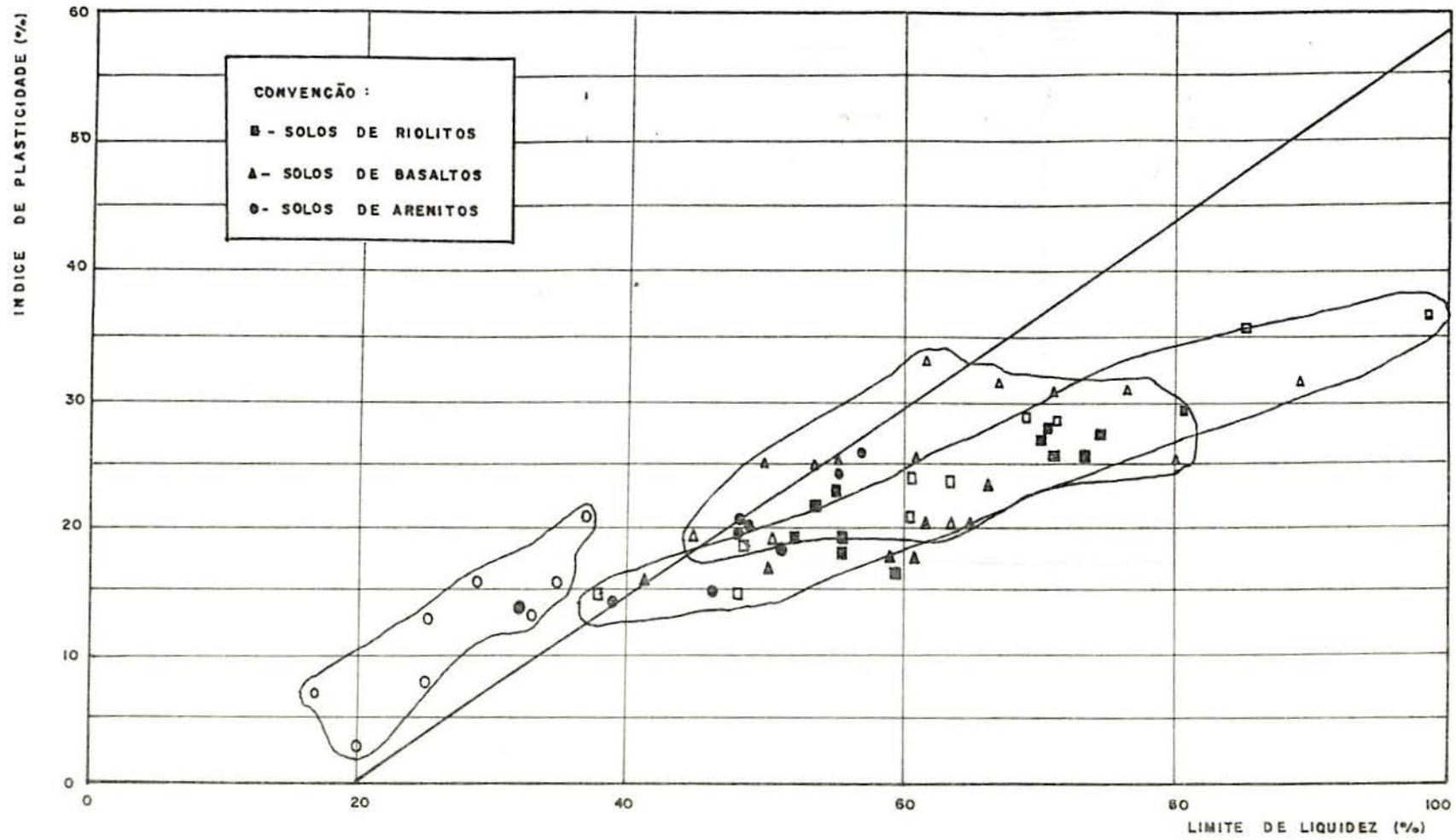


fig. 32 - INSERÇÃO, NO GRÁFICO DE PLASTICIDADE DE CRUZ, DOS VALORES OBTIDOS

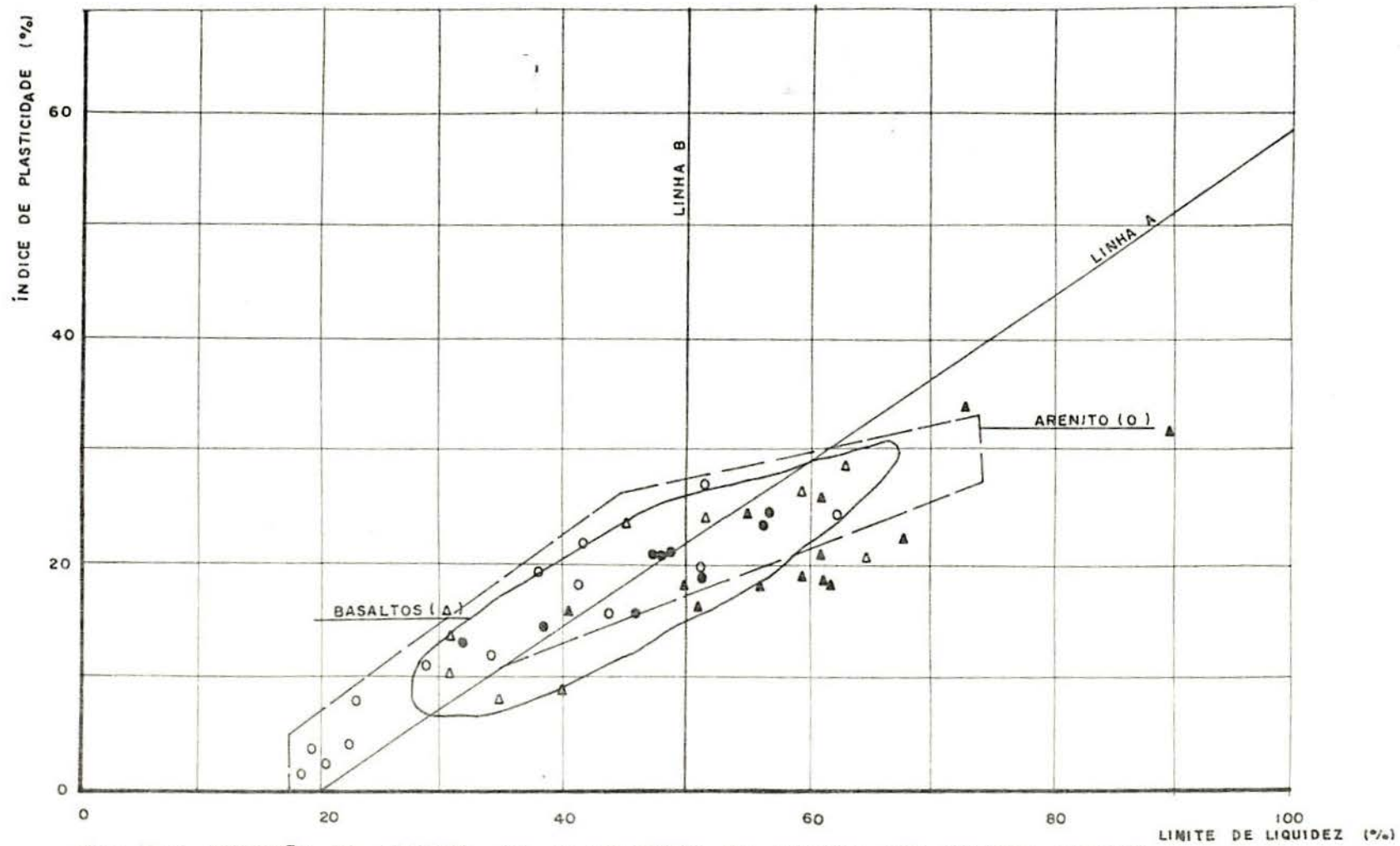


fig.- 33 - INSERÇÃO, NO GRAFICO DE PLASTICIDADE DE VARGAS, DOS VALORES OBTIDOS

TABELA V

VALORES DE LIMITES DE ATTERBERG DOS MINERAIS ARGÍ-
LICOS REFERIDOS POR LAMBE*

MINERAL	Cátions trocáveis	Limite de liquidez (%)	Limite de plasticidade (%)	Índice de plasticidade (%)	Limite de contração (%)
Montmorilonita..	Na	710	54	656	9,9
	K	660	98	562	9,3
	Ca	510	81	429	10,5
	Mg	410	60	350	14,7
	Fe	290	75	215	10,3
	Fe ^a	140	73	67	-
Ilita.....	Na	120	53	67	15,4
	K	120	60	60	17,5
	Ca	100	45	55	16,8
	Mg	95	46	49	14,7
	Fe	110	49	61	15,3
	Fe ^a	79	46	33	-
Caulinita.....	Na	53	32	21	26,8
	K	49	29	20	-
	Ca	38	27	11	24,5
	Mg	54	31	23	28,7
	Fe	59	37	22	29,2
	Fe ^a	56	35	21	-
Atapulgita.....	H	270	150	120	7,6

*Dados de Cornell

TABELA VI

VALORES DE LIMITES DE ATTERBERG PARA DIVERSOS ARGILO-MINERAIS E CÁTIONS TROCÁVEIS, REFERIDOS POR PERLOFF*

ARGILA	Ca ⁺⁺			Mg ⁺⁺			K ⁺			NH ₄ ⁺			Na ⁺			Li ⁺			
	L _p	L _L	A _c	L _p	L _L	A _c	L _p	L _L	A _c	L _p	L _L	A _c	L _p	L _L	A _c	L _p	L _L	A _c	
MONTMORILONITA.	(1)	65	166	1.26	59	158	1.24	57	161	1.30	75	214	1.74	93	344	3.14	80	638	6.98
	(2)	65	155	1.20	51	199	1.97	57	125	0.91	75	114	0.52	89	443	4.72	59	565	6.75
	(3)	63	177	1.34	53	162	1.24	60	297	2.79	60	323	3.09	97	700	7.09	60	600	6.35
	(4)	79	123	0.44	73	138	0.65	76	108	0.32	74	140	0.66	86	280	1.12	82	292	2.10
ATAPULGITA	124	232	1.08	109	179	0.70	104	161	0.57	97	158	0.61	100	212	1.12	103	226	1.23	
ILITA	(1)	40	90	0.50	39	83	0.44	43	81	0.38	42	82	0.40	34	61	0.27	41	68	0.27
	(2)	36	69	0.33	35	71	0.36	40	72	0.32	37	60	0.23	34	59	0.25	38	63	0.25
	(3)	42	100	0.58	43	98	0.55	41	72	0.31	39	76	0.37	41	75	0.34	40	89	0.49
CAULINITA	(1)	36	73	0.37	30	60	0.30	38	69	0.31	34	75	0.41	26	52	0.26	33	67	0.34
	(2)	26	34	0.08	28	39	0.11	28	35	0.07	28	35	0.07	28	29	0.01	28	37	0.09
HALOSITA	(2H ₂ O)	38	54	0.16	47	54	0.07	35	39	0.04	32	43	0.11	29	36	0.07	37	49	0.12
	(4H ₂ O)	58	65	0.07	60	65	0.05	55	57	0.02	56	61	0.05	54	56	0.02	47	49	0.02

* Dados de Grimt

TABELA VII

INFLUÊNCIA DOS TAMANHOS DE PARTÍCULAS
 NOS VALORES DE LIMITES DE ATTERBERG EM
 FUNÇÃO DO MINERAL ARGÍLICO, SEGUNDO WHITE

MINERAL ARGÍLICO	L P (%)	L L (%)	I P (%)
Ilita, Grundy Country, Illinois			
1 μ	39,6	83	43,4
0,5 μ	52,3	103,7	51,4
Ilita, La Salle Country, Illinois			
1 μ	46,2	85,6	39,4
0,5 μ			
Montmorilonita, Pontatoc, Mississippi			
Natural	81,4	117,6	36,1
1 μ	109,6	177,6	66,1
Caulinita, Anna, Illinois			
1 μ			
0,5 μ	37,1	64,2	27,1

TABELA VIII

VALORES DE LIMITES DE ATTERBERG OBTIDOS NO PRESENTE TRABALHO E POR LAMBE E GRIM EM FUNÇÃO DO MINERAL ARGÍLICO E CÂTION TROCÁVEL

MINERAL	Câtion trocável	LL (%)	LP (%)	IP (%)	REFERÊNCIA
C A U L I T A	Ca ⁺⁺	38	27	11	Lambe
	Mg ⁺⁺	54	31	23	
	Ca ⁺⁺	73	36	37	Grim
		34	26	8	
	Mg ⁺⁺	60	30	30	
		39	28	11	
	Ca ⁺⁺	61	40	21	Anta Gorda (basalto)
		54	32	22	Passo Fundo (riolito)
		73	48	25	Marau (basalto)
		59	33	17	Soledade (riolito)
	Mg ⁺⁺	39	25	14	Carazinho (arenito)
		48	27	21	Tapera (arenito)

priedades dos solos para o mesmo cátion trocável, verificada por nós e por outros dois autores (73, 44). Na figura 34 é apresentada a faixa de variação dos valores de limites para cada tipo de argilo-mineral. Nota-se que os pontos de solos de basalto e riolito do presente estudo situam-se, na sua grande maioria, fora da faixa limitada. Já os solos de arenito enquadram-se dentro da área. Isto se deve ao fato de que os valores de limites de plasticidade nos nossos solos são baixos em relação aos dados para construção desta faixa.

Perloff (67) apresenta um gráfico em função do índice de liquidez (IL) e sensibilidade dos solos dado por Skempton e Northey (67) para algumas argilas do mundo. (Fig. 35). Segundo o autor, o IL é definido por

$$IL = \frac{h_{nat} - Lp}{LL - LP}$$

O IL é também usado para estimar a ordem da magnitude de resistência ao cisalhamento esperável em um solo amolgado. O IL igual a 1 indica que o solo é altamente sensível e, sendo igual a zero, que o solo é insensível.

A figura 35 indica que a sensibilidade do solo pode ser obtida simplesmente através das determinações dos limites de Atterberg.

Pela tabela IV pode-se observar que todos os solos apresentam índice de liquidez menor que um em módulo. Isto indica a presença de solos insensíveis, segundo Skempton e Northey (67).

Dados muito limitados têm sido referidos para os limites de Atterberg de solos lateríticos.

Bawa (16) relatou resultados deste tipo de ensaio para solos lateríticos da Índia e África Equatorial Francesa, apresentando os seguintes intervalos de variação: 40%- 70%pa-

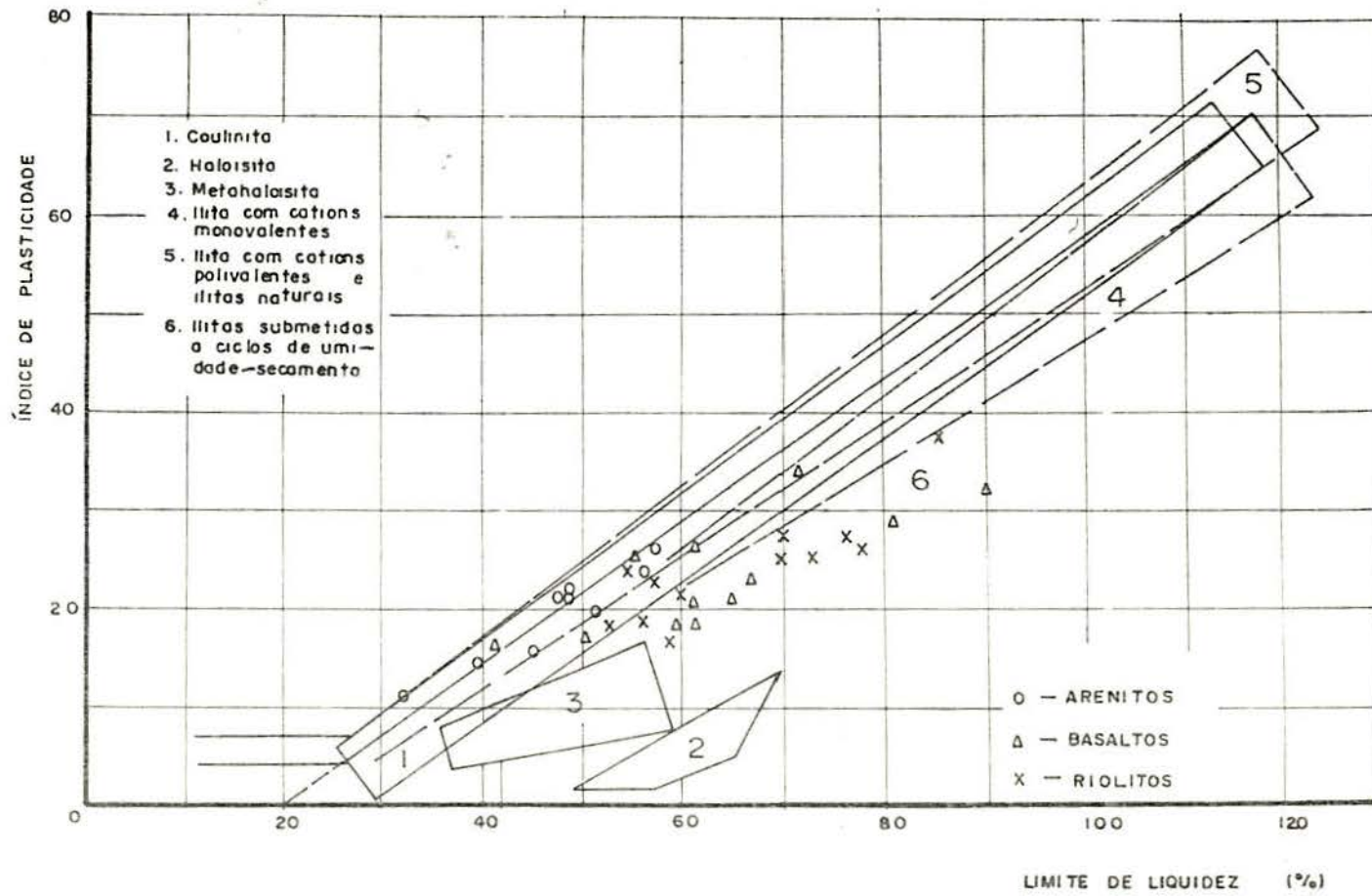


fig. 34 - INSERÇÃO, NO GRÁFICO DE PLASTICIDADE, DOS VALORES OBTIDOS

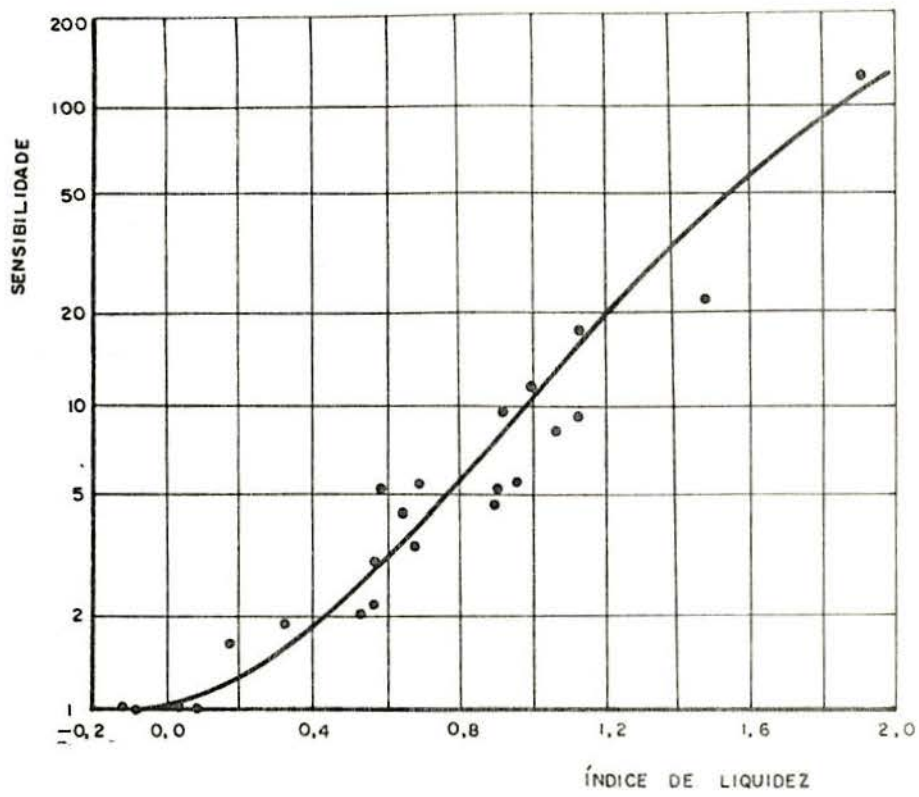


fig. 35 - RELAÇÃO ENTRE SENSIBILIDADE E ÍNDICE DE LI-
 QUEDEZ DADO POR SKEMPTON E NORTHEY

FONTE: PERLOFF

ra o limite de liquidez; 25% - 50% para o limite de plasticidade e 15% - 20% para o índice de plasticidade.

Os intervalos de variação apontados nos nossos experimentos foram: 32% - 90% para limite de liquidez; 25% - 58% para limite de plasticidade e 13% - 37% para índice de plasticidade.

Comparando-se os intervalos, percebe-se que as nossas faixas de variação de limite de liquidez e índice de plasticidade são mais amplas, permanecendo quase inalterado o intervalo de limite de plasticidade.

Esta dispersão de valores em limite de liquidez pode ser devida ao processo de lixiviação. Ola (63) determinou uma tabela de limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade antes e depois da lixiviação em solos lateríticos (Tabela IX). Vê-se que o valor do limite de liquidez aumenta depois da lixiviação que, segundo ele, se deve ao rompimento das partículas do solo, expondo, portanto, uma área superficial muito aumentada.

Por outro lado, a respeito de solos lateríticos, algumas observações têm mostrado que os limites de Atterberg dependem também da intensidade de amolgamento ou manuseio de amostra durante o ensaio. Winterkorn e Chandar Sherkharon (95) citam uma mudança no LL de 46% para 53%, Townsend e colaboradores (87), de 58% para 69%, e Coleman e Farrar (23), de 69% para 95%, decorrente da ação de amolgamento nas amostras ensaiadas.

Outro fator também importante nos valores de Atterberg, segundo Carvalho (66), é o secamento prévio do solo. Conclui ele que, em geral, há um aumento do LL nos solos lateríticos quando estes são ensaiados em amostras que não permitam a secagem prévia do solo ao ar.

TABELA IX

INFLUÊNCIA DA LIXIVIAÇÃO EM SOLOS LATERÍTIÇOS NOS VALORES DE ATTERBERG SEGUNDO OLA

ENSAIOS	RESULTADOS	
	Antes da lixiviação	Depois da lixiviação
Limite de liquidez (%)	42	53
Limite de plasticidade (%)	25	21
Índice de plasticidade (%)	17	32
Densidade real dos grãos	2.70	2.51

A atividade coloidal (Ac) é uma medida do grau em que o solo exibe o comportamento coloidal, e é definida pela expressão

$$Ac = \frac{Ip}{\% < 2 \mu}$$

As argilas que apresentam uma atividade menor que 0,75 são consideradas inativas. As argilas normalmente ativas têm atividade entre 0,75 e 1,25; as com valores superiores a 1,25, são denominadas argilas ativas.

No gráfico de atividade de Skempton (80), nossos pontos se distribuem na região dos minerais inativos com atividade coloidal que vai de 0,28 a 0,67 para todos os tipos de solos (Fig. 36).

Inserindo nossos pontos no gráfico de atividade de

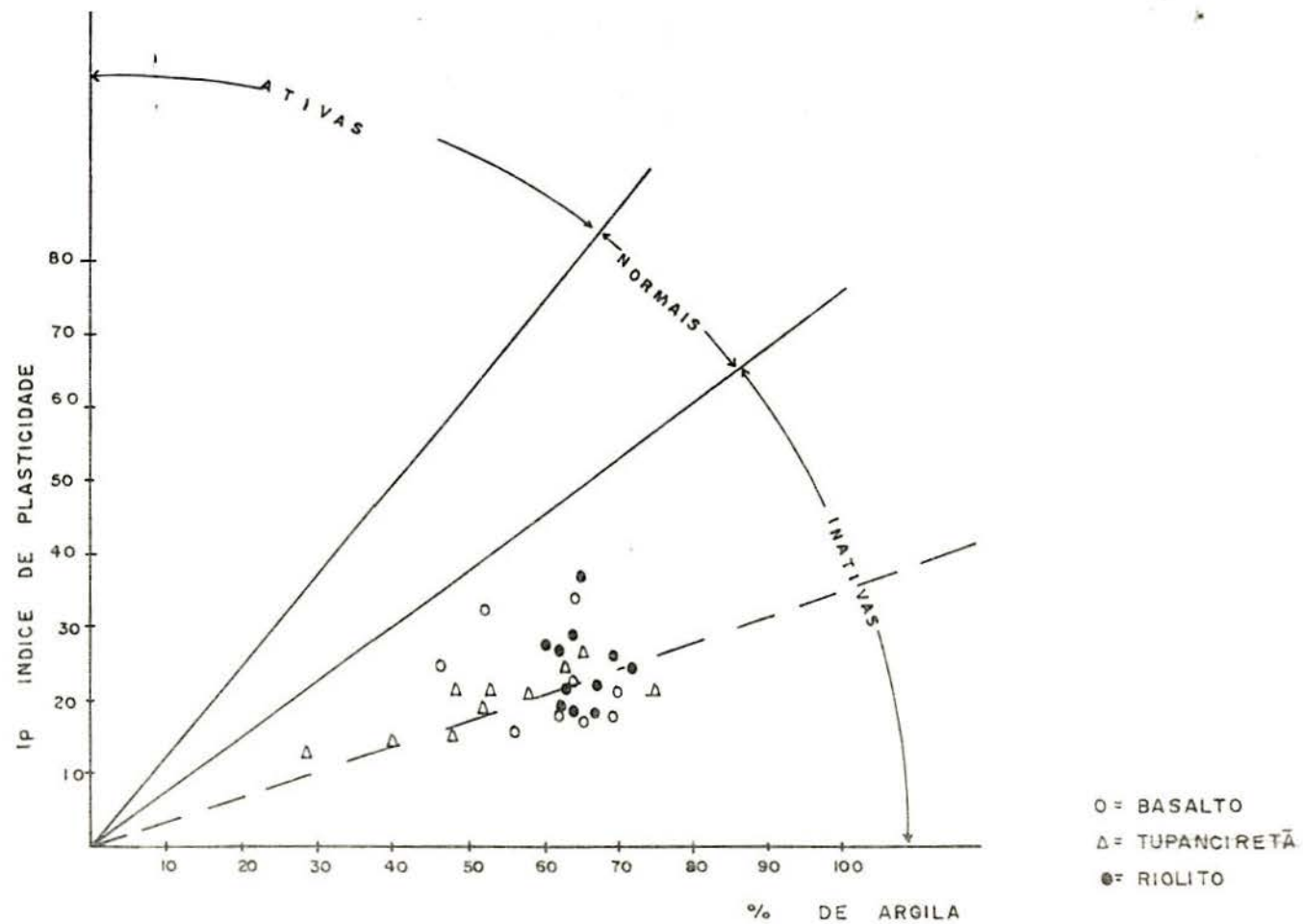


fig. 36 - RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE PLASTICIDADE E FRAÇÃO ARGILA (2μ) SEGUNDO SKEMPTON

Cruz (26), observa-se que os mesmos apresentam-se dispersos, enquadrando-se, na sua maioria, na área de basalto (Fig. 37).

O baixo valor de atividade das amostras ensaiadas (Tabela IV) aliado à presença de caulinita já foi confirmado por difratometria, de acordo com a teoria de Skempton (Fig.38).

Mitchell (55) estabeleceu intervalos de variações de atividade coloidal versus argilo-mineral (Tabela X). Ele também apresentou uma tabela que indica intervalos dos limites de Atterberg versus mineral argílico (Tabela XI). Pode-se notar que a faixa de variação correspondente ao mineral caulinita se enquadra dentro dos resultados obtidos nos ensaios de plasticidade para os solos do presente estudo.

Quanto à atividade coloidal em função da mineralogia, vê-se que existe uma correlação direta nos valores, confirmando as teorias dadas pelos autores citados acima.

Os baixos valores de atividade coloidal são encontrados também em solos lateríticos. Estudos elaborados pela Agency for International Development (2) constataram, em alguns solos lateríticos da África, valores baixos de atividade coloidal, com intervalos de variação de 0,4 a 1,0. A explicação dada é que valores baixos de atividade coloidal de muitos solos lateríticos podem ser devidos à ação de intemperismo que atua nas partículas envolvidas por sesquióxidos.

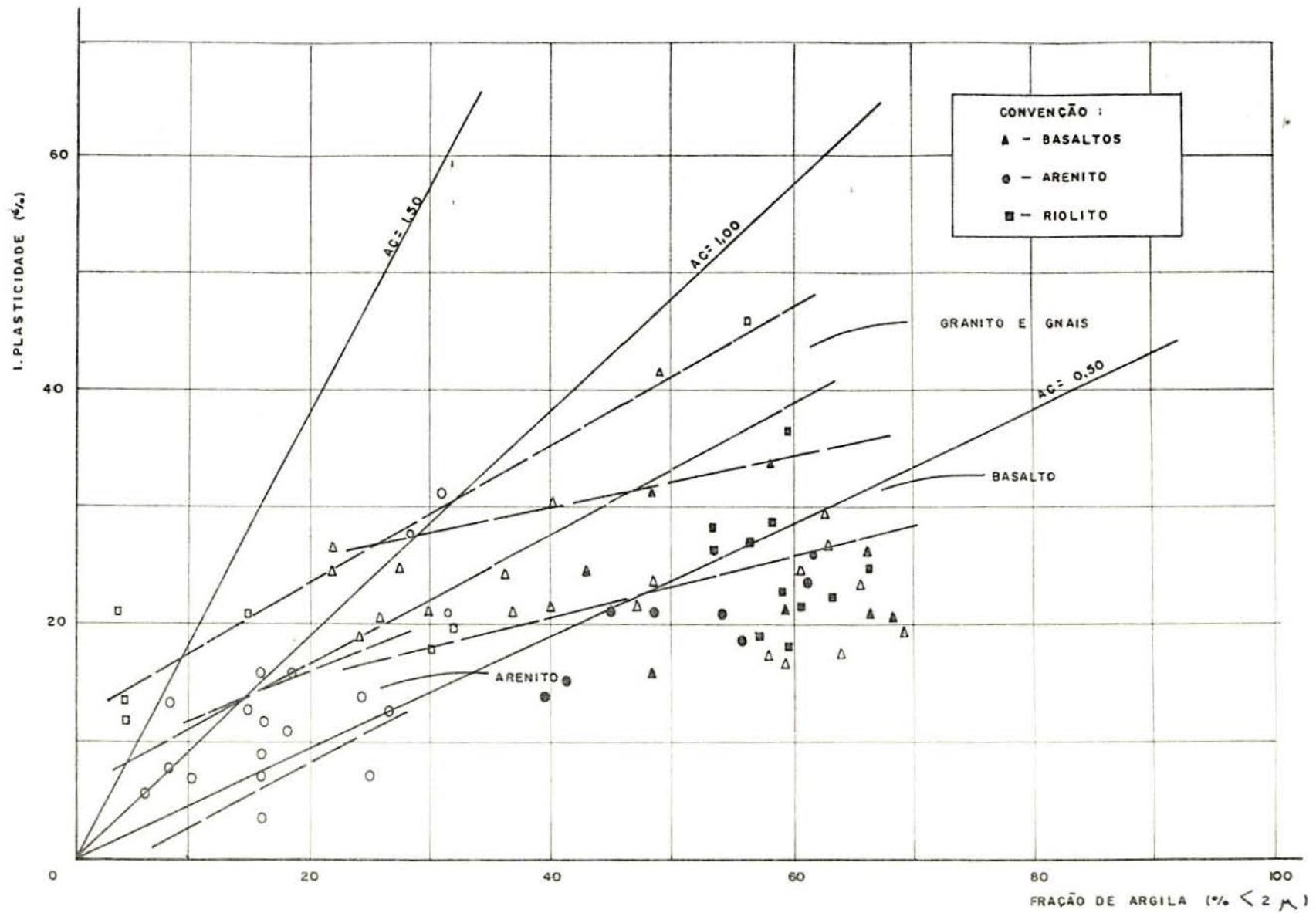


fig. 37 - INSERÇÃO, NO GRÁFICO DE ATIVIDADE DE CRUZ, DOS VALORES OBTIDOS

TABELA X

ATIVIDADE COLOIDAL DE VÁRIOS
MINERAIS, SEGUNDO MITCHELL

MINERAL	ATIVIDADE COLOIDAL
Smectita.....	1 -7
Ilita.....	0,5-1
Caulinita.....	0,5
Haloisita (2H ₂ O)....	0,5
Haloisita (4H ₂ O)....	0,1
Atapulgita.....	0,5-1,2

TABELA XI

VALORES DE LIMITES DE ATTERBERG PARA DI-
VERSOS ARGILO-MINERAIS, SEGUNDO MITCHELL

MINERAL	LIMITE DE LIQUIDEZ (%)	LIMITE DE PLASTICIDADE (%)
Montmorilonita.....	100-900	50-100
Nontronita.....	37- 72	19- 27
Ilita.....	60-120	35- 60
Caulinita.....	30-110	25- 40
Haloisita hidratada.....	50- 70	47- 60
Haloisita desidratada.....	35- 55	30- 45
Atapulgita.....	160-230	100-120
Clorita.....	44- 47	36- 40

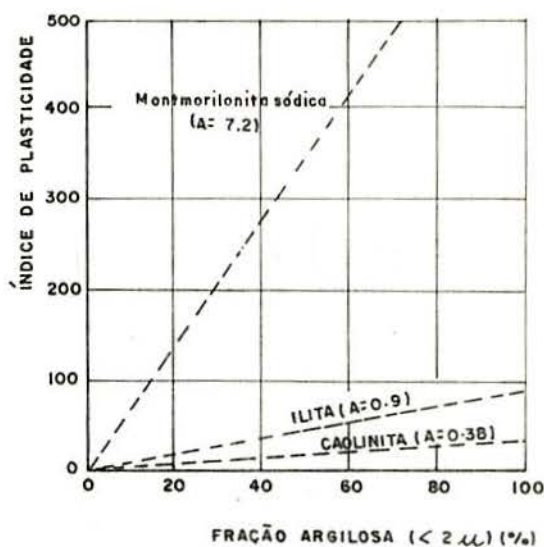


Fig. 38 - RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE PLASTICIDADE E FRAÇÃO ARGILOSA, SEGUNDO SKEMPTON

Skempton (80) determinou também que, para valores de atividade coloidal menores que 0,75, o efeito de amolgamento da retirada das amostras não afeta, de uma maneira geral, as propriedades dos solos. O mesmo autor estabeleceu a correlação entre atividade, localização, geologia e mineralogia (Quadro VI).

Salas (73) observou que a atividade das argilas pode estar relacionada com sua história geológica (Quadro VII).

QUADRO VI

CORRELAÇÃO ENTRE ATIVIDADE, LOCALIZAÇÃO, GEOLOGIA
E MINERALOGIA DE ALGUMAS ARGILAS SEGUNDO SKEMPTON

GRUPO	INTERVALO DE ATIVIDADE	LOCALIZAÇÃO	GEOLOGIA	MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA		ATIVIDADE COLOIDAL	REFERÊNCIA
				MAIOR	MENOR		
Inativo 1	menor que 0.5	St. Thuribe, near Quebec	Post Glacial marine or estuarine, leached	Q	Mi	0.33	Feck et al., Grim
		Cornwall, England	Formed in situ by pneumatolysis (kaolin)	k	—	0.39	Northey
		Chicago, U.S.A.	Late Glacial, lacustrine	....	....	0.41	Futledge
		Boston, U.S.A.	Late Glacial, marine	....	....	0.42	Taylor
		Horten, Norway	Post Glacial, marine, leached	Q Mi i	mo k	0.42	Hansen, Northey, Grim
		Detroit, U.S.A.	Late Glacial, lacustrine	Mi i C	Q mo	0.49	Peck, Grim
Inativo 2	0.5 a 0.75	Wrexham, Wales	Late Glacial, probably lacustrine	....	....	0.54	B.R.S.
		R. Lidan, Sweden	Post Glacial, probably as Horten	....	....	0.58	Cadling
		Weald (various sites), England	Weald Clay, Cretaceous, lacustrine	i k	vermiculite	0.63	B.R.S., A.O.R.G.
		Reading, England	Reading Clay, Eocene, fresh-water	....	....	0.72	B.R.S.
		Seagrove Bay, I.O.W., England	Oligocene, fresh-water	....	....	0.73	Skempton
		Grangemouth, Scotland	Late Glacial, Estuarine	....	....	0.74	Skempton
Normal 3	0.75 a 1.25	Peterborough, England	Argila Oxford, jurássico, marinha	....	....	0.86	B.R.S.
		Gosport, England	Post Glacial, marine	i	h	0.88	Skempton, Nagelschmit
		Grundy County, Ill., U.S.A.	Upper Carboniferous (illite.)	i	—	0.90	Northey, Grim
		Aylesbury, England	Kimmeridge Clay, Jurassic, marine	....	....	0.93	B.R.S.
		London (various sites)	London Clay, Eocene, marine	i	k mo	0.96	Cooling, Skempton, Grim
		Various sites, S.E. England	Gault Clay, Cretaceous, marine	i k	mo	0.96	F.R.S., A.O.R.G.
Ativo 4	1.25 a 2.0	Norfolk Pens, England	Post Glacial, marine and estuarine	....	....	1.06	B.R.S.
		Vienna, Austria	Wiener Tegel, Miocene, marine	....	....	1.08	Hvorslev
		Klein-Belt, Denmark	Klein-Belt-Ton, Eocene, marine	....	....	1.18	Hvorslev
		Shellhaven, England	Post Glacial, organic and estuarine	i	k	1.33	Skempton, Grim
		La Guardia Airport, New York	Post Glacial, organic, marine	....	....	1.45	Harris et al.
		R. Shannon, Eire	Recent river alluvium, organic	....	....	1.5	B.R.S.
Ativo 5	maior que 2.0	Belfast, N. Ireland	Post Glacial, organic, estuarine	....	....	1.6	B.R.S.
		Chingford, England	Recent river alluvium, organic	....	....	1.7	B.R.S.
		Panama, Central America	Recent organic, marine	....	....	1.75	Casagrande
		Mexico City	Bentonite Clay (argila CN)	mo	....	4.3	Marsal et al.
		Wyoming, U.S.A.	Bentonite (Bentonita)	mo	—	6.3	Samuels, Northey
		C = Calcita Mi = Mica Q = Quartzo	h = Halosita i = Ilita k = Caolinita mo = Montmorilonita	argilo minerais	— (inexistente) não determinado		

QUADRO VII

ATIVIDADE DAS ARGILAS EM FUNÇÃO DE SUA HISTÓRIA
GEOLÓGICA, SEGUNDO SALAS

HISTÓRIA GEOLÓGICA	ATIVIDADE
Argilas residuais cauliníticas	0,40
Argilas inorgânicas glaciais e pós-glaciais marinhas que foram lixiviadas por água doce	entre 0,40 e 0,75
Argilas inorgânicas depositadas em água doce ou estuário	entre 0,40 e 0,75
Argilas inorgânicas marinhas (em sua maioria são ilíticas)	entre 0,75 e 1,25

4.5 - Compactação e ISC

Na tabela IV, são apresentados os resultados do ensaios de compactação e ISC.

Na determinação de densidade máxima e umidade ótima convém salientar que houve a reutilização do material, podendo provocar o deslocamento da curva para esquerda e para cima. Outro fator importante na reutilização do material é que não se conhece até que ponto as deformações cisalhantes induzidas pela compactação são recuperáveis. Baseados em resultados experimentais, Seed e Chan (79) concluíram que, da mesma forma que as deformações cisalhantes durante o cisalhamento modificam a estrutura, as deformações cisalhantes que ocorrem durante a compactação podem provocar um efeito acentuado na estrutura original. Assim, quanto maiores as deformações cisalhantes induzidas pelo método de compactação, maior o grau de dispersão.

Plotando os valores no gráfico de umidade ótima ver

sus densidade máxima seca (Fig. 39), nota-se que os solos de arenito da Formação Tupanciretã apresentam valores maiores de densidade e menores de umidade ótima e, por outro lado, que os solos de basalto e riolito denotam semelhanças nos seus valores. A variação dos valores dos solos de arenito se deve ao fato de apresentarem uma formação de areia e silte superior aos demais.

Inserindo os nossos valores no gráfico de Cruz (26), observa-se que solos provenientes de riolito e basalto situam-se na área limitada, não ocorrendo o mesmo para os solos de arenito que apresentam os seus resultados dispersos, não se enquadrando na faixa (Fig. 40).

Casagrande e Hirschfeld (21) estudaram os efeitos do esforço acumulativo de compactação nas camadas inferiores e da força requerida para a extrusão da amostra do molde. Concluíram que, para amostras compactadas no lado seco, não houve variações significativas no valor do peso específico da amostra e que, para amostras compactadas no lado úmido, a extrusão provocou um aumento de 2 a 4% no valor do peso específico no bordo onde a força extrusiva foi aplicada. Diminuindo-se o processo de extrusão, não foi observada variação significativa que pudesse ser atribuída ao esforço acumulativo de compactação.

Vargas (89) menciona que, quando os solos residuais são compactados abaixo da umidade, sua estrutura é aproximadamente a de um cimento argiloso e, quando eles são compactados acima da umidade ótima, forma-se uma mistura desordenada.

As características de compactação dos solos oriundos da Formação Tupanciretã apresentaram maiores valores de densidade máxima e ISC e menores em umidade ótima e expansão, comportamento inverso ao dos solos de riolito.

Nos estudos de solos lateríticos realizados pela Agency for International Development (2) foram encontrados valores de densidade máxima abaixo de $1,60\text{g/cm}^3$, com uma umidade ótima acima de 24% em muitas argilas.

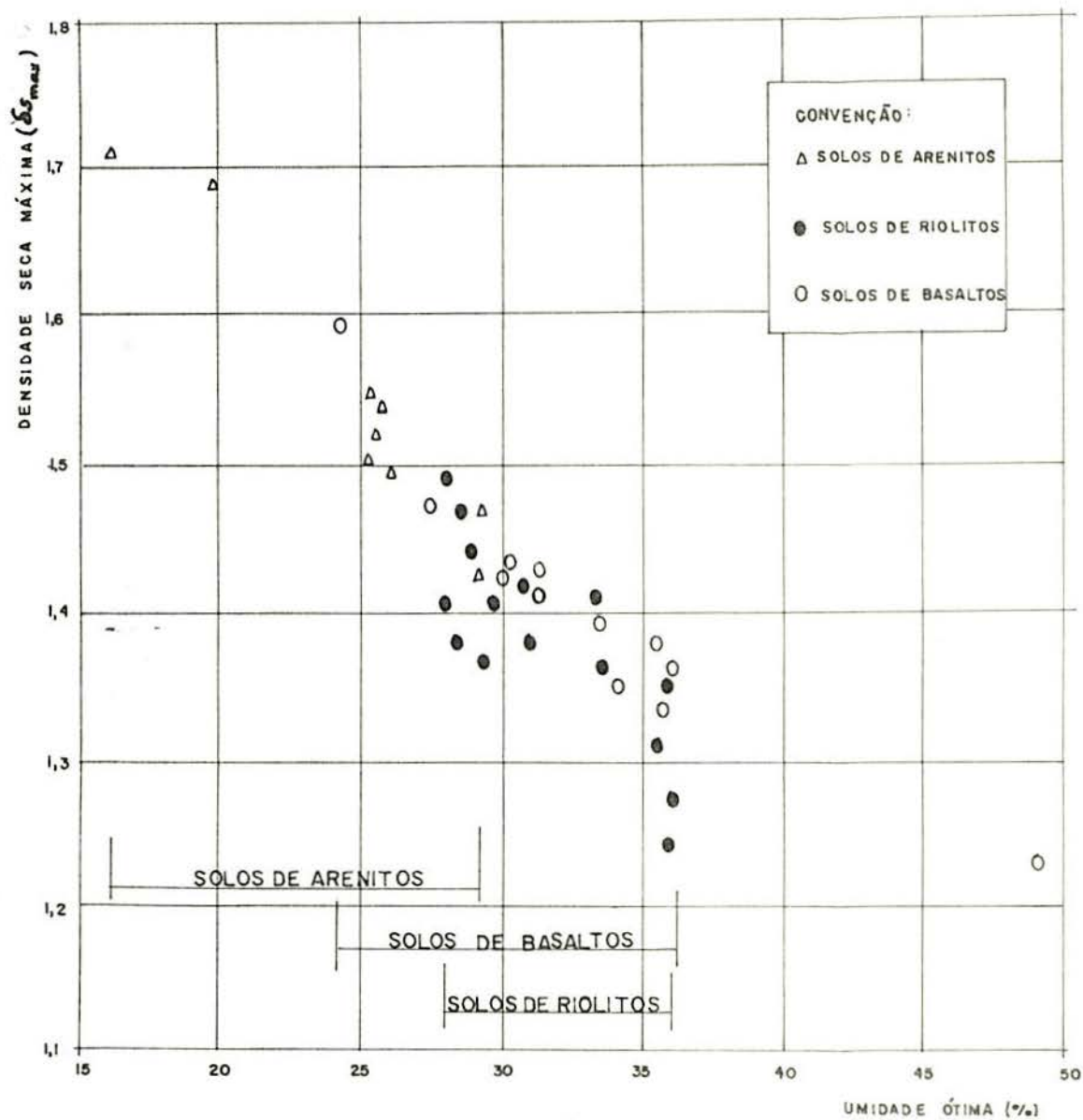


fig. 39 - GRÁFICO DE UMIDADE ÓTIMA X DENSIDADE SECA MÁXIMA DE SOLOS DA REGIÃO DE PASSO FUNDO

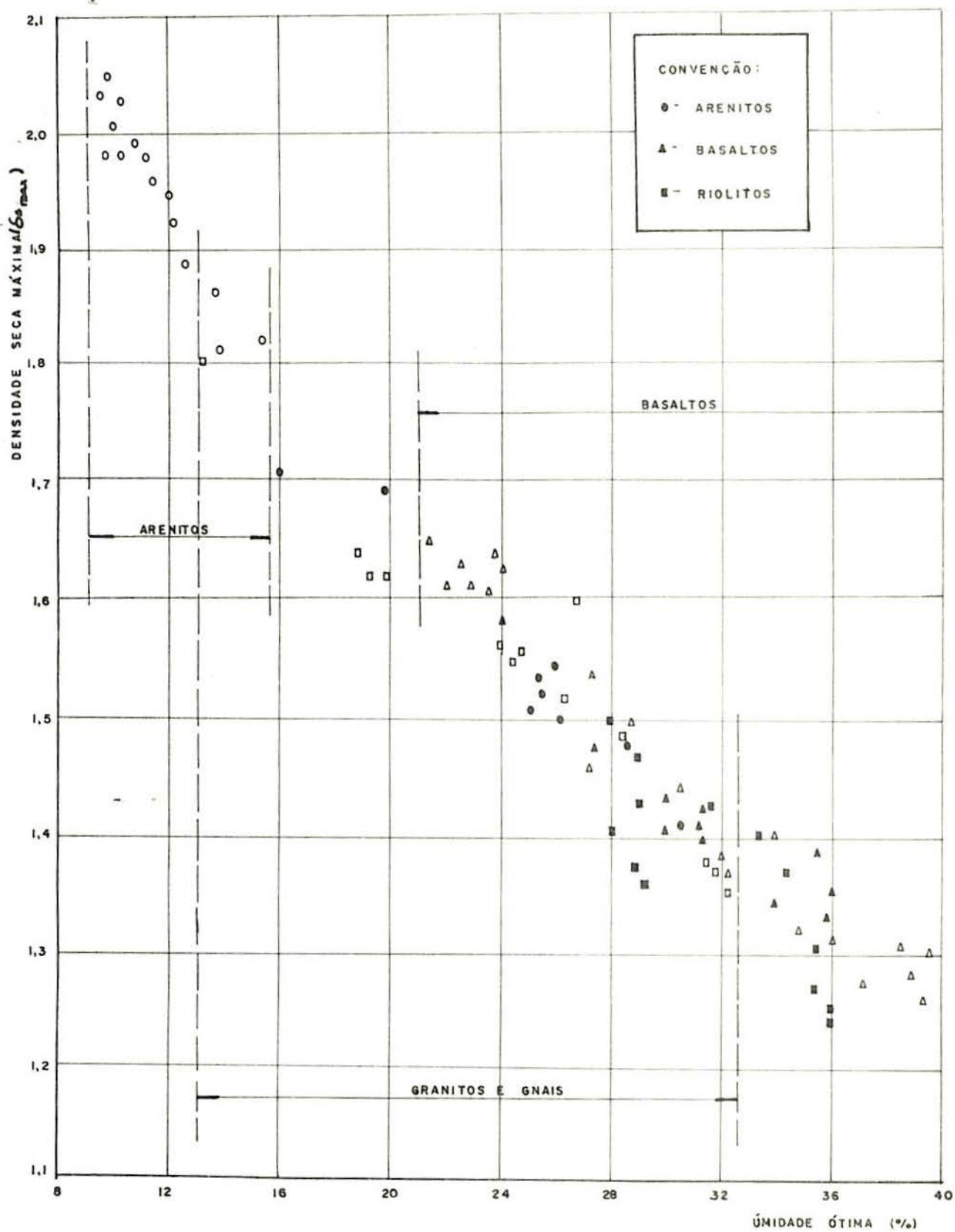


fig. 40 - INSERÇÃO, NO GRÁFICO DE CRUZ, DOS VALORES OBTIDOS

Nossos valores encontram-se com uma úmidade ótima mínima de 24% e densidade seca máxima abaixo de $1,60\text{g/cm}^3$, apresentando dispersão apenas para dois valores pertencentes a solos de arenito.

4.6 - Comportamento Mecânico

Os resultados dos ensaios de compressão confinada, colapsibilidade e resistência ao cisalhamento são apresentados a seguir

4.6.1 - Compressibilidade

O ensaio de compressão confinada consiste em medir a variação de volume do solo para um acréscimo de pressão vertical estando o solo confinado lateralmente. As previsões de recalque total, velocidade de recalque e dissipação de poro pressões são feitas com base em parâmetros de ensaios de laboratório.

Na figura 41 aparecem as curvas de índice de vazios versus logaritmo de pressões dos três tipos de solos sob duas condições de umidade (natural e inundados).

Os valores de índice de compressão (C_c), índice de expansão (C_s), pressão de sobreadensamento calculada pelo método de Casagrande e de índice de vazios inicial e final após a aplicação de uma pressão equivalente a 8 kg/cm^2 , bem como a relação entre σ'_c e a pressão atuante σ'_p estão relacionados nas tabelas XII e XIII.

Em algumas amostras, verifica-se a existência do patamar inicial caracterizado nos solos de Carazinho, Tapera, Passo Fundo e Soledade, enquanto em outras isto não acontece, certamente devido à relação de carregamento aplicado ($\Delta P/P = 1$), que, em certos casos, provoca a quebra da estrutura da argila e efeito de amolgamento. As curvas dos solos de Passo Fundo e

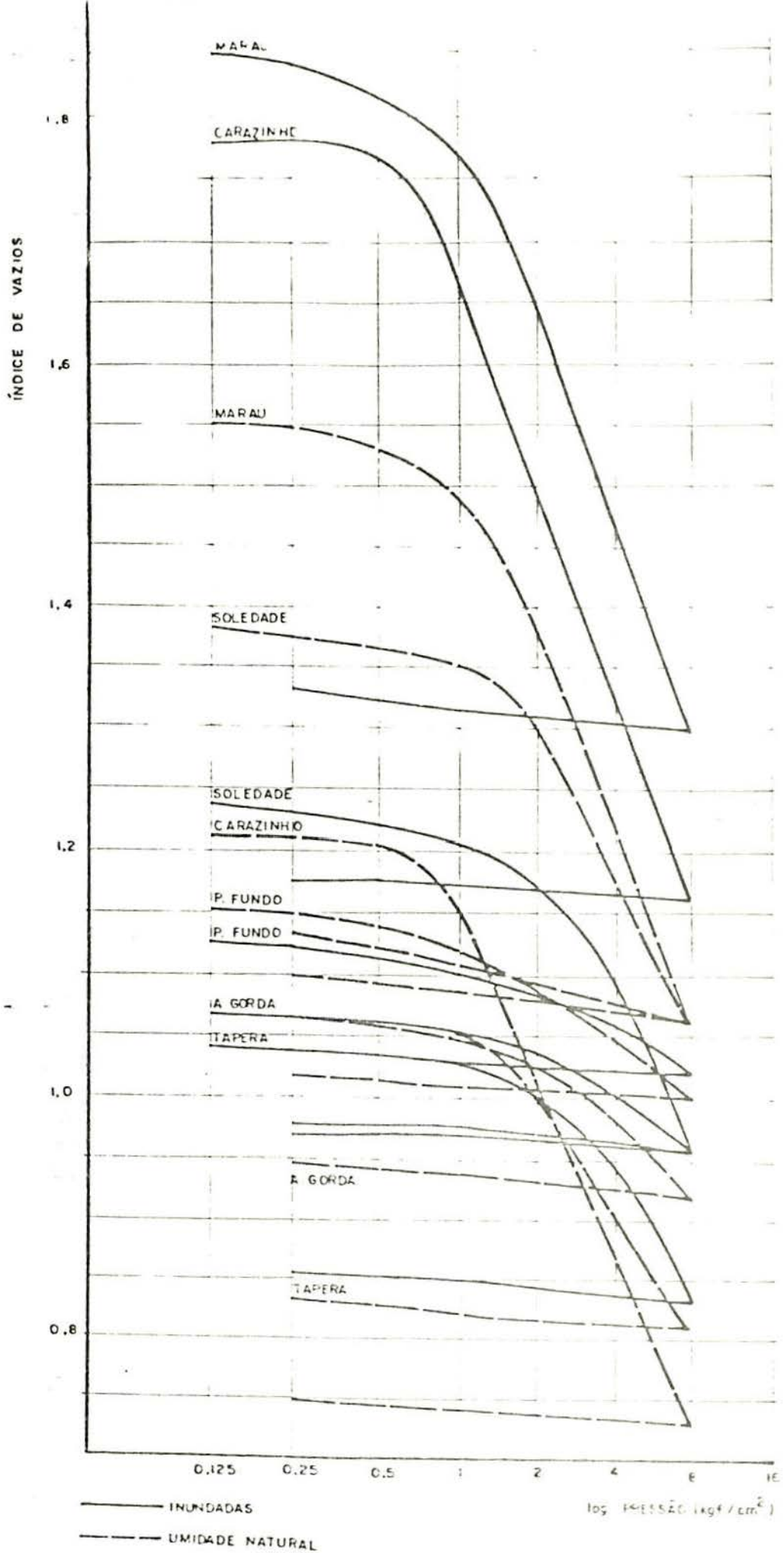


fig. 41 - CURVAS DE ÍNDICE DE VAZIOS X LOGARITMO DE PRESSÃO DOS SOLOS

TABELA XII

CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSIBILIDADE DOS SOLOS
EM AMOSTRAS INDEFORMADAS NA UMIDADE NATURAL

LOCALIDADE	PROF (m)	Cc	Cs	$\sigma'c$ (kg/cm ²)	ei	ef	OCR	$\sigma'p$ (kg/cm ²)
Soledade (riolito) ..	1,50	0,47	0,03	2,10	1,24	0,96	8,57	0,25
Passo Fundo (riolito) ..	1,50	0,13	0,01	0,85	1,13	1,02	3,33	0,26
Marau (basalto) ..	1,50	0,53	0,03	1,18	1,86	1,30	5,32	0,22
Anta Gorda (basalto) ..	1,50	0,16	0,02	1,18	1,07	0,96	4,52	0,26
Tapera (arenito) ..	2,00	0,37	0,02	2,20	1,04	0,84	7,01	0,31
Carazinho (arenito) ..	2,00	0,47	0,03	0,68	1,79	1,16	2,28	0,30

TABELA XIII

CARACTERÍSTICAS DE COMPRESSIBILIDADE DOS
SOLOS EM AMOSTRAS INDEFORMADAS INUNDADAS

LOCALIDADE	PROF (m)	Cc	Cs	$\sigma'c_2$ (kg/cm ²)	ei	ef	OCR	$\sigma'p_2$ (kg/cm ²)
Soledade (riolito) ..	1,50	0,42	0,03	1,85	1,38	1,05	7,55	0,25
Passo Fundo	1,50	0,17	0,01	0,71	1,15	1,00	2,78	0,26
Marau (basalto) ..	1,50	0,56	0,02	1,15	1,55	1,06	5,18	0,22
Anta Gorda (basalto) ..	1,50	0,23	0,02	1,05	1,07	0,92	4,02	0,26
Tapera (arenito) ..	2,00	0,33	0,01	1,45	1,05	0,81	4,62	0,31
Carazinho (arenito) ..	2,00	0,37	0,03	0,84	1,29	1,14	2,82	0,30

$\sigma'p$ = pressões atuantes (kg/cm²)

$\sigma'c$ = pressão de sobreadensamento (kg/cm²)

Anta Gorda demonstraram pouca variação no índice de vazios com relação ao acréscimo de cargas. Nas amostras inundadas, as curvas apresentaram-se paralelas, na parte reta, às das amostras na umidade natural, conforme Vargas (88). Em geral, para pressões superiores a $1,0\text{kgf/cm}^2$ as curvas apresentam uma configuração retilínea, o mesmo não ocorrendo para pressões inferiores.

As retas virgens das curvas de Anta Gorda e Passo Fundo não estão bem definidas e podem ter sido influenciadas ou pela adoção de pressões inferiores ao mínimo necessário para caracterizar a reta, ou pela escolha da escala.

A reta virgem destas curvas foi melhor visualizada quando se utilizou uma escala maior permitindo a determinação da pressão de sobreadensamento. Entretanto, a pressão determinada na escala maior, pode não corresponder ao valor real, dando margem a erro na interpretação.

González (32) menciona a importância da escolha da escala na determinação da pressão do sobreadensamento. Segundo a autora, para retas virgens não definidas, a solução ideal é a elevação das pressões adotadas.

A variação do índice de vazios de uma amostra do mesmo bloco é caracterizada provavelmente pela presença de macrovazios e pela heterogeneidade causada pela lixiviação.

Os resultados obtidos permitem classificar os solos como fortemente pré-adensados a moderados, quando comparados às pressões atuantes "in situ". A pressão de sobreadensamento apresentou pequenas dispersões quando a amostra era submetida a uma acréscimo de umidade.

Sowers (83) explica que a pressão de sobreadensamento pode ser proveniente dos resíduos de minerais da rocha mãe causados pelo resfriamento da rocha provocando uma contração diferencial de vários minerais. Essas contrações provocam desenvolvimento de grandes tensões entre os grãos, e parte dessas tensões permanecem na estrutura. Outro fator que pode ocorrer, de acordo com o mesmo autor, é o fenômeno de mu-

danças de volume associado com o intemperismo, produzindo esforços que são parcialmente retidos pela estrutura do solo. A pressão média de sobreadensamento encontrada em seus estudos de solos residuais de rochas ígneas e metamórficas foi de 3kg/cm^2 . Nos nossos, o valor máximo de pressão de sobreadensamento ficou em torno de $2,10\text{kg/cm}^2$.

Vargas (89) comenta que o conceito de sobreadensamento é perfeitamente explicável nos solos sedimentares, mas que nos solos residuais ele não tem um significado preciso. Segundo ele, a pressão de sobreadensamento tem origem, provavelmente, na estrutura esqueleto-grosso-matriz coloidal, característica da formação dos solos residuais. Explica o autor que o secamento das camadas superficiais provoca uma compressão do solo semelhante a um carregamento prévio.

A compressibilidade relativa do solo é medida a partir de pressões elevadas através do parâmetro C_c , medido pela inclinação da reta virgem. Os valores de C_c apresentaram intervalo entre 0,13 a 0,56. Os menores valores foram verificados nos solos de Passo Fundo, provenientes de riolito, e nos de basalto de Anta Gorda, tal como mostram as tabelas XII e XIII. Esta diferença pode ter sido ocasionada pela presença mais elevada de quartzo na amostra de Passo Fundo, o que torna o conjunto menos compressível. Os valores apresentaram-se baixos nos três tipos de solos.

Em estudos de solos residuais, Sowers (83) verificou a inter-relação entre o índice de vazios e o C_c a partir de amostras indeformadas de 50 locais. Esta relação é descrita pela equação $C_c = 0,75 (e - 0,55)$. Na figura 42 estão plotados os valores por ele encontrados. Nossos pontos apresentaram-se abaixo da linha e alguns fora da zona sombreada que, segundo o autor, representa solos ricos em caulim e quartzo, semelhantes aos de solos vulcânicos da Itália.

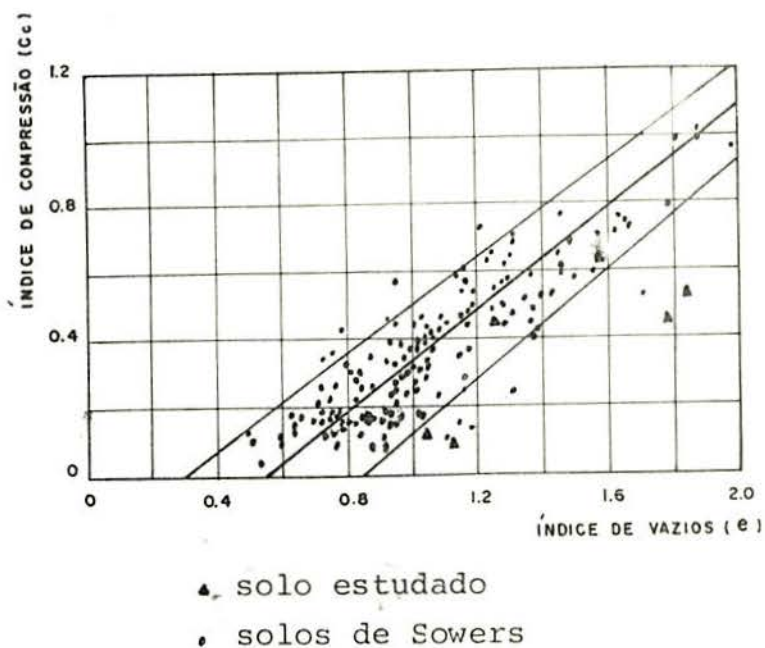


Fig. 42 - RELAÇÃO ENTRE C_c e e EM SOLOS INDEFORMADOS, SEGUNDO SOWERS

Vargas (88) apresenta correlações estatísticas entre C_c e LL ($C_c = 0,005 (LL + 22)$) e entre C_c e C_s ($\lambda = C_c/C_s$) a partir de uma série de amostras indeformadas não saturadas de solos porosos.

Comparando nossos resultados com os obtidos por ele, verificou-se que, em alguns casos, as correlações eram aplicáveis, mas que, em outros, como os solos de Passo Fundo e Anta Gorda, os valores das correlações eram elevados (Tabela XIV).

Por ser relativamente restrito o número de amostras estudadas no presente trabalho, em termos de litologia, não foi possível tirar conclusões ou estabelecer correlações entre os parâmetros litológicos.

TABELA XIV

VALORES OBTIDOS (λ e C_c) A PARTIR DAS CORRELAÇÕES ESTABELECIDAS POR VARGAS PARA SOLOS POROSOS

LOCALIDADE	$\lambda = C_c/C_s$ ($\lambda=25,11 \pm 15,2$)*	$C_c = 0,005(LL+22) \pm 0,1^*$
Soledade (riolito)	15,50	0,41
Passo Fundo (riolito)	13,00	0,38
Marau (basalto)	17,73	0,48
Anta Gorda (basalto)	8,15	0,42
Tapera (arenito)	18,25	0,35
Carazinho (arenito)	15,50	0,31

*Intervalos de Vargas

4.6.2 - Colapsibilidade

A colapsibilidade de um solo é definida como um decréscimo do índice de vários solos não saturado, resultante de um rearranjo de partículas de solos não saturado através do umedecimento.

De acordo com Barden e colaboradores (15), o colapso de um solo requer três condições:

- estrutura de solo parcialmente saturada;
- tensões existentes para desenvolver uma condição de colapso;
- o rompimento dos agentes cimentantes nos contatos intergranulares, provocado pelo umedecimento, ocasionando o colapso.

O valor quantitativo do colapso é uma função do tipo de solo, do índice de vazios inicial, da história de ten-

são, da espessura da camada envolvida e da quantidade da carga adicionada.

Em geral, os horizontes superficiais pedologicamente evoluídos apresentam uma estrutura colapsível devido à lixiviação do material coloidal que resulta em valores de índice de vazios elevados (macrovazios). A lixiviação ocorre pelo rompimento dos pontos de contato e dos grãos cimentados.

A colapsibilidade do solo pode ser medida a partir do ensaio de adensamento. O uso deste ensaio poderá dar não somente uma determinação qualitativa da possibilidade de colapso mas também informação que permite estimar a magnitude do colapso (42). A colapsibilidade do solo pode ser medida pelo máximo decréscimo de índice de vazios quando saturado sob uma pressão normal. Segundo Vargas (88), em geral, o máximo decréscimo se verifica com uma pressão normal de $0,50 \text{ kg/cm}^2$ (Fig. 43). Já Clemence e colaboradores (22) verificaram que o máximo decréscimo ocorre com uma pressão normal de $2,0 \text{ kg/cm}^2$.

Os estudos de colapsibilidade por nós desenvolvidos se basearam em ambos os métodos.

Verificou-se que, nos solos estudados, somente a pressão normal de $0,50 \text{ kgf/cm}^2$ provoca um decréscimo de índice de vazios, não tendo havido variações para pressões maiores. O colapso ocorreu nos solos de arenito da Formação Tupanciretã (Carazinho), podendo ter sido ocasionado por dois fatores. O primeiro deles é a umidade presente. Os solos de basalto e riolito apresentam elevado teor de umidade em relação aos de arenito. Segundo Dubley (28), o intervalo de umidade, (situado entre 13% e 39%) pode favorecer o colapso ao saturar-se o solo. Os nossos solos situaram-se em torno de 14%. O segundo fator é a presença de siltes em maior porcentagem nos solos de arenito nos quais, com a saturação, ocorre o rompimento das ligações cimentantes ocasionando o colapso, o que se pode explicar pelo elevado valor de índice de vazios.

Ainda de acordo com Dubley (28), muitos solos colapsíveis apresentam os limites de liquidez e índice de plasticida

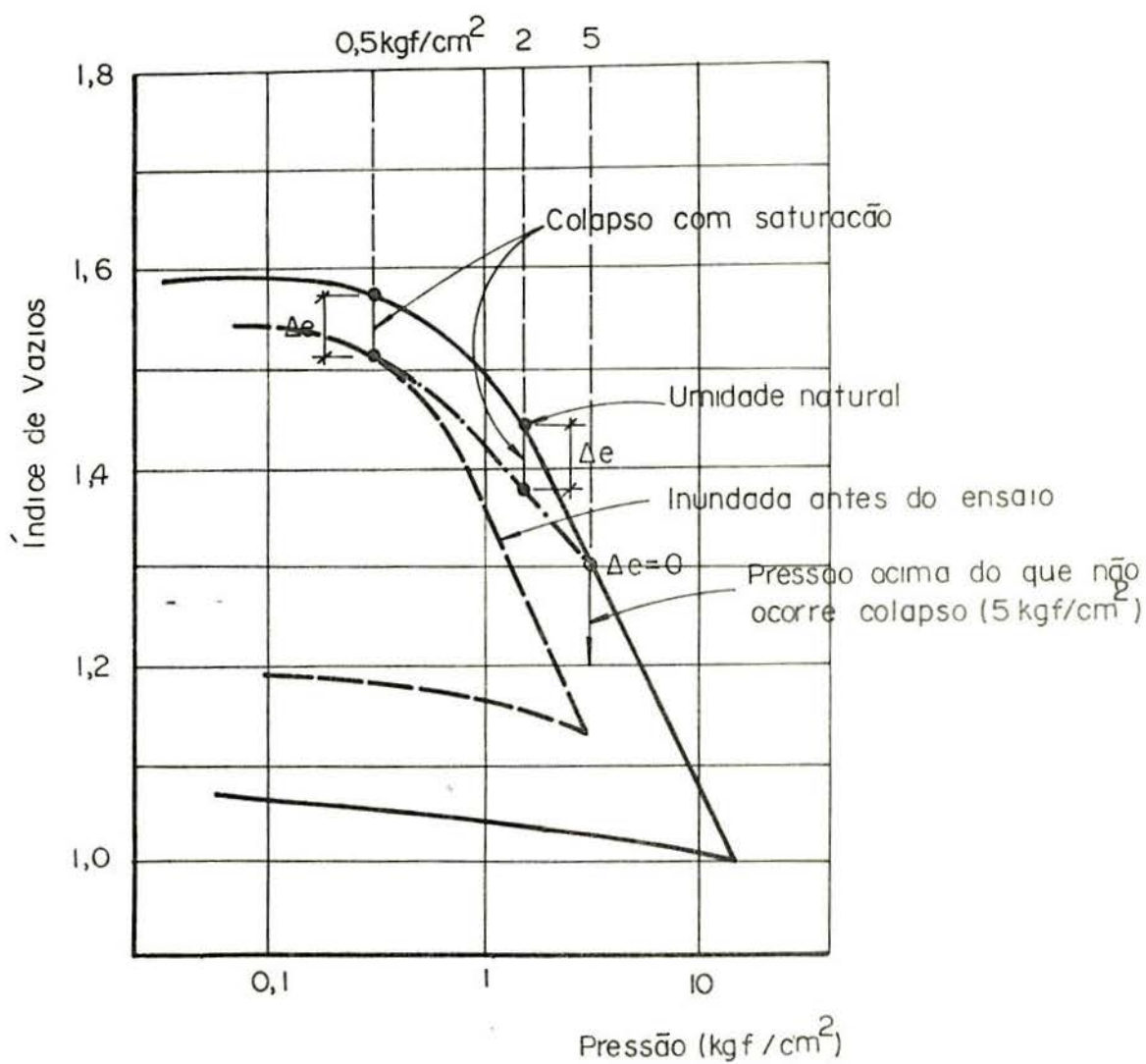


fig. 43 - GRÁFICO ÍNDICE DE VAZIO X PRESSÃO COM INDICAÇÃO DOS COLAPSO, SEGUNDO VARGAS

de inferiores a 45% e 25% respectivamente. Os solos de arenito se enquadram dentro dos solos colapsíveis quando comparados com os valores acima mencionados.

Clemence e colaboradores (22) definem o potencial de colapso (CP) pela expressão

$$CP = \frac{\Delta e}{1 + e_0}, \text{ onde: } \Delta e = \text{variação de índice de va}$$

zios após a saturação; e_0 = índice de vazios antes da saturação. Vargas, por sua vez, adota a mesma expressão indicando-a pela letra i . Para ele, os solos são colapsíveis quando o valor de i é superior a 0,02. Os nossos dados apontaram valores superiores.

Clemence e colaboradores (22) relacionam os valores de potencial de colapso com o grau de gravidade do problema. (Quadro VIII). Nossos resultados se encontrariam na faixa de gravidade moderada.

QUADRO VIII

RELAÇÃO ENTRE CP E GRAU DE GRAVIDADE DO PROBLEMA SEGUNDO CLEMENCE E COLABORADORES

CP (%)	GRAU DE GRAVIDADE DO PROBLEMA
0 - 1	não há problema
1 - 5	moderado
5 - 10	grave
10 - 20	intenso
20	extremo

4.6.3 - Resistência ao cisalhamento

Os primeiros estudos de tensões efetivas foram realizados experimentalmente por Terzaghi em 1923 e 1932 (81) para solos saturados. O princípio estabelecido por ele se baseia em duas formas:

1º) Variação em volume e resistência ao cisalhamento de solos são devidas exclusivamente à variação de tensões efetivas.

2º) A tensão efetiva (σ') em um solo é definida como a diferença entre a tensão total aplicada (σ) e poro-pressão (u).

A validade deste princípio se aplica unicamente para solos saturados, não valendo para os parcialmente saturados.

O comportamento de solo parcialmente saturado difere consideravelmente do de solo saturado, porque o poro é, em geral, constituído de água e ar, e sua presença produz pressão intergranular que varia apreciavelmente com a variação de água (39).

Os estudos relacionados com solos parcialmente saturados têm sido uma preocupação de pesquisadores como Bishop e colaboradores (17), Jennings (39), Aitchison e Donald (9) e Aitchison (8).

O primeiro trabalho efetivo sobre esse tema foi proposto por Bishop (81), baseado na equação de Terzaghi, apresentada abaixo:

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w)$$

onde u_a = poro pressão do ar

u_w = poro pressão de água

O valor do parâmetro χ é unitário para solos saturados e zero para solos secos. Valores intermediários são fun-

ção do grau de saturação e podem ser também influenciadas pela estrutura de secagem e umedecimento ou pela variação de tensão.

Em nossos estudos, os solos se apresentam todos no estado não saturado. A saturação completa nestes tipos de solos não ocorre mesmo quando são inundados. Em geral apresentam um grau de saturação abaixo de 90%.

A resistência ao cisalhamento do solo parcialmente saturado está relacionada com a tensão normal efetiva, intercepto da coesão efetiva e ângulo de atrito efetivo. A equação de Coulomb que expressa a resistência de solos coesivos, pode ser dividida em duas partes. A primeira se refere a fatores físicos relacionados com a resistência de atrito, e a segunda, a fatores físico-químico dados pela coesão.

As tabelas XV e XXVI apresentam os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados com amostras indeformadas, inundadas e sem inundação.

As figuras 44 e 45 mostram as curvas de tensão-deformação e as envoltórias de resistência para as amostras de solos de basaltos, riolitos e arenito da Formação Tupanciretã, indeformadas e ensaiadas no aparelho de cisalhamento direto sem inundação e com inundação.

Pode-se observar que houve um decréscimo de intercepto de coesão em termos de tensões totais das amostras ensaiadas com inundação. Os solos de arenito da Formação Tupanciretã apresentam uma coesão reduzida pela metade nas amostras inundadas, o que não ocorre com solos de riolito e basalto, que apresentam apenas um decréscimo. Este decréscimo do intercepto da coesão com o aumento da umidade pode ser influenciado por três fatores: a) a redução de tensões capilares com o aumento do grau de saturação (82); b) a tendência à maior orientação das partículas que, com o aumento da umidade, passam de uma estrutura floclada para uma estrutura dispersa, diminuindo o contato entre as partículas; c) a ação da água destruindo possíveis ligações entre as partículas.

Sowers (83) sugere que a coesão e suas variações com

TABELA XV

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE SOLEDADE (RIOLITO) NA UMIDADE NATURAL

ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	s (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	C(kg/cm ²)	ϕ
1	1,48	27,76	1,16	1,46	54,19	0,500	0,925	0,8	29°
2	1,60	29,66	1,23	1,34	63,08	1,00	1,043		
3	1,65	29,10	1,28	1,23	67,43	2,00	1,700		
4	1,49	28,47	1,16	1,46	55,56	3,00	2,208		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	s (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	C(kg/cm ²)	ϕ
5	1,71	28,76	1,32	1,16	70,66	0,500	0,907	0,8	22°
6	1,58	29,57	1,22	1,34	62,89	1,00	1,034		
7	1,62	30,04	1,25	1,29	66,37	2,00	1,512		
8	1,42	28,11	1,11	1,57	51,57	3,00	1,752		

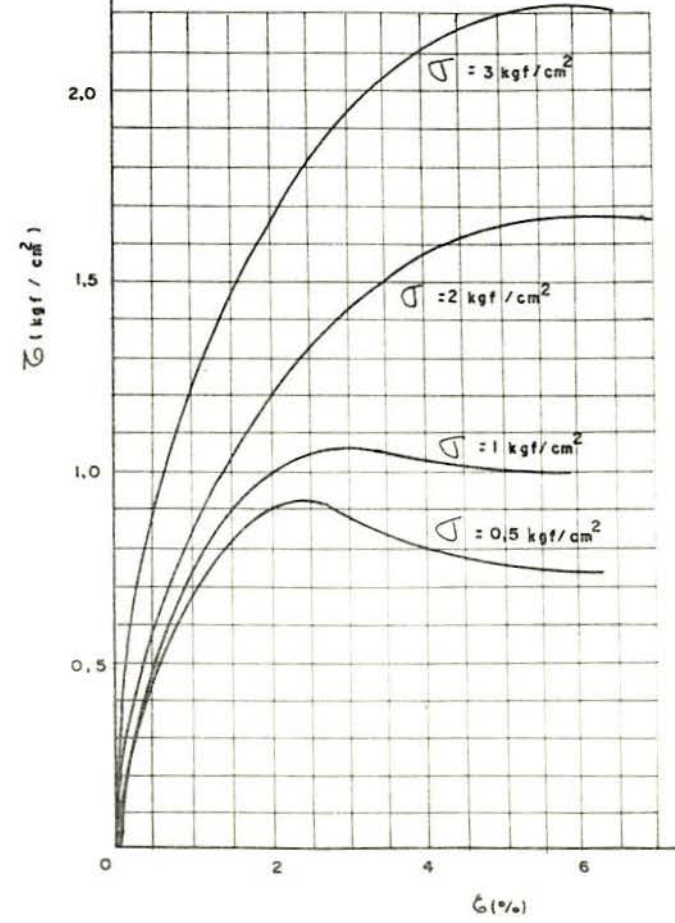
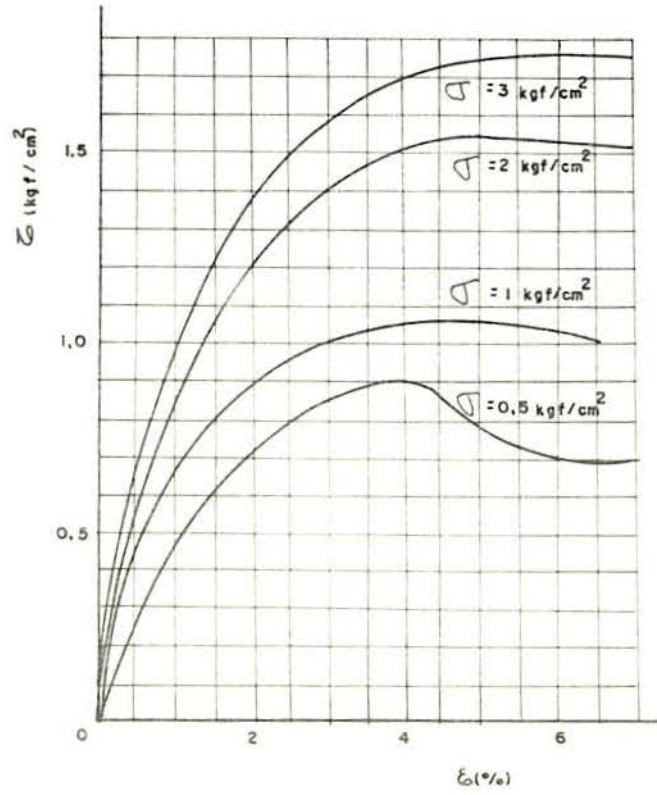
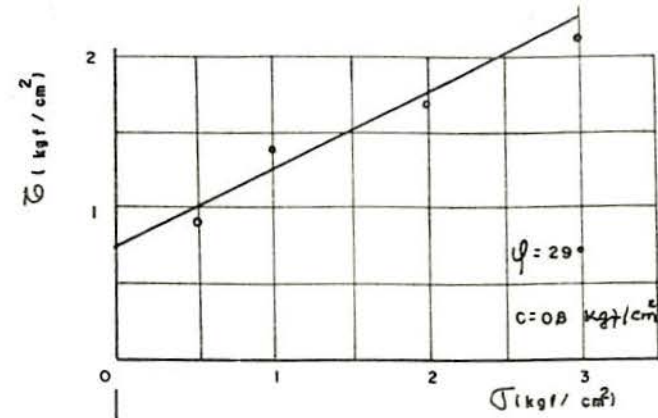
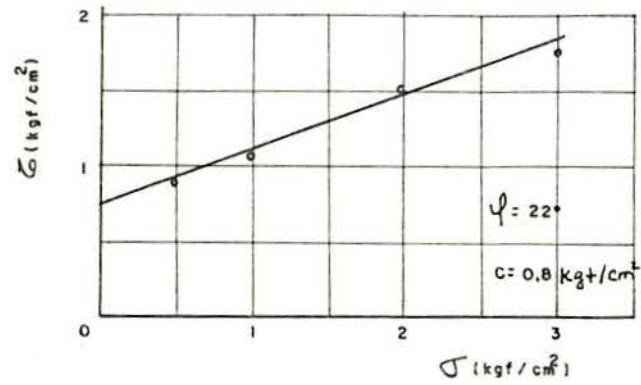


fig. 44 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE SOLEDADE (RIOLITO) NA UMIDADE NATURAL

TABELA XVI

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE SOLEDADE (RIOLITO) COM INUNDAÇÃO

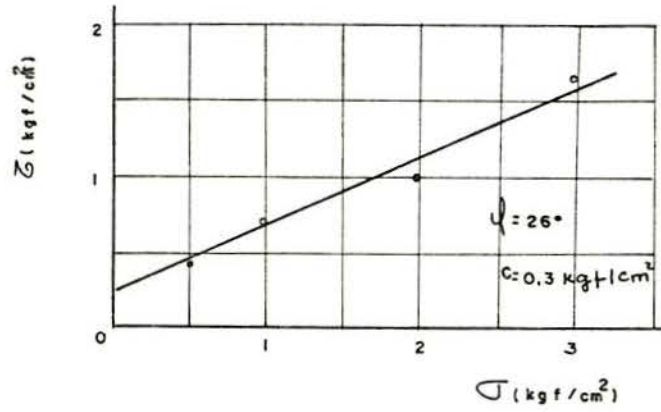
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
1	1,41	29,66	42,47	1,08	1,64	51,50	73,80	0,5	0,467	0,30	26°
2	1,60	28,84	41,20	1,24	1,30	63,25	90,32	1,0	0,700		
3	1,47	25,03	35,60	1,17	1,44	49,54	70,46	2,0	1,039		
4	1,66	29,50	35,91	1,28	1,23	68,35	83,21	3,0	1,673		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
5	1,60	28,04	39,16	1,25	1,28	62,43	87,19	0,5	0,451	0,40	22°
6	1,58	30,27	38,15	1,22	1,34	64,38	81,14	1,0	0,631		
7	1,62	28,85	39,28	1,26	1,26	65,25	88,85	2,0	1,298		
8	1,45	27,05	36,64	1,14	1,50	51,40	69,62	3,0	1,385		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

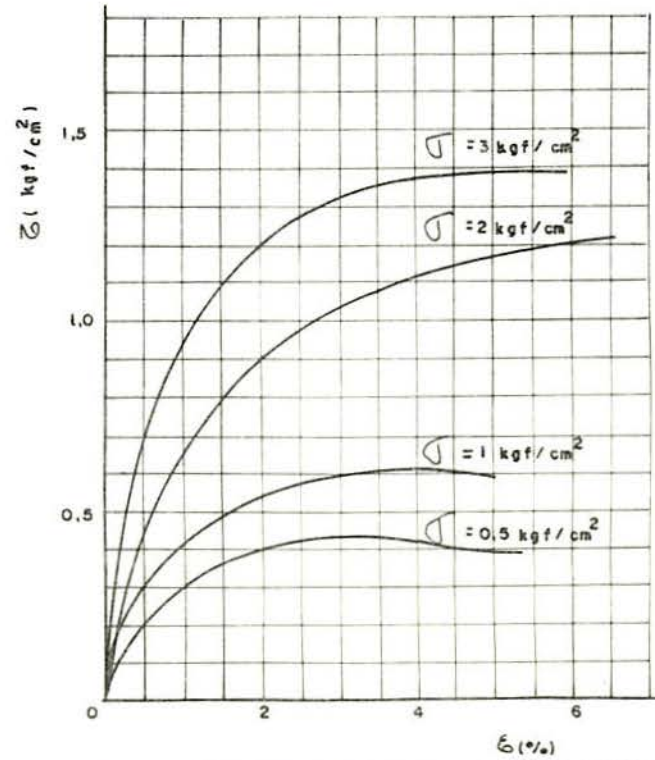
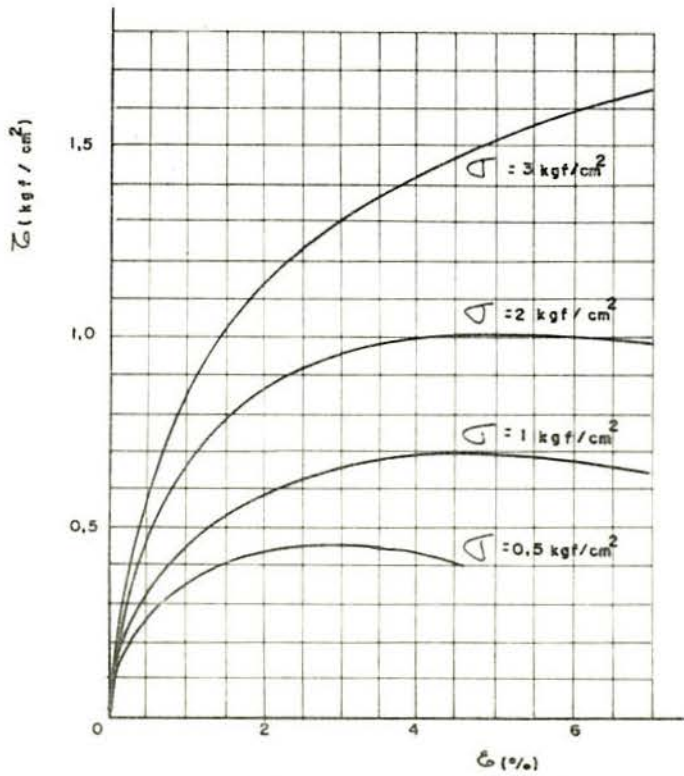
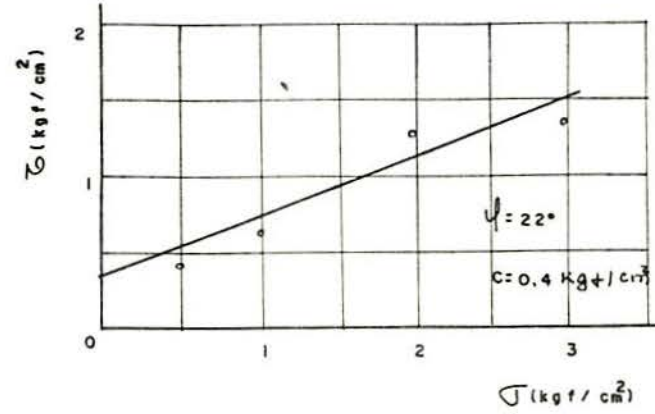


fig. 45 - RESISTENCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRA INDEFORMADOS DE SOLOS DE SOLEDADE (RIOLITO) COM INUNDAÇÃO

TABELA XVII

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLOCO
DE PASSO FUNDO (RIOLITO) NA UMIDADE NATURAL

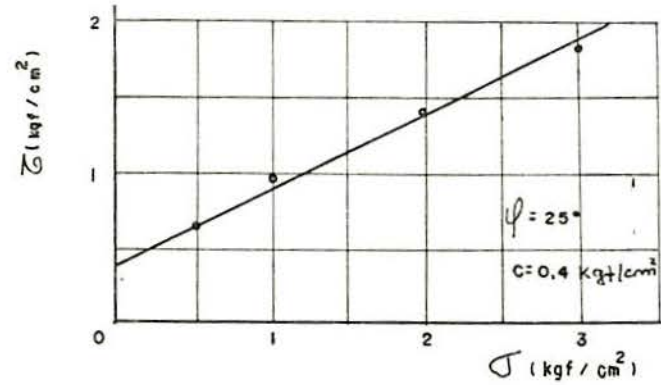
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
9	1,76	32,56	1,33	1,11	82,26	0,500	0,645	0,4	25°
10	1,73	35,13	1,28	1,19	82,86	1,00	0,943		
11	1,70	32,63	1,28	1,19	76,78	2,00	1,384		
12	1,72	34,16	1,28	1,19	80,38	3,00	1,796		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
13	1,70	35,51	1,26	1,22	81,43	0,500	0,563	0,4	28°
14	1,55	34,02	1,16	1,42	67,08	1,00	1,058		
15	1,68	32,76	1,27	1,21	75,81	2,00	1,443		
16	1,52	32,43	1,15	1,44	63,06	3,00	1,903		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

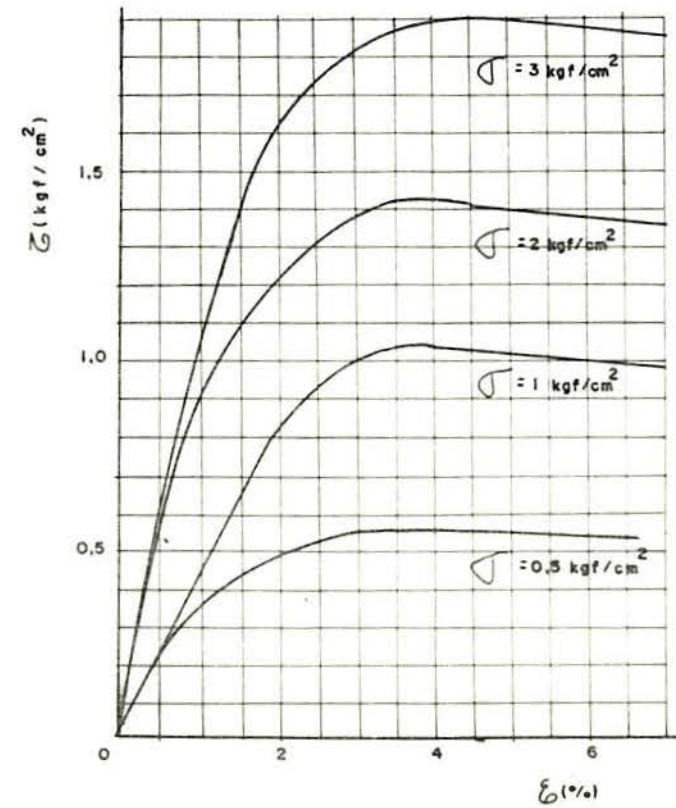
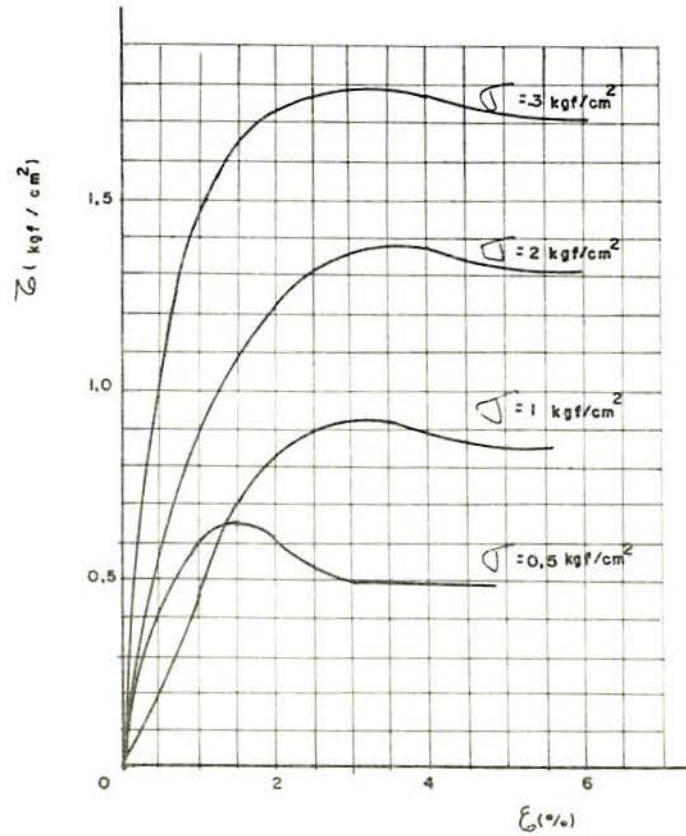
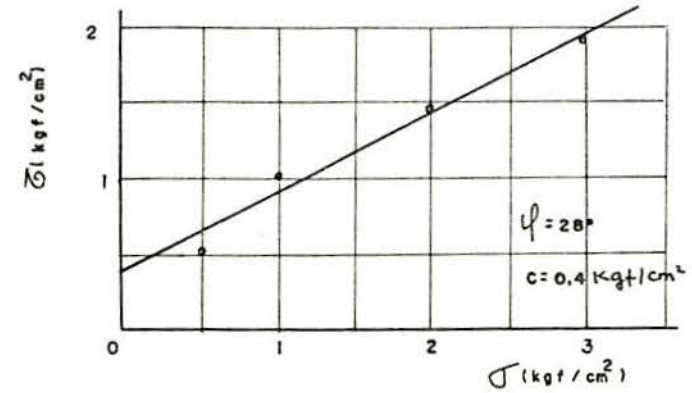


fig. 46 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE PASSO FUNDO (RIOLITOS) NA UMIDADE NATURAL

TABELA XVIII

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLOCO DE PASSO FUNDO (RIOLITO) COM INUNDAÇÃO

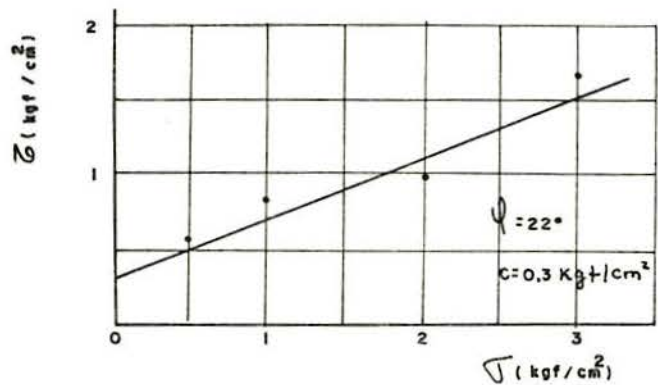
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
9	1,51	34,31	42,12	1,12	1,50	64,05	78,62	0,5	0,589	0,30	22°
10	1,76	34,16	40,20	1,31	1,14	83,90	93,74	1,0	0,845		
11	1,53	31,39	39,55	1,16	1,41	62,33	78,54	2,0	0,952		
12	1,56	32,43	41,20	1,18	1,37	66,28	64,20	3,0	1,636		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
13	1,65	32,17	39,56	1,25	1,24	72,64	89,33	0,5	0,504	0,30	27°
14	1,74	33,12	39,21	1,31	1,14	81,35	96,31	1,0	0,583		
15	1,69	34,35	37,36	1,26	1,22	78,84	85,74	2,0	1,269		
16	1,71	33,24	40,13	1,28	1,19	72,71	87,78	3,0	1,760		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

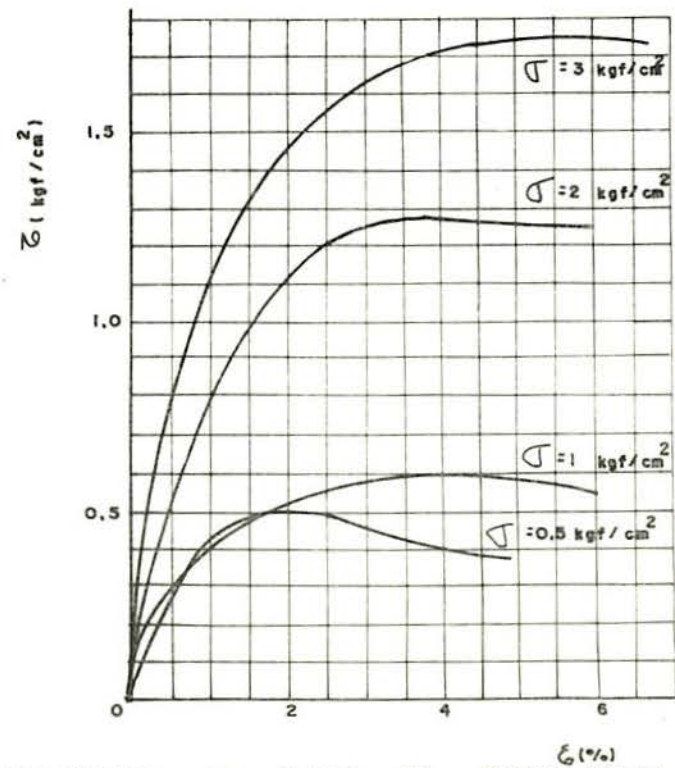
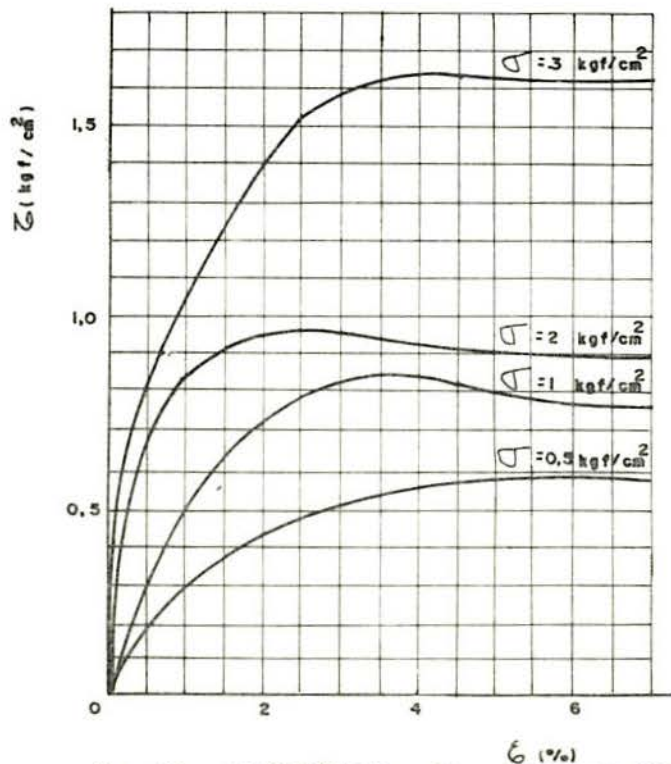
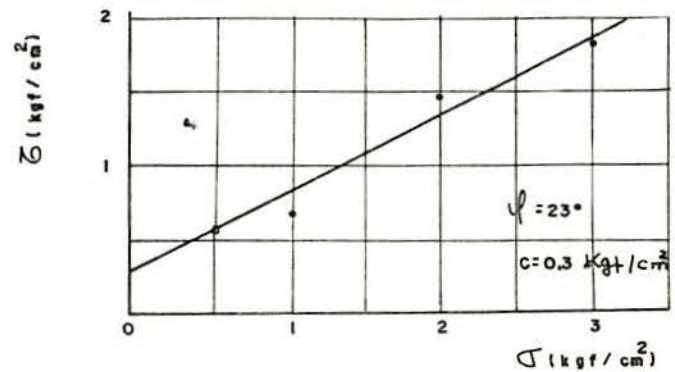


fig. 47 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE PASSO FUNDO (RIOLITO) COM INUNDAÇÃO

TABELA XIX

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLOCO
DE CARAZINHO (ARENITO) NA UMIDADE NATURAL

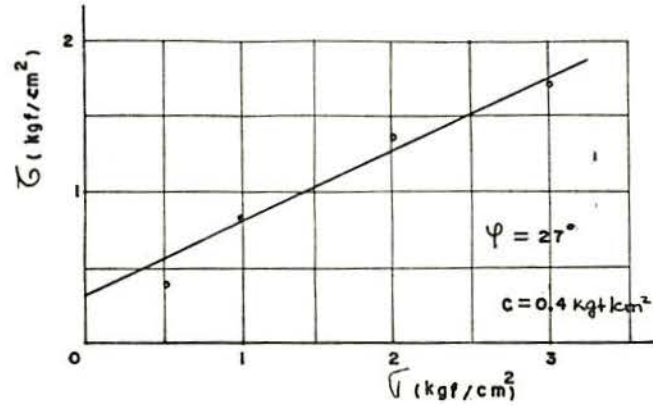
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C(kg/cm ²)	ϕ
17	1,49	20,77	1,23	1,22	46,48	0,500	0,604	0,4	29°
18	1,36	22,27	1,11	1,46	41,64	1,00	0,887		
19	1,44	21,54	1,18	1,31	44,89	2,00	1,280		
20	1,37	22,42	1,12	1,44	42,50	3,00	1,885		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C(kg/cm ²)	ϕ
21	1,27	21,90	1,04	1,63	36,68	0,50	0,346	0,4	27°
22	1,31	20,73	1,08	1,53	36,99	1,00	0,792		
23	1,46	20,75	1,21	1,26	44,96	2,00	1,137		
24	1,37	21,43	1,13	1,41	41,49	3,00	1,670		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

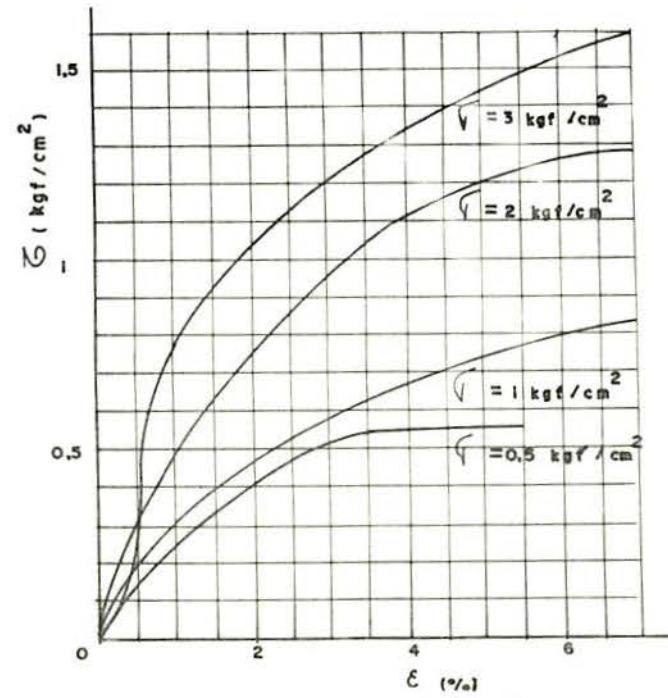
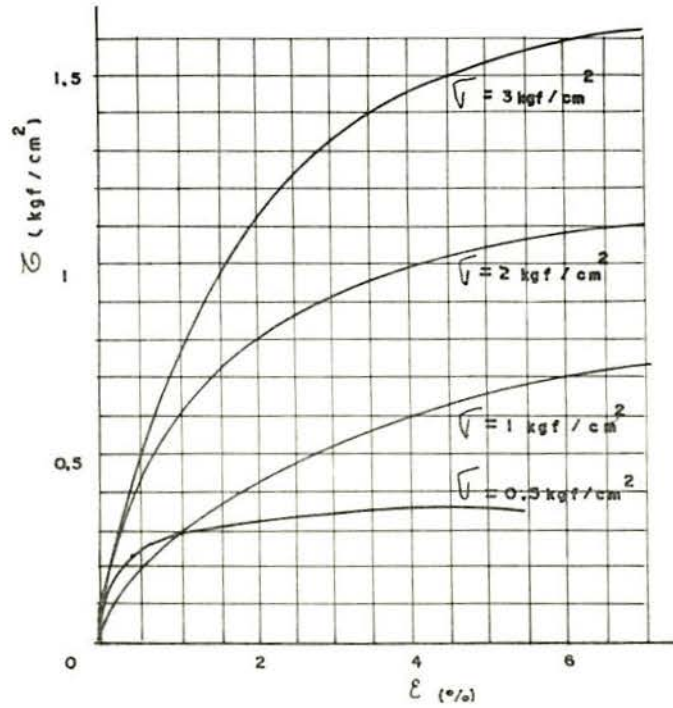
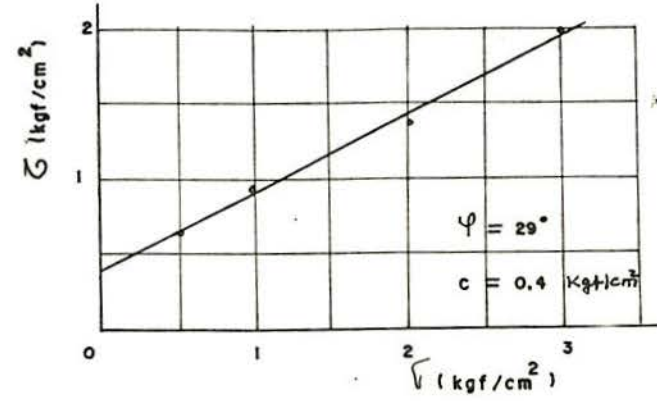


fig. 48

RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE CARAZINHO (ARENITO) NA UMIDADE NATURAL

TABELA XX

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE CARAZINHO (ARENITO) COM INUNDAÇÃO

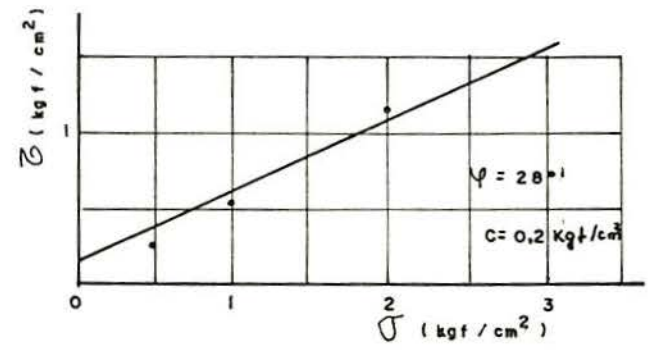
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	e _i	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
17	1,38	20,61	40,11	1,14	1,39	40,48	78,78	0,5	0,279		
18	1,34	21,09	30,05	1,11	1,46	39,44	56,19	1,0	0,523	0,20	28°
19	1,36	19,80	32,85	1,14	1,40	38,61	64,06	2,0	1,120		
20	1,62	20,20	27,81	1,35	1,02	54,06	74,43	3,0	1,502		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	e _i	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
21	1,51	20,84	39,98	1,25	1,18	48,22	90,18	0,5	0,346		
22	1,43	20,37	36,90	1,19	1,29	43,11	78,09	1,0	0,638	0,20	24°
23	1,53	22,01	34,50	1,26	1,17	51,36	80,50	2,0	0,946		
24	1,41	20,03	33,18	1,17	1,33	41,11	68,11	3,0	1,230		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

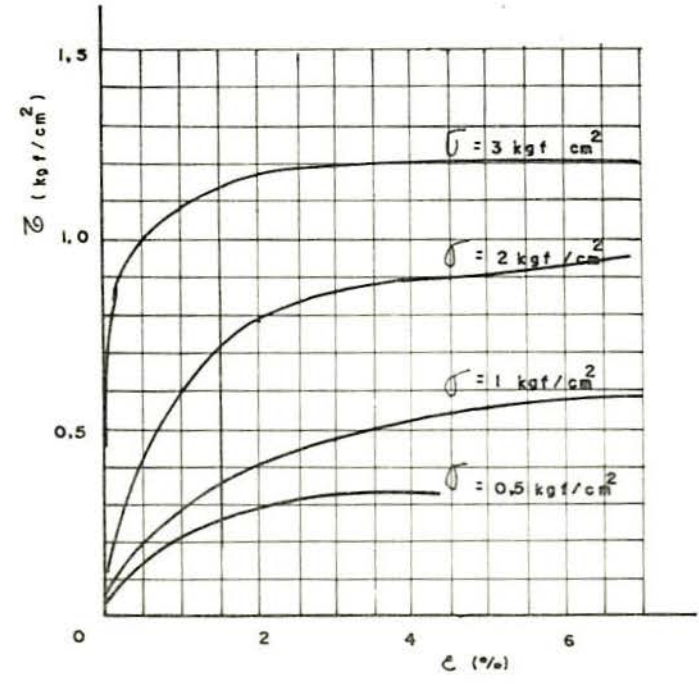
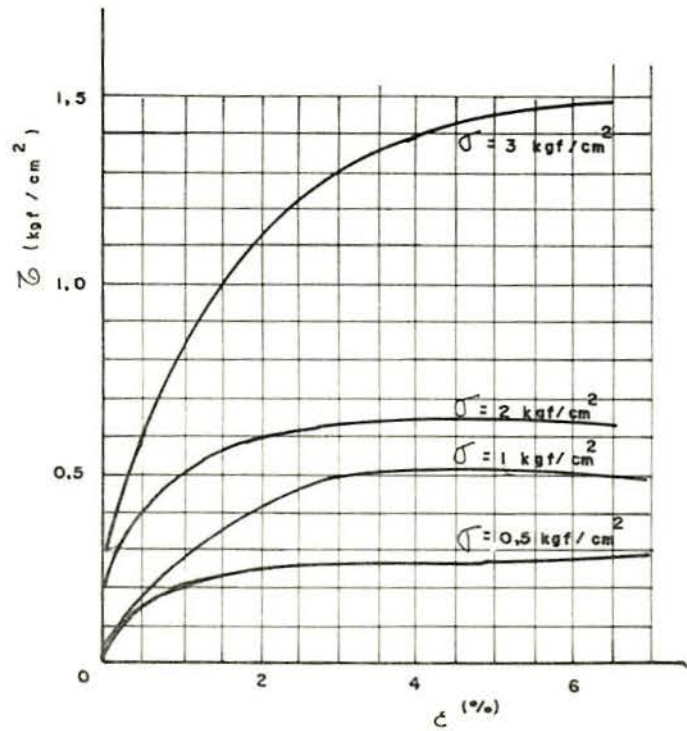
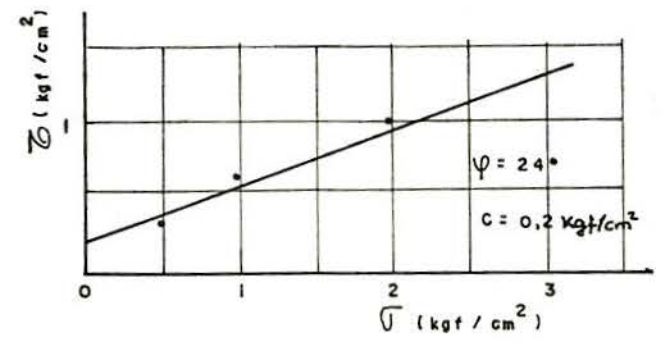


fig. 49 - RESISTENCIA AO CISLHAMENTO DE AMOSTRA INDEFORMADAS DE SOLOS DE CARAZINHO (ARENITO), COM INUNDAÇÃO

TABELA XXI

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLOCO DE TAPERÁ (ARENITO) NA UMIDADE NATURAL

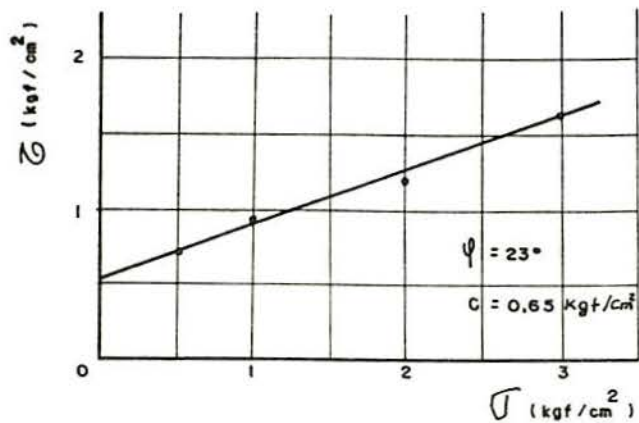
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	e_i	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
25	1,83	31,28	1,39	0,971	88,27	0,50	0,735	0,6	23°
26	1,76	29,90	1,35	1,03	79,54	1,00	0,956		
27	1,81	31,39	1,38	0,99	86,88	2,00	1,148		
28	1,87	30,90	1,43	0,92	92,03	3,00	1,623		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	e_i	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
29	1,69	32,79	1,27	1,16	77,45	0,50	0,794	0,65	23°
30	1,60	29,53	1,24	1,21	66,87	1,00	1,034		
31	1,67	30,84	1,28	1,14	74,12	2,00	1,321		
32	1,74	31,51	1,32	1,08	79,94	3,00	1,717		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

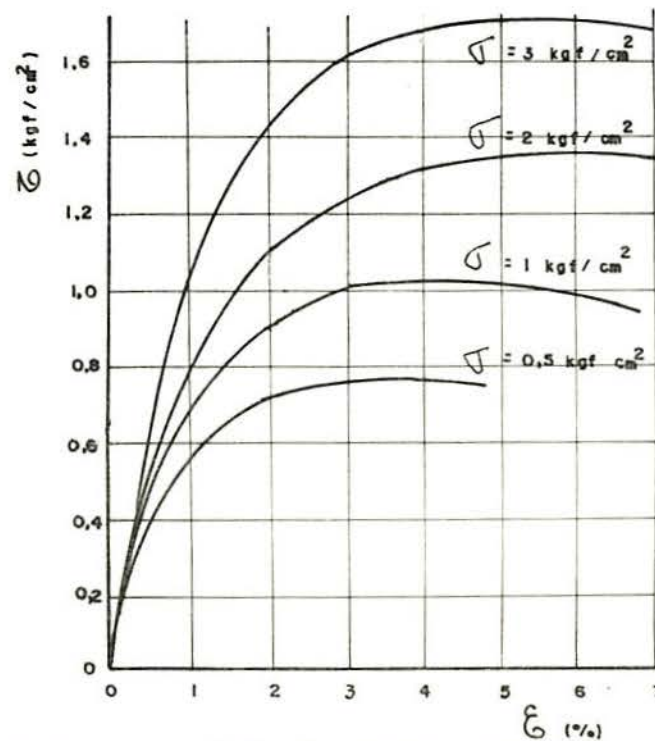
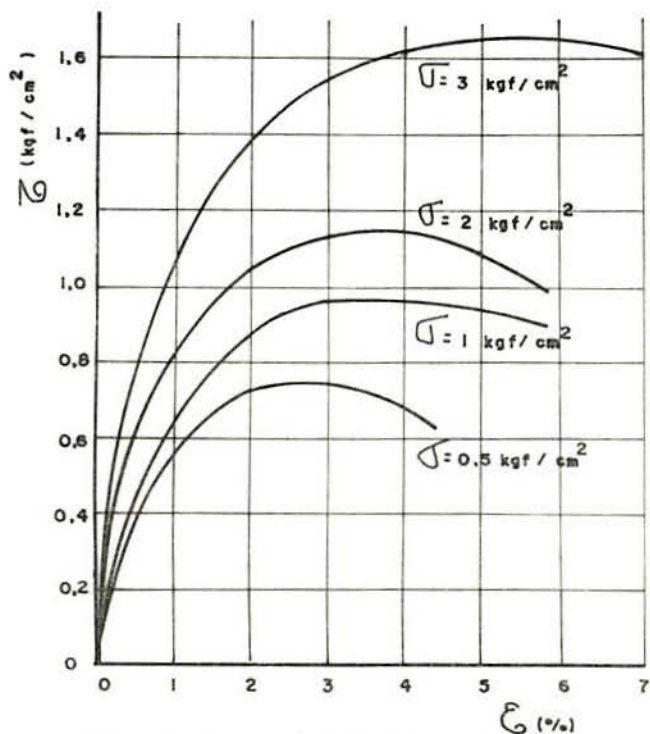
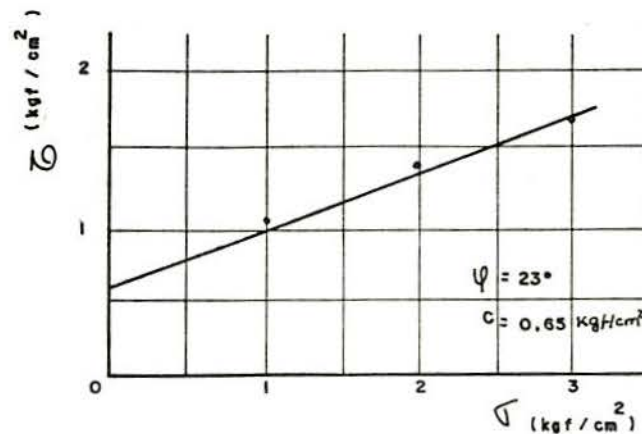


fig. 50 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA UNIDADE NATURAL

DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE TAPERA (ARENITO)

TABELA XXII

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE TAPERA (ARENITO) COM INUNDAÇÃO

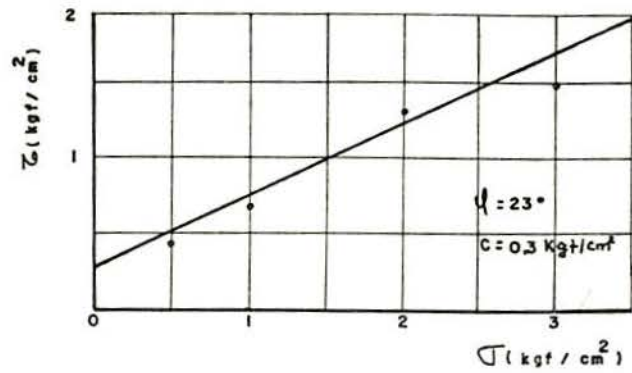
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx}}$ (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
25	1,56	29,59	40,54	1,20	1,28	63,34	86,78	0,5	0,521	0,30	23°
26	1,67	31,50	39,40	1,27	1,16	74,41	93,07	1,0	0,682		
27	1,57	27,84	35,32	1,23	1,23	62,02	78,68	2,0	1,218		
28	1,68	29,36	33,93	1,30	1,11	72,47	83,76	3,0	1,420		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	$\tau_{\text{máx}}$ (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
29	1,68	31,54	38,43	1,28	1,14	75,80	92,37	0,5	0,412	0,30	23°
30	1,67	31,69	38,66	1,27	1,16	74,85	91,32	1,0	0,608		
31	1,71	30,91	37,54	1,31	1,09	73,01	88,67	2,0	1,300		
32	1,65	29,71	36,27	1,27	1,16	70,18	85,67	3,0	1,440		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

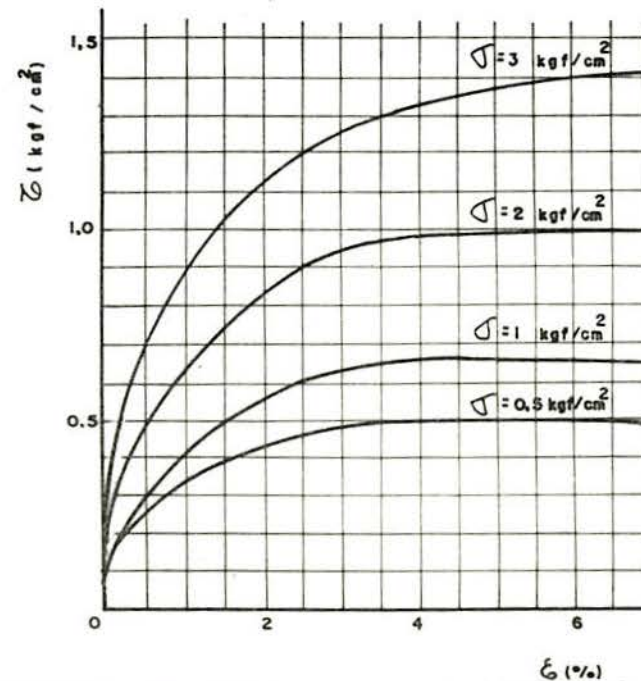
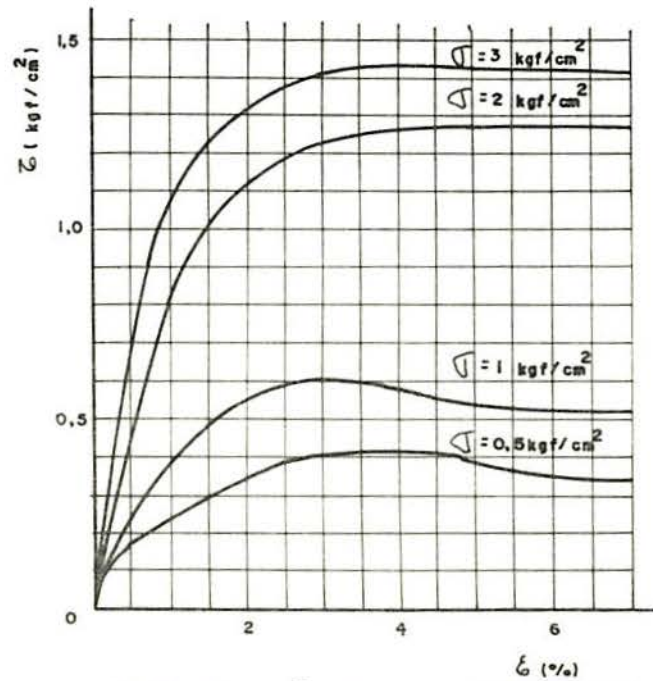
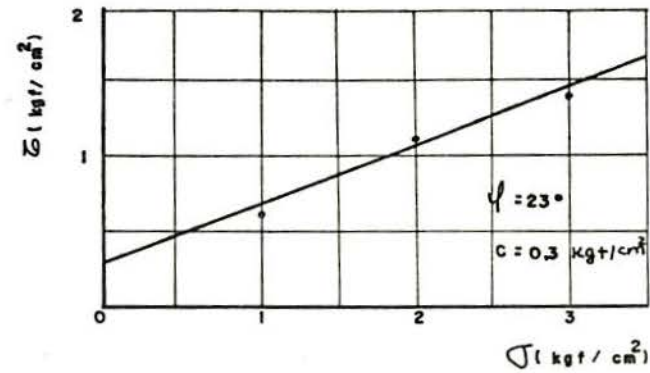


fig. 51- RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE TAPERA (ARENITO), COM INUNDAÇÃO

TABELA XXIII

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE MARAU (BASALTO) NA UMIDADE NATURAL

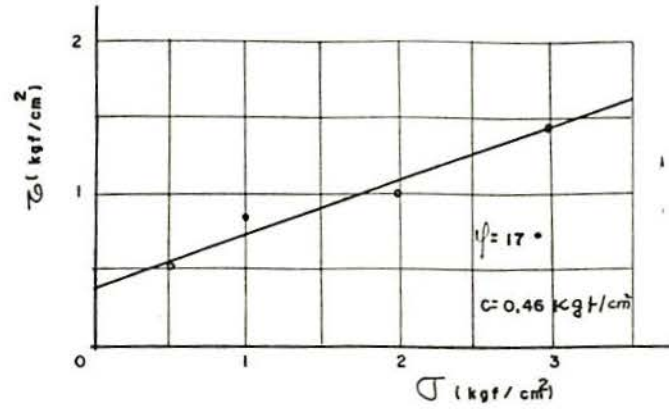
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
33	1,53	42,38	1,08	1,56	75,25	0,500	0,619	0,5	12°
34	1,54	42,11	1,08	1,56	74,77	1,00	0,800		
35	1,51	42,45	1,06	1,61	73,04	2,00	1,030		
36	1,55	42,93	1,08	1,56	76,23	3,00	1,156		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ^{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
37	1,49	41,17	1,06	1,61	70,83	0,500	0,594	0,46	17°
38	1,52	42,47	1,07	1,59	73,99	1,00	0,870		
39	1,51	43,10	1,06	1,61	74,15	2,00	0,908		
40	1,54	42,76	1,08	1,56	75,93	3,00	1,488		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

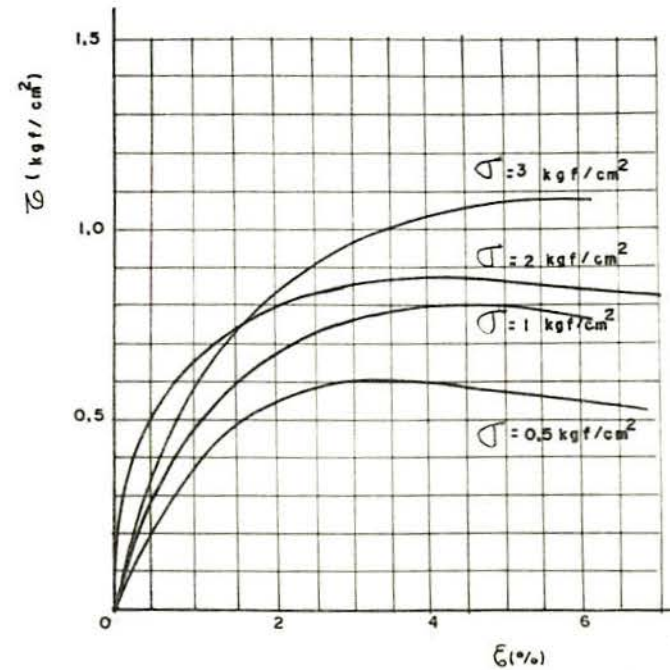
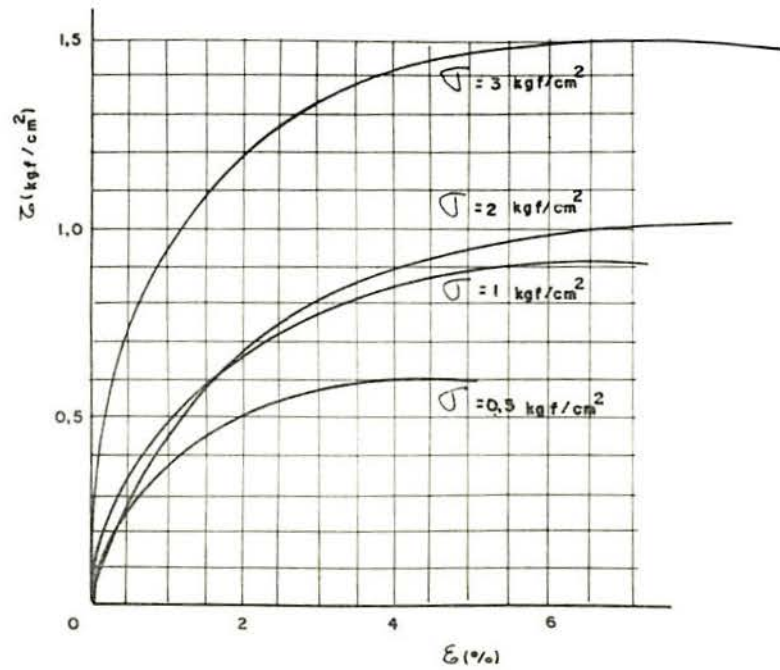
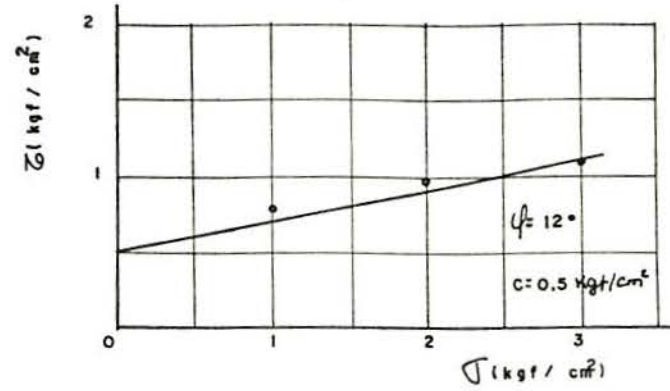


fig. 52 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLOS DE MARAU (BASALTO) NA UNIDADE NATURAL

TABELA XXIV

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE MARAU (BASALTO) COM INUNDAÇÃO

ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
33	1,48	41,93	52,30	1,04	1,66	69,97	87,27	0,5	0,432	0,25	26°
34	1,51	40,83	50,05	1,07	1,59	71,13	87,19	1,0	0,610		
35	1,47	42,92	52,16	1,03	1,69	70,35	85,49	2,0	1,210		
36	1,50	40,39	51,12	1,07	1,59	70,37	89,06	3,0	1,364		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
37	1,55	42,19	50,07	1,09	1,54	75,89	90,06	0,5	0,467	0,30	24°
38	1,51	41,88	49,54	1,06	1,61	72,05	85,23	1,0	0,700		
39	1,52	40,39	50,05	1,09	1,54	72,65	89,99	2,0	1,080		
40	1,49	42,69	49,41	1,05	1,64	72,10	83,45	3,0	1,474		

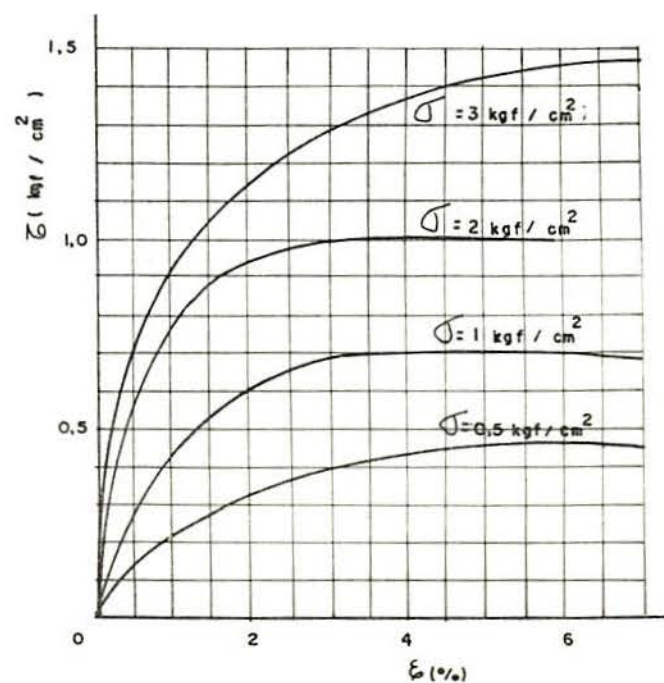
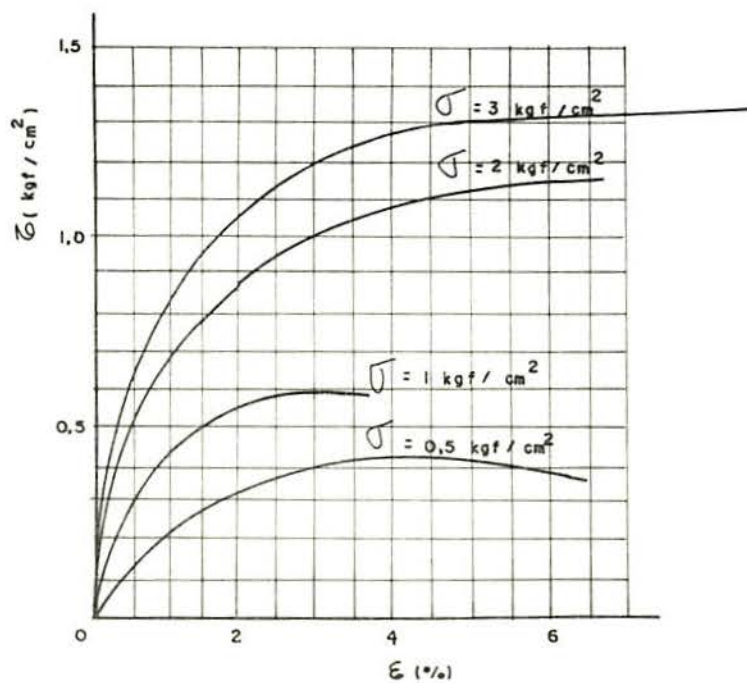
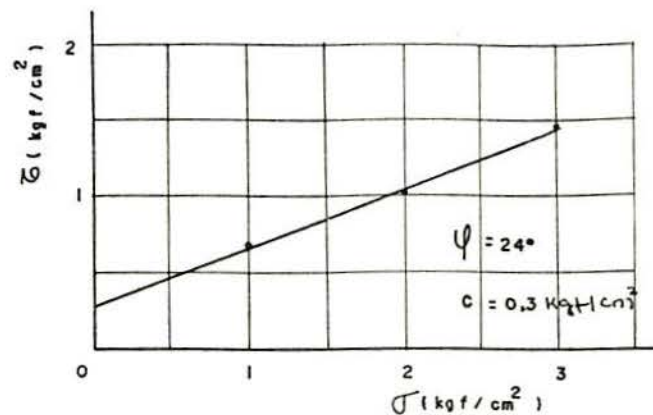
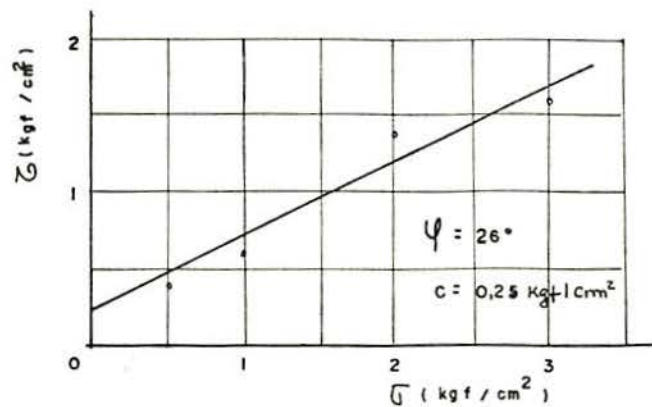


fig. 53 - RESISTENCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRA INDEFORMADAS DE SOLOS MARAU (BASALTO) COM INUNDAÇÃO

TABELA XXV

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLOCO
DE ANTA GORDA (BASALTO) NA UMIDADE NATURAL

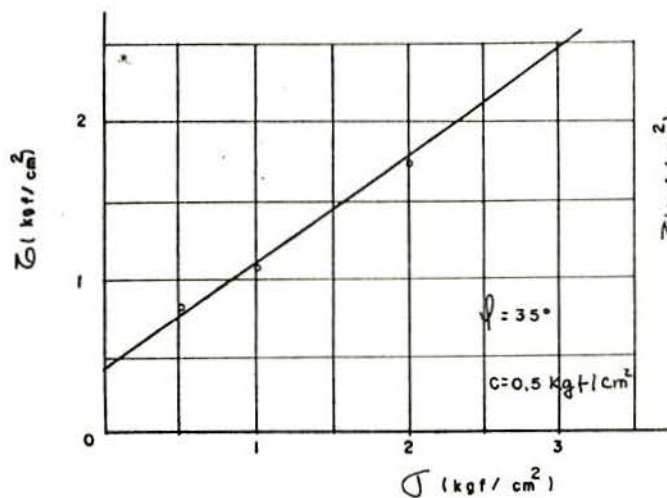
ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
41	1,64	36,28	1,20	1,26	78,03	0,500	0,738	0,5	32°
42	1,72	36,80	1,26	1,15	86,72	1,00	1,075		
43	1,67	36,67	1,22	1,22	81,46	2,00	1,509		
44	1,65	36,13	1,21	1,24	78,96	3,00	2,331		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	h (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	S (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
45	1,69	36,25	1,24	1,19	82,55	0,500	0,803	0,5	35°
46	1,68	38,95	1,21	1,24	85,12	1,00	1,093		
47	1,64	35,15	1,21	1,24	76,82	2,00	1,750		
48	1,67	34,18	1,24	1,19	74,70	3,00	2,537		

ENSAIO 1



ENSAIO 2

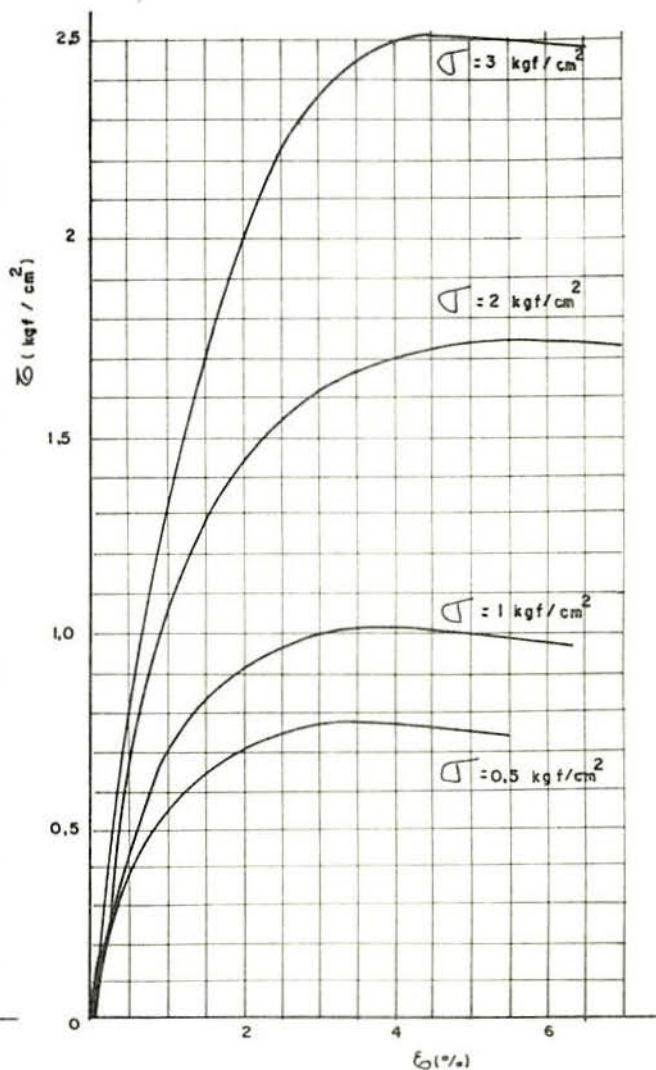
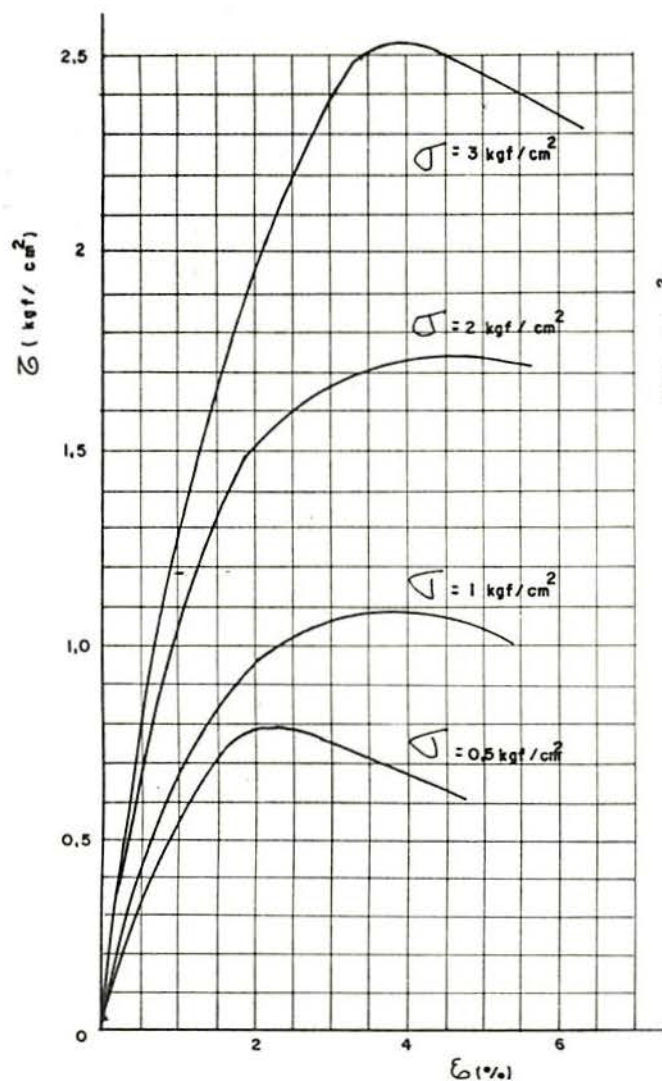
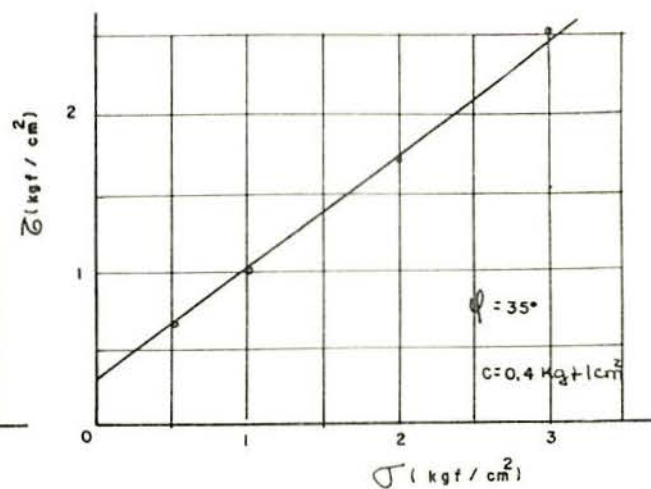


fig.- 54 - RESISTENCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRA INDEFORMADAS DE SOLOS DE ANTA GORDA (BASALTO) NA UNIDADE NATURAL

TABELA XXVI

RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DO BLO
CO DE ANTA GORDA (BASALTO) COM INUNDAÇÃO

ENSAIO 1

AMOSTRA	γ (g/cm ²)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
41	1,63	34,37	41,09	1,21	1,24	75,12	89,80	0,5	0,579	0,40	33°
42	1,71	35,25	40,50	1,26	1,15	83,07	95,44	1,0	0,769		
43	1,73	33,90	40,24	1,29	1,10	83,52	99,09	2,0	1,631		
44	1,75	35,12	39,26	1,30	1,09	87,32	97,61	3,0	1,850		

ENSAIO 2

AMOSTRA	γ (g/cm ³)	hi (%)	hf (%)	γ_s (g/cm ³)	ei	Si (%)	Sf (%)	σ (kg/cm ²)	τ_{\max} (kg/cm ²)	C (kg/cm ²)	ϕ
45	1,76	32,60	37,55	1,33	1,04	84,95	97,85	0,5	0,642	0,45	34°
46	1,77	35,71	36,65	1,30	1,09	88,78	91,12	1,0	1,140		
47	1,75	35,29	40,16	1,29	1,10	86,94	98,94	2,0	1,752		
48	1,76	31,86	37,01	1,34	1,02	84,66	98,33	3,0	2,395		

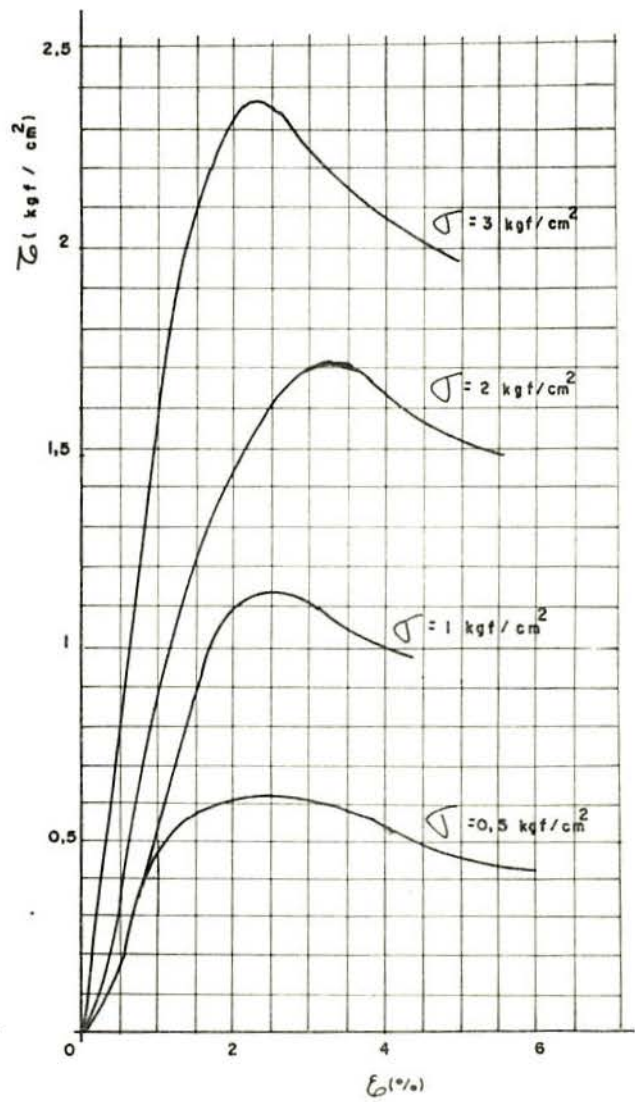
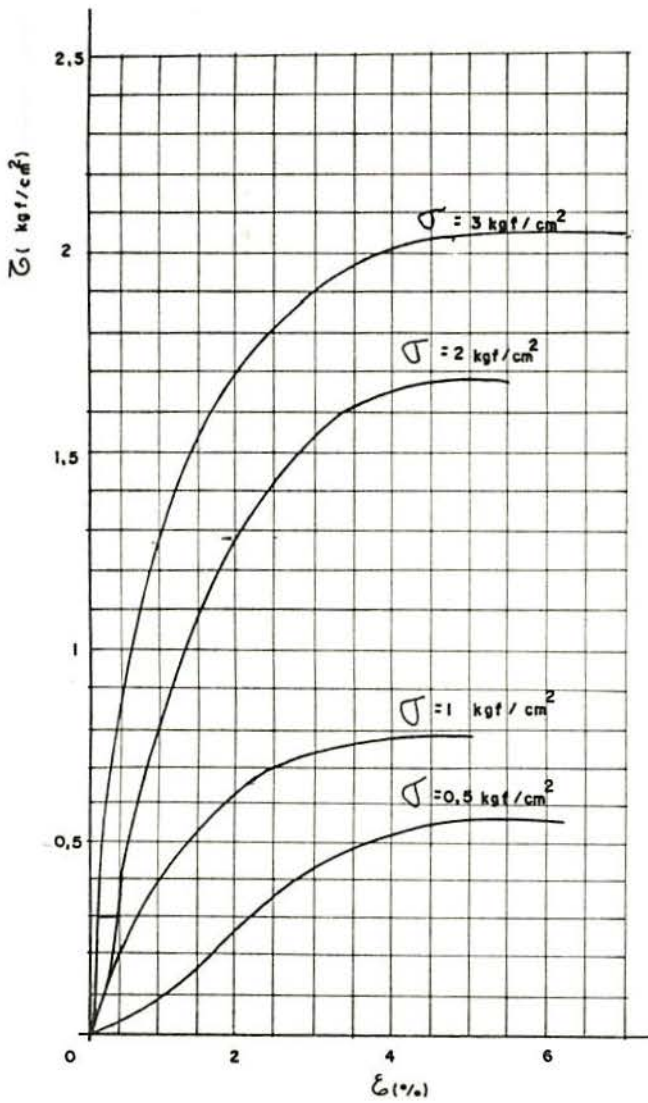
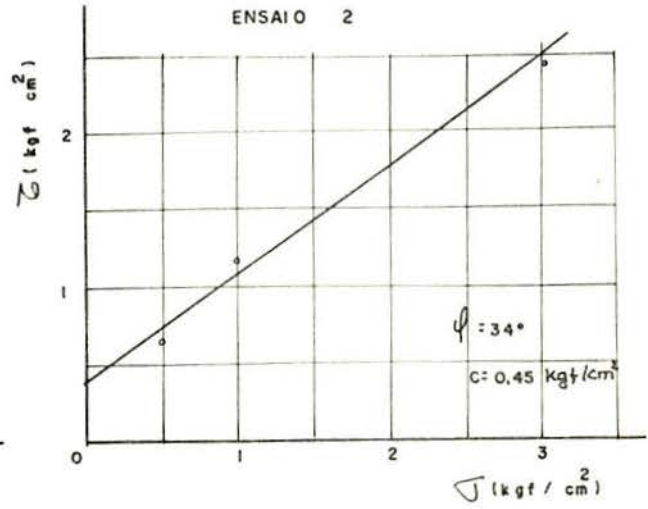
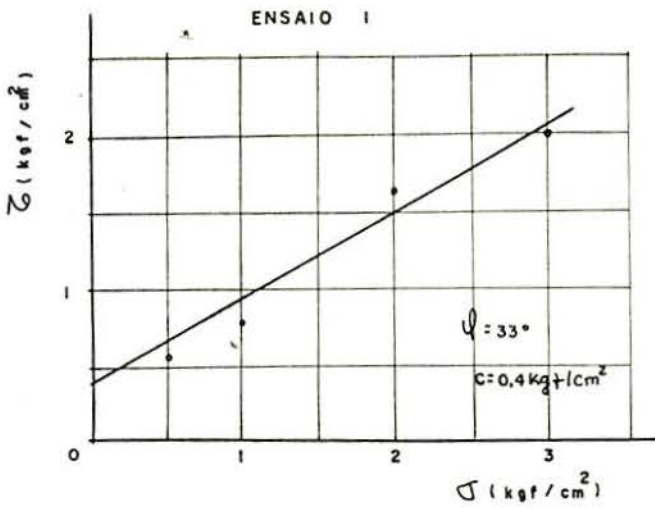


fig. 55 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE AMOSTRA INDEFORMADAS DE SOLOS DE ANTA GORDA (BASALTO) COM INUNDAÇÃO

o grau de saturação dos solos residuais seriam explicadas pela configuração estrutural desses solos, desde que ela seja uma função das ligações porventura existentes entre minerais.

A variabilidade do grau de saturação e da coesão destes solos é explicada por Vargas (89). Afirma ele que os solos residuais que ocorrem no Brasil são, em geral, constituídos por um esqueleto de grãos grossos em cujos interstícios há uma massa ligante de argila que será, em sua maior parte, proveniente dos processos de decomposição química. Essa massa argilosa pode funcionar como um ligante, quando o solo é seco, ou como um lubrificante, quando se satura d'água. No estado não saturado, a estrutura desses solos apresenta grande coesão pelo fato de a parte argilosa atuar como cimento. Por outro lado, o aumento de umidade proporciona na matriz argilosa a perda da ação cimentadora, resultando uma diminuição da coesão. Os valores da coesão obtidos por ele, no ensaio triaxial, apresentam-se aleatórios, variando de zero a 3 kg/cm^2 .

Ambos os casos, supondo-se eliminado o efeito da capilaridade, explicam a queda de coesão com a saturação como sendo uma decorrência da quebra de ligações provocada nos esqueletos pela ação da água. A simples presença deste agente poderia neutralizar a ação dos ligantes, no caso proposto por Vargas, ou poderia enfraquecer estas ligações, no caso proposto por Sowers.

Lumb (48 , 49) notou que a coesão nos solos residuais de granito que estudou cai para zero quando as amostras se tornam aproximadamente saturadas. Entretanto, Vargas (90) observa que nem sempre se verifica uma coesão nula nos solos residuais em ensaios drenados de cisalhamento direto.

Os diferentes decréscimos na coesão com a inundação das amostras dos três tipos de solos apresentados neste trabalho poderiam ser explicados como sendo uma função das porcentagens dos minerais que entram na sua composição mineralógica.

A variação do índice de vazios em uma amostra do mesmo bloco é verificada nas tabelas XV a XXVI, com diferen

ças maiores que 0,1. Segundo Sowers (84), é o índice mais significativo entre os existentes para o estudo de solos residuais, sendo seu valor muito variável tanto vertical como horizontalmente. Os valores elevados de índice de vazios demonstraram tratar-se de solos com estruturas porosas. A estrutura porosa pode ser explicada pela disposição de grãos grossos, provocada pela lixiviação da matriz coloidal dos solos residuais e sua precipitação nas camadas inferiores, apresentando a estrutura com macrovazios, formados pelos grãos grossos cimentados entre si pela argila remanescente da lixiviação e também pela formação de um esqueleto ferruginoso, constante e característico de solos lateríticos. Os valores elevados de "e" foram constatados por Lumb(49) nos seus estudos de solos residuais e rochas ígneas (riolito e granito), apresentando elevado grau de porosidade, superior a 50%. Explica ele que este aumento é dado pela decomposição de feldspato que decorre do sistema de diaclases e juntas, o que condiciona uma maior facilidade de penetração de água, provocando a lixiviação da matriz coloidal.

O ângulo de atrito, em alguns casos, apresentou um ligeiro acréscimo com o grau de saturação. Este acréscimo em amostras inundadas pode ser influenciado pela presença de quartzo. Sowers (84) explica que, com o aumento da umidade, o quartzo age como antilubrificante destruindo as impurezas lubrificantes. Para os nossos solos, os ângulos de atrito drenados apresentaram um valor mínimo de 12° e máximo de 35° em amostras não inundadas e de 22° a 34° com inundação.

As curvas tensão cisalhante (τ) deslocamento horizontal (ΔH) apresentaram-se dispersas para um mesmo bloco em alguns casos. Muitos trabalhos têm assinalado o valor limitado das curvas tensão cisalhante - deslocamento horizontal, devido à concentração de tensões nas extremidades da caixa, ocasionando condições desuniformes de deformação cisalhante ao longo da superfície de ruptura.

Souza Pinto (82) comenta que a maneira pela qual os

esforços cisalhantes são aplicados pode provocar uma heterogeneidade de tensão ao longo do plano de cisalhamento, o que torna o efeito de ruptura progressivo no ensaio do cisalhamento direto.

Não foi possível realizar ensaios triaxiais devido ao colapso que ocorria durante a moldagem dos corpos de provas pela presença de macrovazios existentes.

Segundo Mello (52), pelo fato de se apresentarem com características semelhantes às das curvas obtidas nos ensaios triaxiais, estes ensaios são úteis como indicação do comportamento.

5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Para uma melhor avaliação dos resultados, foram realizados dois tipos de análise estatística, abrangendo cada uma delas determinados ensaios, com a utilização de programas computacionais diferentes. Para os ensaios de caracterização, compactação e ISC, foi aplicado o programa COMP-VAR (61), e para a resistência, adotou-se o REG-SIMPLES (61).

O primeiro fornece os seguintes resultados:

- a) valores ordenados de X para cada grupo;
- b) médias e desvios padrão para cada grupo;
- c) resíduos;
- d) resultados da prova de Bartlett;
- e) tabela ANOVA com os valores: soma dos quadrados dos desvios padrão, grau de liberdade, médias quadradas e o valor de F;
- f) análise dos valores espúrios pelo método de Dixon.

Pelo outro programa, são os seguintes valores determinados:

- a) A = interseção;
- b) B = inclinação;
- c) S_e = desvio padrão da estimativa;
- d) S_B = desvio padrão da inclinação;
- e) S_A = desvio padrão da interseção;
- f) T_B = índice de T para a prova de significância de B ($T_B = B/S_B$);
- g) T_A = índice de T para prova de significância de A ($T_A = \frac{A}{S_A}$);
- h) r = coeficiente de correlação;
- i) r_i = limite inferior do intervalo de confiança de ρ (coeficiente de correlação da população);

- j) r_s = limite superior do intervalo de confiança de ρ
- k) R = resíduos padronizados: predição dos valores de y por intervalos de confiança.

Para os ensaios de caracterização, compactação e ISC, determinaram-se os seguintes parâmetros estatísticos: média (\bar{X}), desvio padrão (s) e coeficiente de variação (CV). Além de examinar estes parâmetros em cada tipo de solo, estudou-se a variabilidade de solos com diferentes origens mas com a mesma evolução pedogenética.

A segunda análise foi dirigida aos ensaios de resistência, (ângulo de atrito e coesão), que podem variar aleatoriamente de uma amostra para outra.

5.1 - Método de Análise Aplicado aos Resultados dos Ensaios de Caracterização, Compactação e ISC

Os resultados obtidos na análise podem ser, de forma geral, assim apresentados

TIPO DE SOLO			
BASALTO	RIOLITO	ARENITO	
X_{11}	X_{12}	X_{13}	
X_{21}	X_{22}	X_{23}	
'	'	'	
'	'	'	
$X_{n_1 1}$	$X_{n_2 2}$	$X_{n_3 3}$	
n_1	n_2	n_3	N
\bar{X}_1	\bar{X}_2	\bar{X}_3	\bar{X}
s_1	s_2	s_3	S

onde:

X_{ij} = a medição i no grupo j , de um parâmetro determinado,
 n_j = o número de observações em um tipo de solo j ,
 \bar{X}_j e S_j = as médias e os desvios padrão das medições,
 $N = \sum n_j$ = o número total de medições e
 N, \bar{X} e S = número, desvio e a média de todas as medições respectivamente.

o modelo estatístico pode escrever-se na forma:

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \epsilon_{ij}$$

onde:

μ = uma constante que indica um efeito de tipo geral sobre X_{ij} (medido por \bar{X}),

α_j ($j = 1, 2, 3$) = constantes que indicam o efeito do grupo j sobre X_{ij} (medido por $\bar{X}_j - \bar{X}$) e

ϵ_{ij} = uma variável aleatória que indica o erro nas determinações. Supõe-se que $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$, isto é, ϵ_{ij} tende a uma média igual a zero e um desvio. Além disso, supõe-se que σ é constante, isto é, não depende do grupo (tipo de solo) analisado.

5.1.1 - Comparação dos desvios padrão

Para comparar os desvios padrão s_1, s_2 e s_3 usa-se a prova de Bartlett (61). Para aplicar essa prova, calcula-se um valor de B , no qual estão baseados os valores n_j e s_j^2 e compara-se B com o valor da variável Qui quadrado (χ_α^2) baseada nos graus de liberdade (número de variância menos um) e a um nível de significância. Se $B > \chi_\alpha^2$ despreza-se a hipótese de igualdade das variâncias.

5.1.2 - Comparações das médias

Para comparar as médias, usa-se a técnica de análises de variâncias (ANOVA) (61). Para este caso, o método consiste essencialmente na relação entre as médias quadradas do que resulta um valor F dado por:

$$F = \frac{\text{média quadrada entre grupos}}{\text{média quadrada dentro dos grupos}} = \frac{\text{MSE}}{\text{MSD}}$$

Este valor calculado de F é comparado com F_{α} (K-1, N-K) dado pela tabela de distribuição de F, onde α é o grau de significância ($\alpha = 0,05$), K é o número de grupos e N é o número total de observações. Se $F > F_{\alpha}$, conclui-se que as médias \bar{X}_j diferem significativamente.

Se as médias diferem significativamente, pode-se fazer um estudo posterior para determinar que média difere das demais. Para isso utiliza-se o método de "Comparação Múltipla das Médias" de Duncan (61), que consiste no seguinte:

1) Escrevem-se as médias em ordem crescente. No caso de três médias, tem-se $\bar{X}_{(1)}$, $\bar{X}_{(2)}$ e $\bar{X}_{(3)}$ onde $\bar{X}_{(1)}$ é a menor e $\bar{X}_{(3)}$ é maior.

2) Calcula-se o desvio padrão dessas médias $S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{N}}$

onde S = médias quadradas dentro dos grupos e N é o número de observações por grupo. Se este número varia de grupo a grupo, pode-se utilizar $\bar{N} = \frac{\sum nj}{3}$

3) Obtêm-se da tabela de distribuição de "Studentized Range" os valores r_1 e r_2 os quais dependem do número de grupos a comparar (três, neste caso) e dos graus de liberdade.

4) Calculam-se os valores de R_1 e R_2 dados por:

$$R_1 = r_1 \cdot S_{\bar{x}} \qquad R_2 = r_2 \cdot S_{\bar{x}}$$

5) Comparam-se as diferenças entre as médias ordenadas com os valores de R_1 e R_2 . Para este caso:

Se $\bar{X}_{(3)} - \bar{X}_{(1)} > R_1$, $\bar{X}_{(3)}$ e $\bar{X}_{(1)}$ diferem significativamente

Se $\bar{X}_{(3)} - \bar{X}_{(2)} > R_2$, $\bar{X}_{(3)}$ e $\bar{X}_{(2)}$ diferem significativamente

Se $\bar{X}_{(2)} - \bar{X}_{(1)} > R_2$, $\bar{X}_{(2)}$ e $\bar{X}_{(1)}$ diferem significativamente.

5.1.3 - Determinação de valores espúrios

Para determinar se existe um valor extremo, grande ou pequeno, que poderia ser considerado espúrio, isto é, um valor que, sob hipótese de normalidade, teria uma pequena probabilidade de ocorrer ($\alpha = 0,05$), utilizou-se o método DIXON, que consiste no seguinte:

1) Para verificar se $X_{(n)}$ é espúrio, calcula-se:

$$r_{1,0} = \frac{X_{(n)} - X_{(n-1)}}{X_{(n)} - X_{(1)}}$$

Assim, para verificar, por exemplo, se $X_{(2)}$ é espúrio:

$$r_{1,0} = \frac{X_{(2)} - X_{(1)}}{X_{(n)} - X_{(1)}}$$

2) De uma tabela de probabilidade de $r_{1,0}$ obtém-se um valor que podemos chamar $R_{10}(\alpha, n)$, o qual depende de α (nível de significância) e de n (número de observações do grupo)

3) Se $r_{1,0} > R_{10}(\alpha, n)$, se declara $X_{(n)}$ ($0, X_{(1)}$) como valor espúrio

4) Se há um valor espúrio, ele é eliminado do grupo e recalculam-se \bar{X} e S .

Esta regra vale apenas para a eliminação de um valor espúrio. Deve-se ter em mente que, quando ocorre mais de um valor espúrio, é possível que a distribuição não seja normal e, nesse caso, se deveria realizar uma transformação de variáveis para normalizar a distribuição.

5.1.4 - Exemplo do programa COMP-VAR

A seguir vem apresentada uma análise do ensaio de limite de liquidez dos três tipos de solos (grupos).

LIMITE DE LIQUIDEZ

COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS E COMPONENTES DE VARIACAO

VALORES FORNECIDOS

GRUPO	VALORES FORNECIDOS										
1	72.0000	41.0000 90.0000	50.0000	55.0000	59.0000	61.0000	61.0000	61.0000	61.0000	65.0000	67.0000
2	73.0000	52.0000 70.0000	54.0000 70.0000	55.0000 81.0000	55.0000 80.0000	56.0000	56.0000	59.0000	60.0000	70.0000	70.0000
3	12.0000	39.0000	46.0000	46.0000	48.0000	48.0000	48.0000	51.0000	56.0000	57.0000	

EXAME DOS VALORES EXTREMOS (MÍNIMO E MÁXIMO) EM CADA GRUPO USANDO O MÉTODO DE DIXON

NÃO HÁ VALORES EXTREMOS

VALOR DA MÉDIA E DO DESVIO PADRÃO EM CADA COLUNA

GRUPO	M	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
1	12	61.9167	11.9275
2	15	65.3333	11.2463
3	9	47.2222	7.9227

TESTE DE HOMOGENEIDADE DOS DESVIOS PADRÃO
USANDO MÉTODO DE BARTLETTVALOR DE $\chi^2 = 1.0448$

NOTA: COMPARE O VALOR DE χ^2 COM A TABELA DOS VALORES DA DISTRIBUIÇÃO QUADRADA COM 2 GRAUS DE LIBERDADE; SE O VALOR COMPUTADO FOR MAIOR DO QUE O VALOR DA TABELA, OS DESVIOS PADRÃO NÃO SÃO HOMOGENEOS; NESTE CASO DEVE-SE FAZER UMA TRANSFORMAÇÃO DOS VALORES DE X.

COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS (ANOVA)

	SOMA DOS QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	MÉDIA DOS QUADRADOS	VALORES DE F
ENTRE OS GRUPOS	1936.1044	2.0000	968.0972	8.3505
DENTRO DOS GRUPOS	3620.5056	33.0000	110.0135	
TOTAL	5556.6100	35.0000	164.6286	

NOTA: COMPARE O VALOR DE F, 8.3505, COM A TABELA DOS VALORES DE F COM 2, 33, 33 GRAUS DE LIBERDADE; SE O VALOR DE F COMPUTADO É MAIOR DO QUE O VALOR DE F NA TABELA AS MÉDIAS DOS GRUPOS SÃO SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES; NESTE CASO USE O MÉTODO DE NEWMAN-KEULS PARA A COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DAS MÉDIAS. (VER EXEMPLO NA DOCUMENTAÇÃO DESTE PROGRAMA)

ESTIMACAO DOS COMPONENTES DE VARIACAO

	VARIANCIAS	DESVIOS PADRÃO
ENTRE OS GRUPOS	72.5246	8.5161
DENTRO DOS GRUPOS	110.9335	10.7672
TOTAL	183.4581	13.7260

O primeiro grupo refere-se aos resultados obtidos a partir de amostras de basalto totalizando 12 determinações. No segundo, encontram-se os de riolito que correspondem a 15 determinações. No último grupo, estão relacionados os de arenito, resultantes de 9 determinações.

Os valores estão dispostos em ordem crescente para cada tipo de litologia. A seguir, é apresentada uma tabela com o número de observações, a média e o desvio padrão correspondentes a cada grupo.

Observou-se ausência de valores extremos a um nível de significância de $\alpha = 0,05$ pelo método de Dixon. Conclui-se, a partir desta análise, que todos os valores serão considerados.

Usando o método de Bartlett (teste de homogeneidade de desvio padrão), obteve-se o valor de $B = 1,6488$. Comparando este valor com o da tabela de valores de Qui-quadrado (χ^2) com 2 graus de liberdade e a um nível de significância igual a 0,05 ($\chi^2 = 5,991$), conclui-se que os desvios padrão são homogêneos.

Na comparação das médias, utilizou-se o método ANOVA que resultou em valor de $F = 8,3505$. Confrontando este valor com o da tabela com 2 e 33 graus de liberdade ($F_{2-33} = 3,30$), vê-se que o valor computado é maior que o calculado. Isto indica que as médias dos grupos diferem significativamente.

Logo a seguir, são apresentadas a estimativa dos componentes de variância, a variabilidade entre os grupos e a variabilidade dentro dos grupos. Assim, se tem:

o desvio padrão entre os grupos = 8,52
o desvio padrão dentro do grupo = 10,77

Constata-se que existe maior desvio padrão dentro do grupo que entre os grupos.

5.1.4.1 - Aplicação do método de comparação múltipla das médias do ensaio de limites de liquidez

Uma vez que as médias do ensaio de limite de liquidez dos três tipos de solos diferiram significativamente, aplicou-se o método de comparação múltipla das médias.

1) Escrevem-se as médias em ordem crescente

Médias	X_1	X_2	X_3
Grupos	Arenito	Basalto	Riolito
Média	47,22	61,92	65,33
n	9	12	15

2) Calcula-se o desvio padrão das médias $S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{N}}$

S = desvio dentro de grupo determinado no programa COMP-VAR

$$S \text{ (dentro)} = 10,77$$

$$N = \sum n_j / 3 \qquad N = (9 + 12 + 15) / 3 = 12$$

$$S_{\bar{x}} = 10,77 / \sqrt{12} = 3,11$$

3) Da tabela de distribuição de "Studentized Range", obtêm-se os valores de r_1 e r_2 que são função do número de grupos a comparar (3), do grau de liberdade (33) e do nível de significância ($\alpha = 0,05$).

$$r_1 (33, 3) = 2,88$$

$$r_2 (33, 3) = 3,47$$

4) Calculam-se R_1 e R_2

$$R_1 = r_2 \cdot S_{\bar{x}} \quad R_1 = 8,96$$

$$R_2 = r_2 \cdot S_{\bar{x}} \quad R_2 = 10,79$$

5) Comparam-se as diferenças entre as médias ordenadas com os valores de R_1 e R_2

$$\cdot X_{(3)} - X_{(1)} = 65,33 - 47,22 = 18,11, X_{(3)} - X_{(1)} > R_1$$

$X_{(3)}$ e $X_{(1)}$ diferem significativamente

$$\cdot X_{(3)} - X_{(2)} = 65,33 - 61,92 = 3,41, X_{(3)} - X_{(2)} < R_2$$

$X_{(3)}$ e $X_{(2)}$ não diferem significativamente

$$\cdot X_{(2)} - X_{(1)} = 61,92 - 47,22 = 14,70, X_{(2)} - X_{(1)} > R_2$$

$X_{(2)}$ e $X_{(1)}$ diferem significativamente

5.1.4.2 - Determinação dos valores espúrios do ensaio de limite de liquidez

Para o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$), constatou-se ausência de valores espúrios. Se, contudo, este nível for elevado para $\alpha = 0,10$, passam a registrar-se esses valores.

Os valores obtidos no ensaio de limite de liquidez para os três grupos estão relacionados no quadro que segue

QUADRO IX

VALORES DE LIMITE DE LIQUIDEZ PARA CADA TIPO DE SOLO

Basalto(%)	Riolito(%)	Arenito(%)
41	52	32
50	54	39
55	55	46
59	55	48
61	56	48
61	56	48
61	59	51
61	60	56
65	70	57
67	70	57
72	73	
90	76	
	78	
	81	
	85	

Para verificar, por exemplo, se X_{12} é um valor espúrico no solo de basalto com $N = 12$, calcula-se

$$r_{1,0} = \frac{X_{12} - X_{11}}{X_{12} - X_1}$$

$$r_{1,0} = 90 - 72 / 90 - 41 = 18 / 49 = 0,367$$

Na tabela da probabilidade encontra-se o valor de $R_{10}(\alpha; N)$, onde α = nível de significância e N é o número de observações. Neste caso, $\alpha = 0,10$ e $N = 12$

$$R_{10} (0,10; 12) = 0,318$$

O valor da tabela é menor que o valor calculado ($R_{10} < r_{10}$), o que indica que X_{12} é um valor espúrio.

Deve-se calcular nova média, novo desvio padrão e novo coeficiente de variação para este grupo.

5.1.5 - Análise dos resultados

As tabelas XXVII, XXVIII e XXIX apresentam os parâmetros estatísticos para cada tipo de solo, bem como os valores mínimos e máximos para cada propriedade.

A partir dos resultados obtidos através do programa, utilizando um nível de significância de $\alpha = 0,10$, com técnica de comparação múltipla das médias, chegou-se às seguintes conclusões:

- O método de Bartlett (comparando o valor calculado com o da tabela dos valores de χ^2) indicou que, na maioria dos ensaios, com exceção dos valores de porcentagem de argila, de atividade coloidal e de expansão, os desvios padrão foram homogêneos.

- Pelo método da comparação múltipla das médias (comparando o valor de F calculado com o da tabela), as médias dos grupos de arenito diferem significativamente das de basalto e riolito, nos ensaios de limites de liquidez, de plasticidade e de compactação, sendo semelhantes os valores das médias para os demais ensaios.

- Usando o método de Dixon, com nível de significância igual a 0,10, observam-se valores extremos em alguns tipos de solos e em alguns ensaios. Recalcularam-se novas médias, novos desvios padrão e novos coeficiente de variação.

- Os valores de (CV) apresentaram-se aceitáveis para ensaios de limites de Atterberg, densidade real dos grãos e compactação, sob o ponto de vista estatístico e com base nos

TABELA XXVII

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS CARAC-
TERÍSTICAS DOS SOLOS DE BASALTO

PARÂ- METROS ESTATIS- TICOS	DENSI- DADE REAL DOS GRÃOS	LIMITES DE ATTERBERG					GRANULOMETRIA					ATIVI- DADE COLOI- DAL	COMPACTAÇÃO				EXPANSÃO	
		LL (%)		LP (%)		IP (%)	AREIA (%)		SILTE (%)	ARGILA (%)	hot (%)		γ_s^{\max} (g/cm ³)		I, S, C,	*		
		*	*	*	*		*	*			*		*					
\bar{X}	2,77	62	59,36	40	37,82	22	22,2	21,45	14,9	62,8	0,40	33,07	31,62	1,39	1,37	13,76	0,69	0,49
	0,110	11,93	8,00	8,39	6,04	5,87	4,019	3,17	6,82	8,16	0,14	6,17	3,50	0,12	0,099	4,33	0,64	0,27
CV(%)	3,96	19,26	13,50	21,25	16,00	26,18	18,13	14,78	45,69	12,98	34,03	18,67	11,37	8,33	7,19	34,96	93,32	54,55
V _{min}	2,61	41	41	25	25	16	12	12	6	46	0,28	24	24	1,09	1,09	7,01	0,17	0,17
V _{max}	2,96	90	72	58	44	34	30	24	28	75	0,67	49	36	1,59	1,43	20,29	2,24	1,07

amanho de amostra igual a 12

Tamanho de amostra igual a 11 (valores recalculados para um nível de significância $\alpha = 0,10$; eliminação do valor espúrio)

legenda: \bar{X} = média
 S = desvio padrão
 CV = coeficiente de variação (%)
 V_{min} = valor mínimo
 V_{max} = valor máximo

TABELA XXVIII

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DE RIOLITO

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	DENSI- DADE REAL DOS GRÃOS	LIMITES DE ATTERBERG				GRANULOMETRIA			ATIVI- DADE COLOI- DAL	COMPACTAÇÃO		I.S.C. (%)	EXPANSÃO (%)	
		LL (%)	LP (%)	IP (%)		AREIA (%)	SILTE (%)	ARGILA (%)		hot (%)	$\gamma_s^{\text{máx}}$ (g/cm ³)		*	
					*									
\bar{X}	2,75	65	41	24	22,85	18,50	16,50	65,0	0,41	31,49	1,38	11,00	1,60	1,29
S	0,089	11,25	7,43	5,27	3,79	4,41	4,70	4,26	0,09	3,21	0,08	4,08	1,25	0,91
CV(%)	3,26	17,22	18,35	22,13	17	23,86	28,45	6,55	22,86	10,18	5,55	44,94	78,23	70,42
V _{min}	2,60	52	32	17	17	12	10	60	0,293	28	1,24	5,25	0,38	0,70
V _{max}	2,95	85	52	37	29	27	24	75	0,63	36	1,50	16,20	3,71	3,71

Tamanho de amostra igual a 15

* Tamanho de amostra igual a 14 (valores recalculados para um nível de significância $\alpha = 0,10$; eliminação do valor espúrio)

Legenda: \bar{X} = média
 S = desvio padrão
 CV = coeficiente de variação (%)
 V_{min} = valor mínimo
 V_{max} = valor máximo

TABELA XXIX

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS CARACTERÍSTICAS
DOS SOLOS DE ARENITO DA FORMAÇÃO TUPANCIRETÃ

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	LIMITES DE ATTEBERG			GRANUMOLETRIA					ATIVIDADE COLOI- DAL	COMPACTAÇÃO				ISC (%)	EXPAN- SÃO (%)
		L L (%)	L P (%)	I P (%)	AREIA (%)		SILTE (%)		ARGI- LA (%)		hot (%)		$\gamma_s^{m\acute{a}x}$ (g/cm ³)			
					*	*	*	*			*	*				
\bar{X}	2,75	47	28	19	36,4	34,5	8,9	7,88	54,67	0,41	24,6	24,0	1,55	1,53	16,29	0,42
S	0,07	7,82	4,23	4,50	7,84	5,24	3,72	2,30	8,72	0,05	4,23	3,83	0,09	0,07	2,76	0,23
CV	2,48	17,87	15,15	21,94	21,52	15,18	41,89	29,1	15,95	12,04	17,21	15,97	6,11	4,7	15,67	55,49
Vmin	2,66	32	19	13	29	29	5	5	40	0,34	16	16	1,43	1,43	12,36	0,25
Vmax	2,90	57	32	26	52	43	17	12	65	0,48	29,4	26	1,71	1,55	19,29	0,73

Tamanho da amostra igual a 9

* Tamanho da amostra igual a 8 (valores calculados para um nível de significância $\alpha = 0,10$; eliminação do valor empírico)

Legenda: \bar{X} = média
S = desvio padrão
CV = coeficiente de variação (%)
Vmin = valor mínimo
Vmax = valor máximo

estudos de Fusco (29) que considerava um CV de aproximadamente 25% como um padrão de qualidade regular para o concreto armado, material de homogeneidade acentuadamente maior que a de solos.

Os valores de CV apresentaram dispersões nos resultados de granulometria na parcela silte nos solos de basalto e de arenito, de atividade coloidal nos de basalto, de ISC nos de basalto e de riolito e de expansão em todos os solos.

5.2 - Método de Regressão Linear Aplicado aos Resultados de Cisalhamento Direto

A segunda parte da análise consistiu em avaliar os parâmetros de resistências (coesão e ângulo de atrito) usando o método de regressão linear, reunindo os resultados obtidos para cada tipo de bloco e condições de umidade.

A regressão linear consiste em encontrar relações entre as variáveis dependente (tensão de corte (y)) e independente (tensão normal ou deformação (x)).

O modelo estatístico é $y = \alpha + \beta x + \varepsilon$, onde os parâmetros α (interseção com eixo dos y) e β (inclinação) são estimados, usando o princípio dos quadrados mínimos. e ε é um erro aleatório com a distribuição normal: $\varepsilon \rightarrow N(0, \sigma \varepsilon)$; onde $\sigma \varepsilon$ é o desvio padrão da estimativa.

5.2.1 - Interpretação dos Parâmetros

Os valores de A e B são as estimativas amostrais dos parâmetros α e β respectivamente. O valor de $\sigma \varepsilon$ (desvio padrão da estimativa), proveniente da aleatoriedade das observações, é estimado por S_{ε} .

Como os valores de A e B são funções lineares dos valores amostrais da variável independente y , os erros aleatórios de y também afetam os valores de A e B. Esses erros são

medidos por S_A e S_B , os quais são denominados desvio padrão da interseção A e desvio padrão da inclinação B respectivamente.

Já que os valores de A e B são usados para estimar a coesão e o ângulo de atrito, é necessário comprovar se há uma boa relação entre as variáveis ou, em outras palavras, provar se eles são significativamente diferente de zero. Para isto se utilizou a distribuição de Student (t), a qual produz os valores: $T_A = A/S_A$ e $T_B = B/S_B$ dados pelo programa. Se T_A e T_B são maiores que $T_{\alpha/2(n-2)}$ dado pela tabela de distribuição de t com n-2 graus de liberdade e nível de significância α , conclui-se que os valores de A e B são significativamente diferentes de zero.

O coeficiente de correlação (r) é uma medida numérica do grau de correlação entre as variáveis independente (x) e dependente (y). O coeficiente de correlação é dado por:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

para uma amostra de n valores. Para uma relação linear perfeita entre x e y, o $r = \pm 1$ ($-1 \leq r \leq 1$).

O intervalo de confiança de ρ é $r_i < \rho < r_s$. Havendo uma boa correlação, o tamanho deste intervalo deve ser pequeno.

Os resíduos padronizados são usados para uma verificação da normalidade da variável y. Os valores de R_i dados por

$$R_i = \frac{y - A - Bx_i}{S_e}$$

devem ser simetricamente distribuídos com respeito à origem, e seus valores absolutos devem estar entre 3 desvios padrão.

5.2.2 - Exemplo do programa REG-SIMPLES

Apresenta-se, a seguir, um exemplo de uma análise dos resultados de 8 ensaios de cisalhamento direto em amostras inundadas dos solos de Carazinho (arenito).

S DIRETU IMUNDAU CARAZINHA

DRU DE DADOS = 0 CODIGO DA TRANSFORMACAO = 1

INTERSECCAO COM O EIXO Y (A) = 0.1196
 INCLINACAO (B) = 0.3962
 DESVIO PADRAO DA ESTIMATIVA = 0.1499
 DESVIO PADRAO DA INCLINACAO = 0.0552
 DESVIO PADRAO DA INTERSECCAO = 0.0950
 INDICE T PARA B = 7.1752
 VALOR DE T PARA ALPHA = 0.025 = 2.4338
 COEFICIENTE DE CORRELACAO = 0.9464
 LIMITE INF. CONFIANCA = 95% = 0.7256
 LIMITE SUP. CONFIANCA = 95% = 0.9905

X(I)	Y(I)	RESIDUO/STD
0.500000	0.3480000	0.2026622
1.000000	0.6370000	0.8034749
2.000000	0.9460000	0.2272140
3.000000	1.2300000	-0.2272140
0.500000	0.2790000	-0.2501309
1.000000	0.5230000	0.0431558
2.000000	0.6420000	-1.8003036
3.000000	1.5020000	1.2933112

VALORES DOS RESIDUOS EM ORDEM CRESCENTE

-1.8003 2 -0.5208 3 -0.2581 4 0.0482 5 0.2021 6 0.2272 7 0.8065
 1.2933

VALORES DE ((2I-1)/2N)100 PARA USAR NA REPRESENTACAO GRAFICA DE X(I)

0.0556 2 0.1667 3 0.2776 4 0.3889 5 0.5000 6 0.6111 7 0.7222
 0.8333 9

PREVISAO
 =====

INTERVALO DE CONFIANCA 95%

	VALOR MEDIO			VALOR INDIVIDUAL	
X+3S =	4.7043088	1.2498251	2.4166769	1.4166620	2.4988401
X+2S =	3.6778726	1.2720932	1.6811582	1.1013308	2.0519205
X+1S =	2.6514363	0.9611373	1.4588634	0.7591057	1.808950
X+0S =	1.6250000	0.0343570	0.0923930	0.3763210	1.1504290
X-1S =	0.5985637	0.1678886	0.2456127	-0.0541450	0.7676443
X-2S =	-0.4278726	-0.3544032	0.2546568	-0.5251705	0.4254192
X-3S =	-1.4543388	-0.8899269	-0.0230751	-1.0230901	0.1100880

Os valores de x correspondem às tensões de cisalhamento no plano de ruptura para cada nível de tensão normal.

O programa apontou os seguintes resultados:

$$A = 0,1196$$

$$B = 0,3962$$

$$S_e = 0,1499$$

$$S_A = 0,6950$$

$$S_B = 0,0522$$

$$T_A = 1,150$$

$$T_B = 7,175$$

$$T_{0,025} = 2,434$$

$$r = 0,9464$$

$$r_s = 0,9905$$

$$r_i = 0,7256$$

Comparando os índices de T_A e T_B calculados com o valor de $T_{0,025}$ para um nível de significância $\alpha = 0,05$ com $n-2$ igual a 6, observa-se que:

- $T_B > T_{0,025}^{(6)}$ - o ângulo de atrito ou a inclinação da reta é um valor significativo, ou seja, difere significativamente de zero. Então o valor é aceitável. Outra indicação é dada pelo coeficiente de correlação, cujo valor é 0,9464.

- $T_A < T_{0,025}^{(6)}$ - a coesão ou interseção com o eixo y possui um valor que não difere significativamente de zero, indicando uma baixa coesão para este solo.

O programa forneceu os resíduos para um teste de normalidade, os quais indicaram que a hipótese da distribuição é normal e não pode ser rejeitada.

5.2.3 - Análise dos resultados

A tabela XXX apresenta os valores de A , B , S_e , T_B , T_A , r , r_i e r_s .

A partir dos resultados obtidos através do programa, chegou-se às seguintes constatações:

- Todos os valores de ângulo de atrito para um nível de significância $\alpha = 0,05$ com $n = 8$ diferem significativamente de zero, ou seja, existe uma boa relação entre as variáveis.

- Os valores de coesão (interseção com o eixo de y) apresentaram três resultados que não diferem significativamente de zero para um nível de significância $\alpha = 0,05$, assinalados na tabela (*). Para um nível de significância $\alpha = 0,10$, verificou-se que apenas um valor não difere significativamente de zero, assinalado na tabela (**), conferindo aos demais uma boa relação entre as variáveis.

- A coesão apresentada pelos solos de Carazinho (arenito) mostrou valores baixos em relação aos demais e, a nível de significância igual a $0,10$, este valor não difere significativamente de zero.

- Os coeficientes de correlação em todos os casos apresentaram um valor próximo a um, indicando que existe uma boa correlação entre as variáveis.

TABELA XXX

RESUMO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DO PARÂMETRO DE RESISTÊNCIA

LOCAL CONDICÃO	CARAZINHO		MARAU		ANTA GORDA		SOLEDADE		PASSO FUNDO		TAPERA	
	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL	INUN- DADO	UMIDADE NATURAL
INTERSEÇÃO C/ EIXO (A) (COESÃO)	0,12	0,27	0,26	0,49	0,25	0,43	0,25	0,66	0,27	0,44	0,27	0,57
INCLINAÇÃO (B) (ÂNGULO DE ATRITO)	0,40	0,49	0,44	0,27	0,72	0,67	0,44	0,45	0,46	0,48	0,41	0,35
DESVIO PADRÃO DE ESTIMA- TIVA (Sc)	0,15	0,12	0,13	0,12	0,13	0,06	0,11	0,15	0,14	0,09	0,12	0,08
ÍNDICE T PARA B (T _B)	7,18	11,0050	9,1108	5,8714	13,1150	28,5706	10,9238	7,9249	8,8904	15,1907	9,5360	11,6576
ÍNDICE T PARA A (T _A)	1,15 ^{**}	3,209	2,833	5,697	1,978 [*]	6,724	2,269 [*]	6,227	2,781	7,347	3,32	9,888
COEFICIENTE DA CORRELA- ÇÃO (S)	0,95	0,98	0,97	0,92	0,9858	0,9963	0,9758	0,9556	0,9641	0,9872	0,9686	0,9786
LIMITE INFERIOR DE CON- FIANÇA (r _i)	0,73	0,87	0,82	0,6241	0,9032	0,9791	0,8678	0,7682	0,8090	0,9286	0,8312	0,8826
LIMITE SUPERIOR DE CON- FIANÇA (r _s)	0,990	0,996	0,994	0,986	0,9980	0,9994	0,9958	0,9922	0,9937	0,9978	0,9945	0,9963

Nº de dados = 8

* para um nível $\alpha = 0,05$ não são significativos** para um nível $\alpha = 0,10$ não são significativos

6 - CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos no presente estudo permite as seguintes conclusões:

- 1 - Em relação às características físico-químicas:
 - a) os três solos apresentam-se com pH ácido (4,9 a 5,5);
 - b) Ca^{++} é o cátion trocável nos solos de basalto e riolito, e Mg^{++} nos de arenito;
 - c) os solos de arenito, basalto e riolito possuem valores baixos de matéria orgânica (0,2% a 4,5%);
 - d) todos os solos mostram baixos valores de CTC (3,941 a 13,244 mE/100g), revelando a existência de caulinita (34);
 - e) nos três tipos de solos, as concentrações de sílica (16,2 a 29,7) e alumínio (13,9 a 27,3) são superiores às de ferro (5,7 a 15,7).
- 2 - Do ponto de vista de microestrutura, os solos a apresentam partículas ligadas por massa argilosa que, por lixiviação, produz vazios. Nos solos de arenito, observa-se uma quantidade maior de vazios.
- 3 - Quanto à mineralogia, os três solos apresentam, na fração granulométrica inferior a 2μ , caulinita como argilo-mineral predominante. Na fração areia, os solos de basalto e riolito diferem dos de arenito por apresentarem uma porcentagem menor de quartzo (65%) e uma quantidade mais elevada de minerais metálico-opacos (25%).
- 4 - Quanto às características de engenharia:
 - a) os três solos apresentam valores elevados de

densidade real dos grãos, em decorrência da presença de óxido de ferro;

- b) a granulometria, nos três tipos de solos, aponta baixa porcentagem de finos (silte e areia), classificando-os, em sua maioria, em siltes inorgânicos de baixa e alta plasticidade pelo sistema SUCS, em A7-5 e A7-6 pelo HRB e como solos argilosos pela classificação textural USBS no diagrama triangular;
 - c) os solos de riolito e basalto mostram valores elevados de plasticidade, sendo de média plasticidade os de arenito;
 - d) os solos se enquadram em argila insensitiva quanto aos valores de índice de liquidez, de acordo com o proposto por Perloff (67) e em argila inativa segundo os valores de atividade coloidal dados por Skempton (80);
 - e) os solos de arenito apresentam valores elevados de densidade seca máxima e de ISC e menores de umidade ótima e expansão, comportamento inverso ao dos solos de riolito e basalto. A baixa expansão nos três tipos de solos é uma consequência do argilo-mineral não expansivo.
- 5 - Pelas características físico-químicas, pelos valores de densidade real dos grãos, pela mineralogia, pela cor e pela compactação, os três solos classificam-se como solos lateríticos.
- 6 - Quanto à granulometria e plasticidade, os solos de arenito diferem dos estudados por outros autores (26, 89).
- 7 - Em relação à compressibilidade:
- a) os valores de pressão de sobreadensamento, de índice de compressão e de índice de expansão mostram pequenas dispersões com o acréscimo da umidade;

- b) a relação entre a pressão de sobreadensamento e pressão atuante permite classificar os solos em fortemente adensados a moderados;
 - c) os três tipos de solos são relativamente compressíveis, com valores de C_c variando de 0,13 a 0,561, nas duas condições de umidade;
 - d) os valores de Índice de vazios mostram-se elevados (superiores a 1,04), caracterizando os solos como porosos.
- 8 - A colapsibilidade se produz a uma pressão de 0,50 kgf/cm^2 nos solos de arenito (Carazinho), não o correndo nos demais.
- 9 - No tocante à resistência, os solos apresentam uma diminuição da coesão, mantendo-se quase inalterado o ângulo de atrito com o acréscimo de umidade. Estes fatos estão provavelmente relacionados com a massa argilosa que funciona como ligante e com a presença de quartzo que, com água na superfície, age como antilubrificante.
- 10 - Pela análise estatística, os solos de arenito diferem significativamente dos de riolito e basalto em relação às características de plasticidade, granulometria, compactação e ISC.

7 - SUGESTÕES

A limitação dos resultados deste trabalho nos leva a sugerir que o mesmo seja ampliado com a finalidade de que um maior número de dados seja levantado, com vistas a um embasamento mais sólido para o conhecimento dos solos da região. Para tanto propõe-se:

a) aplicação dos resultados obtidos nas demais áreas com idênticas formações litológicas;

b) ampliação do estudo de colapsibilidade nos solos de arenito;

c) utilização de técnicas de microscopia eletrônica com aplicação de métodos específicos de preparação e metalização para solos;

d) obtenção de maior número de dados de ensaios de cisalhamento direto e compressibilidade para cada tipo de solo;

e) avaliação das propriedades de engenharia em função do estudo pedológico dos solos;

f) investigação da camada saprolítica possibilitando a comparação de suas propriedades com as da camada superficial aqui estudada;

g) proposição de estudos em áreas menores e com número de ensaios maior, permitindo melhor conhecimento das características específicas de cada tipo de solo;

h) realização, em trabalhos semelhantes, de estudos geológicos anteriores as pesquisas referentes à área de Mecânica de Solos;

i) diferenciação das propriedades de solos porosos das de solos endurecidos situados no mesmo horizonte.

8 - BIBLIOGRAFIA

- 1 . ACKROYD, L.W. Notes on the crushing strength of some Nigéria concretionary gravels and their selection for use a building material. Min. of Transport (Nigéria) 1960.
- 2 . AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT. Laterite and lateritic soils and other problem soils of África. Baltimore, Lyon Associates, 1971.
- 3 . ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Determinação da massa específica dos grãos do solo: MB-28. Rio de Janeiro, 1977.
- 4 . _____ . Determinação do limite de liquidez dos solos: MB-30. Rio de Janeiro, 1977.
- 5 . _____ . Determinação do limite de plasticidade dos solos: MB-31. Rio de Janeiro, 1977.
- 6 . _____ . Análise granulométrica dos solos: MB-32. Rio de Janeiro, 1977
- 7 . _____ . Ensaio normal de compactação de solos: MB-33. Rio de Janeiro, 1968.
- 8 . AITCHISON, G.D. Relationship of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, London, Mar. 30-31, 1960. London, Butterworth, 1961. p.47-52.
- 9 . AITCHISON, G.D. and DONALD, B.I. Effective stress in unsaturated soils. Proc. 2rd Aust. N.Z. Soil Mechanics. p.192-199, 1945.
10. BADILLO, J.B. & RODRIGUEZ, R. Fundamentos de la mecanica de suelos. In: _____ . Mecanica de suelos 3 ed. México, Limusa, 1976.V.I.

11. BARRETO, I.L. e KAPPEL, A. Principais espécies de gramíneas e leguminosas das pastagens naturais do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE DE BOTÂNICA DO BRASIL 15º, Porto Alegre, Anais... gráfica da UFRGS, 1967. p. 281-294.
12. BARDEN, L. & SIDES, G. Engineering behavior and structure of compacted clay. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, New York, ASCE, 96(4):1171-200, 1970.
13. _____. The microstructure of dispersed and flocculated samples of kaolinite, illite, and montmorillonite. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 8(3):391-9, 1971.
14. _____. Samples disturbance in the investigation of clay structure. Geotechnique, London, 21(3):P.211-22, 1971.
15. BARDEN, L. ET ALII. The collapse mechanism in partly saturated soil. Engineering Geology Amsterdam. p.49-60, 1973.
16. BAWA, S.K. Laterite soils and their engineering characteristics. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1957.
17. BISHOP, A.W. ET ALII. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils. In: RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS, BOULDER, JUNE 1960. Boulder, University of Colorado, 1961. p.503-32.
18. BOWLES, Joseph. Engineering properties of soils and their measurement. McGraw-Hill Book Company. Second edition, 1978.
19. BROCK, R.W. Weathering of igneous rocks near Hong Kong. Bulletin of the Geological Society of America. Washington, 54: p.717-738, 1943.
20. CASTRO, G.T. Caracterização de solos residuais de gnaiss da Guanabara. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Civil, 1974. Dissertação Mestrado Engenharia Civil.

21. CASAGRANDE, A & HIRSCHFELD, R.C. Stress-deformations and strenght characteristics of a clay compacted to a constant dry unit weight. In: RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR OF COHESIVE SOILS, BOULDER, June 1960. Boulder, University of Colorado, 1961. p.359-417.
22. CLEMENCE, P.S. ET ALII. Design Considerations of Collapsible Soils. Journal of the Geotecnical Engineering Division, 1981.
23. COLEMAN, J.D. & FARRAR, D.M. The moisture characteristics, composition and strutural analysis of a red clay from Kenya. Geotecnique, 1964.
24. COULON, K.F. ET ALII. Considerações sobre a gênese da Formação Tupanciretã. Instituto de Geociência da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Publicação nº 2, 1973.
25. CRUZ, Paulo Teixeira da. Estado atual da técnica brasileira sobre técnicas de investigação (campo e laboratório); controle de obras de terra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 4. Rio de Janeiro, 3-8 agosto de 1970. Anais... Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Mecânica dos solos, 1970, v.2.t.1 0.17-44.
26. _____. Propriedadesde engenharia de solos residuais compactados das regiões centro-sul e sul, Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1969.
27. _____. e NIEBLE, C.M. Engineering properties of residual soil and granular materials originated from basalts. Capivara Dam Brasil. V Regional Conference for África on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Luanda Angola, 1971.
28. DUBLEY, H.J. Review of Collapsing soils. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divison. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. p.925-947, 1970.

29. FUSCO, P.B. Fundamentos estatísticos de segurança das estruturas. In: _____; Estruturas de concreto. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1977.V.2.
30. GIDIGASU, M.D. Laterite soil engineering: Pedogenesis and engineering principles. Amsterdam, Elsevier, 1976. 544p.
31. GOEDERT, W.J. Contribuição ao estudo das argilas dos solos do Rio Grande do Sul. Revista pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, 2. p.245-257, 1967.
32. GONZÁLEZ, M.C. Caracterização e comportamento de um solo típico da região de Manaus-Amazonas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado, 1981.
33. GRAFT-JOHNSON. J.W.S. and BHATIA, H.S. Engineering properties of laterite soils. General report. Prop. of Lateritic Soils, seventh Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. México City, 1969. V.I.p.117-128.
34. GRIM, R.E. Applied clay mineralogy. New York, Mcgraw-Hill, 1962.
35. GRIM, R.E. & BRADLEY, W.F. Clay mineral composition and properties of deep residual soils from São Paulo, Brasil. Proc. 2nd Pan Conf. on Soil Mech and Found. Eng. Brasil. V.I. p.63-72, 1963.
36. GRIM, R.E. Clay mineralogy. 2nd Ed. Mcgraw-Hill, New York, 1968.
37. HENRY, J.K.M. & GRACE, H. The investigation of decomposed Granite in Hong Kong for use a stabilized base course material. Proc. 2nd. Inst. Conf. Soil Mech. 3:p.187-192, 1948.
38. JACKSON, M.L. Soil chemical analysis. Prentice-Hall, Inc. Englewood Chiffs. New York, 1958. p.82-110.
39. JENNINGS, B.E.J. & BURLAND, B.J. Limitations to the use of effective stress in partly saturated soils. Geotechnique. p. 125-144, 1962.

40. JIMÉNES-QUIÑONES, P. & DEERE, D.U. Physical properties and compaction characteristics of tropically wathered soils. In: PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, Caracas, July 8-15, 1967 Proceedings. Caracas, 1967. V.I. p.333-382.
41. KLAMT, E. Morfologia, gênese e classificação de alguns solos do município de Ibirubã e regiões onde ocorrem. Porto Alegre, 1969. Tese apresentada para grau de Magister Scientice em solos, na Faculdade de Agronomia da UFRGS.
42. KNIGHT, K. The origin and occurance of collapsing soils, Proceedings of the 3rd Regional Conference for África on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1963. V.I. p. 127-130.
43. LAMBE, T.W. Soil testing for engineers. New York, John Wiley, 1976.
44. LAMBE, T.W. Soil mechanics. New York, John Wiley, 1969.
45. LARACH, O.J. ET ALII. Levantamentos pedológicos no Brasil. Simpósio de solos tropicais em engenharia. 21 a 23 de setembro de 1981, Rio de Janeiro. P. 13-29.
46. LEMOS, C.R. ET ALII. Levantamentos de Reconhecimentos de solos do Rio Grande do Sul. Boletim técnico nº 30. Recife, 1973. Ministério da Agricultura, Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária, Divisão de Pesquisa Pedológica.
47. LOUGHRAN, F.C. Chemical Weathering of the silicate minerals American Elsevier publishing Companu, New York, 1969.
48. LUMB, Peter. The properties of decomposed granite. Geotechnique, London, 12(3):226-243. Sept. 1962.
49. _____. The residual soils of Hong Kong. Geotechnique 15 p. 180-194. 1965.
50. MACHADO, F.P. Contribuição ao estudo do clima do Rio Grande do Sul. Rio de Janeiro. IBGE, 1950.

51. MARQUES FILHO, L. p. ET ALII. Características usuais e aspectos peculiares do manto de alteração de transição solo-rocha em basalto. Anais do 3º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. V.2. 04 a 08 de maio de 1981. Itapema-Santa Catarina. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia.
52. MELLO, V.F. de. Contribuição ao estudo da resistência ao cisalhamento dos solos. São Paulo, Escola de Engenharia da Universidade Mackenzie, 1956. Tese.
53. MENEGOTTO, E. ET ALII. Nova seqüência sedimentar sobre a Serra Geral do Rio Grande do Sul; Seção de geologia, Santa Maria. Universidade Federal 1968. Publicação especial, nº 1.
54. MIRANDA, A.N. Estudo estatístico das propriedades dos solos residuais de gnaiss das encostas da Guanabara. Rio de Janeiro. Pontifícia Universidade Católica, 1973. Dissertação de Mestrado.
55. MITCHELL, J.K. Fundamentals of soil behaviour. New York, John Wiley, 1976.
56. MORENO, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Secretaria de Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização. Seção de Geografia, 1961.
57. MOREIRA, S.G.E. Morfologia, Gênese e Classificação dos solos do Pôsto Agropecuário de Carazinho - RS. Tese apresentada como um requisito ao grau de Magister Scientie em solos. Porto Alegre, 1970, na Faculdade de Agronomia da UFRGS.
58. MORI, R.T. ET ALII. M.S. BERTOULUCCI, J.C.F. Estudos de compressibilidade de solos residuais e transportados de basaltos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS, 5, São Paulo, Brasil, 1974.
59. MOTA, F.S. Estudos do clima do Estado do Rio Grande do Sul; segundo sistema W.Köppen, R.Bras.Geogr. 8 p.107-116.

60. MOTA, F.S. e GOEDERT, C.O. Evapotranspiração Potencial no Rio Grande do Sul. Revista Pesquisa Agropecuária, Brasileira 1; p. 155-163, 1966.
61. NANNI, L.F. Análises Estatística de dados com uso de técnicas computacionais. Porto Alegre, CPGEC/UFRGS, 1981. Caderno Técnica.
62. NUDELMANN, A.T. Caracterização e estudo de comportamento de um solo residual de migmatito para fins de estimativa de recalques e fundações. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado, 1980.
63. OLA, S.A. Geotechnical properties and behaviour of some stabilized Nigeria lateritic soils. Quarterly Journal of Engineering geology. 1978.
64. PEDRO, G. Distribution des principaux types d'alteration chimique a la superficie du globe. Revue geographie physique et geologia dynamique, 1968.
65. PEECH, M. Methods of soil pH in water. In: Black, C.A. Methods of soil analysis. Madison, Am. Soc. of Agronomy 1965.
66. PENA CARVALHO, J. Limite de liquidez em solos tropicais. Anais do IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia de Fundações, 1976.
67. PERLOFF, W.H. & BARON, W. Soil Mechanics: Principles and applications. New York, Ronald Press, 1976.
68. RENNÔ, T. Algumas considerações geotécnicas sobre solo residual de basalto de Salto-Santiago. Dissertação de Mestrado, 1977. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
69. ROISENBERG, A. O vulcanismo ácido mezozóico da Bacia do Paraná. Resumos das comun. do XX Cong. Brasileiro Geologia. Recife, 1978.

70. ROISENBERG, A. Argilo-minerais em rochas basálticas frescas. Mineralogia dos estadios primários de alteração de rochas basálticas. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação Geociência, UFRGS, 1975.
71. _____ . et ALII. Mapas geológicos do Planalto Meridional no Rio Grande do Sul, esc. 1:250.000. UFRGS. No prelo. Porto Alegre, 1980.
72. RUDDOCK, B.A. Residual soils of the Kumasi District in Ghana. Geotechnique 17, 1967. p. 359-377.
73. SALAS, J.A. & ALPAÑES, J.L. de. Geotecnia y cimientos I, Madrid, Rueda, 1970.
74. SANDRONI, S.S. Resistência ao cisalhamento dos solos residuais das encostas da Guanabara. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica, Departamento de Engenharia Civil, 1973, Dissertação Mestrado Engenharia Civil.
75. SANTANA, H. Os solos lateríticos e a pavimentação. Publicação IPR, Rio de Janeiro, 543, 1976.
76. SANTOS, P.S. Tecnologia de argilas aplicadas às argilas brasileiras. São Paulo, Edgard Blucher, 1975. V.I. cap. 7.
77. SARTORI, P.L. ET ALII. Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas da Bacia do Paraná na região de Santa Maria, R.S. Rev. Bras. Gwoc. 5: p.141-159, 1975.
78. SCHNEIDER, A.W. Contribuição à petrologia dos derrames basálticos da Bacia do Paraná. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola Engenharia, Publ. avulsa nº1.
79. SEED, H.B. & CHAN, C.K. Structure and strength characteristics of compacted clays. Journal ASCE vol. 85 SM5, 1959.
80. SKEMPTON, A.W. The colloidal activity of clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, Zurich, Aug.16-17, 1953. Proceedings. Zurich V.I. p. 57-61.

81. SKEMPTON, A.W. Effective stress in soils, concrete and rocks. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, London, Mar.30-31, 1960. London, Butterworths, 1961, p.4-16.
82. SOUSA, P. Resistência ao cisalhamento dos solos. Escola Politécnica da USP, 1972.
83. SOWERS, George F. Engineering properties of residual soils derived from igneous and metamorphic rocks. In: PAN-AMERICANA DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 2, São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, 14-24 jul. 1963. Anais... São Paulo, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1963. p.39-62.
84. _____ . Physical and chemical properties of the soils. Field and laboratory Investigations. III PAN-AMERICANO CONFERENCE SOIL MECHANICS. V. III. 1967.
85. TANAKA, A. Algumas considerações sobre a resistência ao cisalhamento do solo residual de basalto de São Simão. Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil da PUC. 1976. Dissertação de Mestrado.
86. TOMBINSON, M.J. & HOLT, J.B. The foundation of the bank of China Building Hong Kong. Proc. 3rd. Int. Conf. Soil Mech. 1:p.466-472, 1953.
87. TOWNSEND, F.C. ET ALII. Effects of remolding on the properties of a lateritic soil. HRB. Records 284, 1969.
88. VARGAS, M. Engineering properties of residual soils from south - Central region of Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2. São Paulo, Aug. 18-24, 1974. Proceedings. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1974. V.I.
89. _____ . Geotecnica dos solos residuais. Revista Latino Americana de Geotecnica 1, 1971. p: 20-41.

90. VARGAS, M. Origem, propriedades e natureza de solos residuais indeformados. Pontos ainda não esclarecidos e pesquisas necessárias. In: SEMINÁRIO SOBRE PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS SOLOS RESIDUAIS, Rio de Janeiro, 3-4 out. 1969. Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 1970. p.1-18.
91. _____. Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3, Zurich, Aug. 16-17, 1953.
92. VETTORI, C. Métodos de análises do solo. Rio de Janeiro. Ministério da Agricultura, 1969. Boletim técnico 7.
93. WHITTE, W.A. Atterberg Plastic Limits of clay minerals, Am. mineralogist, 34, p.508-512, 1949.
94. WINTERKORN, H.F. Laterite soils and the stabilization. HBR-Bull. nr. 44., 1951.
95. _____. & CHANDARSHEKHARON, E.C. Laterite soil and their stabilization. HBR-Bull. 44. 1951.

9 - APÊNDICE

Nas tabelas XXXI, XXXII e XXXIII são apresentados valores de densidade real dos grãos, limites de Atterberg, índice de liquidez, granulometria, atividade coloidal, compactação, ISC, expansão e classificação pedológica para cada tipo de solo. Na tabela XXXIV estão expressos os valores de análises químicas, densidade real dos grãos, limites de Atterberg, granulometria, índice de liquidez, atividade coloidal, bem como as propriedades de compressibilidade e resistência dos solos nos blocos indeformados.

TABELA XXXI

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA SOLOS DE BASALTO

PONTO	δ	LIMITES DE ATTERBERG (%)			I L	GRANULOMETRIA (%)			A c	COMPACTAÇÃO		ISC (%)	EXPAN-SÃO (%)	CLASSIF. PEDALÓ-GICA
		L L	L P	I P		AREIA	SILTE	ARGI-LA		$\gamma_{Sm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	hot (%)			
1	2,71	50	33	17	0,176	23	12	65	0,29	1,42	30,00	7,01	1,07	PF
2	2,70	59	41	18	- 0,278	24	14	62	0,31	1,40	33,00	--	--	PF
4	2,96	67	44	23	- 0,30	30	6	64	0,340	1,38	36,00	12,24	0,30	E
5	2,96	61	43	18	- 0,72	21	10	69	0,28	1,42	31,00	16,70	0,77	E
6	2,76	61	43	18	- 0,39	23	15	62	0,31	1,36	36,00	--	--	EC
18	2,67	61	35	26	- 0,26	21	10	69	0,39	1,43	30,00	8,52	0,17	E
22	2,61	90	58	32	0,34	23	25	52	0,67	1,09	49,00	6,903	2,24	EC
23	2,81	65	44	21	- 0,21	12	13	75	0,31	1,33	36,00	17,03	0,46	EC
25	2,85	41	25	16	- 0,5	22	22	56	0,33	1,59	24,00	12,85	0,35	EC
26	2,72	55	30	25	- 0,36	24	28	46	0,58	1,47	27,00	20,29	0,44	PF
29	2,82	72	38	34	0,09	21	15	64	0,59	1,35	34,00	--	--	C-CH
36	2,71	61	40	21	- 0,19	22	8	70	0,32	1,42	31,00	12,36	0,38	C-CH
PARÂMETROS ESTADÍSTICOS	\bar{X}	2,77	62	40	22	- 0,217	22,2	14,9	62,8	0,40	1,39	33,07	13,76	0,69
	S	0,10	11,93	8,39	5,87	0,28	4,02	6,82	8,16	0,14	0,12	6,17	4,33	0,64
	Vmin	2,61	41	25	16	- 0,72	12	16	46	0,28	1,09	24	7,01	0,17
	Vmax	2,96	90	58	34	0,34	30	28	75	0,67	1,59	49	20,29	2,24
	CV(%)	3,96	19,26	21,25	26,18	77,50	18,13	45,69	12,98	34,03	7,19	18,67	34,96	93,32

TABELA XXXII

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA SOLOS DE RIOLITO

PONTO	δ	LIMITES DE ATTERBERG(%)			I L	GRANULOMETRIA (%)			A c	COMPACTAÇÃO		ISC (%)	EXPAN- SÃO (%)	CLASSIF PEDALÔ- GICA
		L L	L P	I P		AREIA	SILTE	ARGI- LA		$\gamma_{Sm\max}$ (g/cm ³)	hot (%)			
10	2,80	54	32	22	0,18	26	11	63	0,370	1,44	29,00	--	--	PF
11	2,64	78	52	26	- 0,80	21	10	69	0,39	1,50	28,00	--	--	PF
12	2,60	56	37	19	- 0,21	17	21	62	0,37	1,47	28,00	16,20	0,38	PF
16	2,80	60	39	21	0,14	12	13	75	0,31	1,41	33,00	--	--	PF
17	2,77	73	48	25	- 0,16	18	10	72	0,38	1,36	34,00	--	--	C-CH
21	2,73	56	33	23	- 0,22	18	15	67	0,37	1,38	31,00	15,03	0,7	PF
24	2,71	81	52	29	- 0,21	18	18	64	0,50	1,31	36,00	--	--	E
27	2,85	59	33	17	0,0	15	19	66	0,29	1,41	28,00	7,57	1,220	JC-G
28	2,70	76	49	27	- 0,39	21	19	60	0,51	1,26	36,00	--	--	JC-G
30	2,95	70	36	27	- 0,02	21	19	60	0,51	1,42	31,00	5,25	3,715	C-CH
31	2,84	85	48	37	- 0,03	20	15	65	0,63	1,27	36,00	6,68	3,42	JC-G
32	2,71	55	36	19	- 0,63	17	21	62	0,34	1,41	30,00	12,23	1,12	JC-G
33	2,72	55	36	19	- 0,21	14	22	64	0,36	1,37	29,00	11,19	1,15	JC-G
34	2,64	52	33	19	0,21	12	24	64	0,36	1,38	28,00	13,86	1,163	O
35	2,69	70	43	27	0,07	27	11	62	0,48	1,24	36,00	--	--	O
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	\bar{X}	2,75	65	41	24	- 0,13	18,5	16,5	65	0,41	1,38	31,49	11,00	1,60
	S	0,09	11,25	7,43	5,27	0,30	4,41	4,70	4,26	0,09	0,08	3,21	4,08	1,25
	Vmin	2,60	52	32	17	- 0,80	12	10	60	0,29	1,24	28,0	5,25	0,38
	Vmax	2,95	81	52	37	0,21	27	24	75	0,63	1,50	36,0	16,20	3,71
	CV(%)	3,26	17,22	18,35	22,13	43,66	23,86	28,45	6,55	22,86	5,55	10,18	44,94	78,23

TABELA XXXIII

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA SOLOS DE ARENITO (FORM. TUPANCIRETÃ)

PONTO	δ	LIMITES DE ATTERBERG (%)			I L	GRANULOMETRIA (%)			A c	COMPACTAÇÃO		ISC (%)	EXPAN- SÃO (%)	CLASSIF PEDALÔ- GICA
		L L	L P	I P		AREIA	SILTE	ARGI- LA		γ_{Smax} (g/cm ³)	hot (%)			
3	2,80	57	31	26	0,08	29	6	65	0,42	1,43	29,00	12,36	0,73	PF-E
7	2,74	48	27	21	- 0,14	40	12	48	0,48	1,51	25,00	12,86	0,56	PF
8	2,73	39	25	14	- 0,64	52	8	40	0,36	1,69	20,00	17,03	0,27	PF
9	2,66	32	19	13	- 0,53	65	6	29	0,48	1,71	16,00	16,43	0,22	PF
13	2,77	46	31	15	0	35	17	48	0,37	1,52	25,00	19,29	0,67	PF
14	2,71	48	27	21	- 0,19	39	8	53	0,44	1,54	25,00	--	--	PF
15	2,71	51	32	19	- 0,26	43	5	52	0,34	1,50	26,00	19,29	0,15	PF
19	2,74	48	27	21	0,62	32	10	58	0,39	1,55	25,00	16,87	0,33	EC
20	2,90	56	32	24	0,04	29	8	63	0,40	1,47	29,00	--	--	EC
PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	\bar{X}	2,75	47	28	19	- 0,43	36,4	8,9	54,67	0,41	1,55	24,44	16,29	0,42
	S	0,07	7,82	4,23	4,50	0,369	7,84	3,72	8,72	0,05	0,07	0,09	2,76	0,23
	Vmin	2,66	32	19	13	- 0,64	29	5	40	0,34	1,43	16	12,36	0,25
	Vmax	2,90	57	32	26	0,62	2	17	65	0,48	1,71	29,4	19,29	0,73
	CV(%)	2,48	17,87	15,15	21,94	30,67	21,52	41,89	15,95	12,04	17,21	6,11	15,67	55,49

TABELA XXXIV

RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS PARA AMOSTRAS INDEFORMADAS

ROCHA	LOCAL	CLASSIF. PEDALÓGICA	P H	MATE- RIA ORGÂNICA (%)	Kr	CTC (mE/100g)	δ	LIMITEs ATTER- BERG (%)			GRANULOMETRIA (%)			I L	A c	COMPACTAÇÃO		CONDI- ÇÃO DE UMIDA- DE	COMPRESSIBILIDADE					RESISTÊNCIA		
								LL	LP	IP	AREIA	SILTE	ARGI- LA			Hot (%)	γ _{Smax} (t/cm ³)		c c	c s	e i	e f	σ'c	ē i	c'	g'
ARENITO FORM. TUPANCIRETÁ	CARA- ZINHO	PF	5,1	0,2	1,36	13,24	2,73	39	25	14	52	8	40	-0,64	0,36	19,80	1,69	Umid. Natural	0,465	0,03	1,79	1,16	0,68	1,41	0,4	29° 27°
								Inun- dada	0,365	0,03	1,29	1,14	0,84					1,28	0,20	24° 28°						
	TAPE- RA	EC	5,1	0,2	1,46	4,05	2,74	48	27	21	32	10	58	0,62	0,39	25,40	1,55	Umid. Natural	0,365	0,02	1,04	0,84	2,20	1,06	0,6 0,65	23°
								Inun- dada	0,33	0,01	1,05	0,81	1,45					1,17	0,3	23°						
BASALTO	MARAU	C-CH	5,0	0,2	1,35	6,13	2,72	73	48	25	18	10	72	0,76	0,38	33,80	1,36	Umid. Natural	0,532	0,03	1,86	1,30	1,18	1,58	0,5	17° 12°
								Inun- dada	0,561	0,02	1,55	1,06	1,15					1,61	0,3	26° 24°						
	ANTA GORDA	C-CH	4,9	0,2	1,51	3,94	2,71	61	40	21	22	8	70	-0,19	0,32	31,00	1,42	Umid. Natural	0,163	0,02	1,067	0,96	1,18	1,22	0,5	32° 35°
								Inun- dada	0,232	0,02	1,07	0,92	1,05					1,11	0,4 0,45	33° 34°						
RUCILITO	PASSO FUNDO	PF	4,9	0,8	1,38	6,68	2,80	54	32	22	26	11	63	0,18	0,37	29,00	1,44	Umid. Natural	0,13	0,01	1,13	1,02	0,85	1,25	0,4	25° 28°
								Inun- dada	0,166	0,01	1,15	1,00	2,78					1,28	0,3	27° 22°						
	SOLE- DADE	JC-G	5,5	4,5	1,55	10,08	2,85	59	33	17	15	19	66	0	0,29	28,00	1,41	Umid. Natural	0,465	0,03	1,24	0,96	2,10	1,37	0,8	29° 22°
								Inun- dada	0,415	0,03	1,38	1,05	1,85					1,37	0,30 0,40	26° 22°						