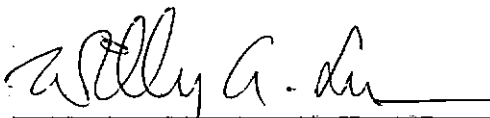


COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO-RESISTÊNCIA DE SOLOS  
COMPACTADOS DOS NÚCLEOS DAS BARRAGENS ENGº ARMANDO  
RIBEIRO GONÇALVES (RN) E BOCAINA (PI)

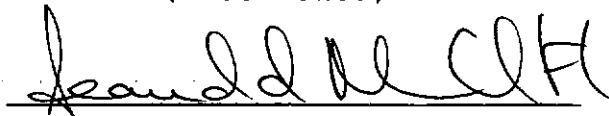
Lucyana Vieira de Melo

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

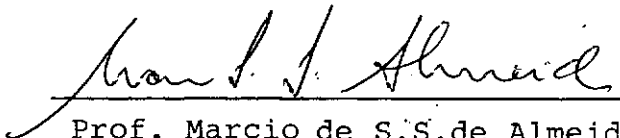
Aprovada por:



Prof. Willy A. Lacerda  
(Presidente)



Prof. Leandro Moura C. Filho



Prof. Marcio de S.S. de Almeida

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 1986

MÉLO, LUCYANA VIEIRA DE

Comportamento Tensão - Deformação - Resistência de Solos Compactados dos Núcleos das Barragens Engº Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e Bocaina (PI) (Rio de Janeiro ) 1986.

XII 189 p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1986)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
COPPE

1. Tensão - Deformação - Resistência      2. Solo Compactado

I. COPPE/UFRJ.

II. Título

Dedico este trabalho a  
minha mãe Carmerina pe  
lo amor e incentivo  
constantes

## AGRADECIMENTOS:

Ao Prof. Willy Alvarenga Lacerda pela excelente orientação prestada em todas as fases de elaboração deste trabalho.

Ao Prof. Leandro de Moura Costa Filho pelas sugestões e pela colaboração prestada e ao Prof. Marcio S.S. Almeida por participar da banca examinadora.

Aos Professores Washington Moura de Amorim Junior, Silvio Romero de Melo Ferreira e Amaro Henrique Lins pelas críticas e sugestões que muito me auxiliaram no aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos Professores da área de Mecânica dos Solos da UFPE que me despertaram o interesse e me incentivaram à realizar esta pesquisa.

Aos Professores da área de Mecânica dos Solos da COPPE-UFRJ, que dedicadamente transmitiram seus conhecimentos.

Ao DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, em especial ao Prof. Nilton de Almeida Castro e à COTEC S.A. - Consultoria Técnica SA, que forneceram as amostras e os dados imprescindíveis para a elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Solos e Instrumentação da UFPE e a todos os que o compõem, não só por ter cedido o equipamento necessário à execução dos ensaios, como também pelos dados sobre os materiais de outras barragens do Nordeste e principalmente pelo apoio prestado durante todo o trabalho.

Ao Laboratório de Solos do DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagens, sob a responsabilidade do Dr. Francisco Carlos Castelo Branco Rebouças, onde foram realizados alguns ensaios de adensamento e aos laboratoristas Wilson, Luiz e Antônio.

Ao Laboratorista Francisco Carlos e aos auxiliares de laboratório Severino Costa, Abel Guedes, Severino Francisco e Elias da Silva pela colaboração e auxílio prestados durante a execução dos ensaios.

Ao Laboratório de Solos da UFRPE, em especial à Geóloga Maria da Graça de Vasconcelos Xavier Ferreira e ao Laboratório de Raio X da UFPE sob a responsabilidade do Professor Hugo Villarroel Leo pela realização da Análise Mineralógica.

Ao Laboratório de Solos da EMBRAPA - SNCS notadamente ao Engº Luiz Bezerra pela realização dos ensaios de Análise Química.

Aos amigos Armando, Araujo, Conceição, Edinalva, Ester, Frederico, Hélio, José Henrique, Leticiana, Márcia, Sergio, Stella, Verônica e todos os outros, pelo convívio, companheirismo, incentivo, apoio e auxílio prestados ao longo deste período.

A Marcelo Bione e Everaldo Paulo pelos excelentes e trabalhosos desenhos.

A Conceição Falcão e a Maria das Graças Moraes pelo excelente trabalho datilográfico.

Aos meus pais e aos meus irmãos João Magno e Julyana pelo constante incentivo, compreensão e apoio moral, sem os quais não teria sido possível concluir este trabalho.

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## SÍMBOLOS:

$K = \sigma_3 / \sigma_1$  - Coeficiente de Empuxo

$K$  - Permeabilidade

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  - Tensões principais

$\sigma_1', \sigma_2', \sigma_3'$  - Tensões principais efetivas

$\sigma_c$  - Tensão confinante

$\sigma_v$  - Tensão vertical

$$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$$

$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3)$  - Tensão desviatória

$\sigma_{df} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f$  - Tensão desviatória na ruptura

$\sigma_{dult} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$  - Tensão desviatória última

$\Delta \sigma_d$  - Variação da tensão desviatória

$\Delta \sigma_{afp}$  - Correção da tensão axial para resistência do papel filtro

$\Delta \sigma_{am}$  - Correção da tensão axial para resistência da membrana

$\Delta \sigma_{lm}$  - Correção da tensão lateral para resistência da membrana

$K_{fp}$  - Carga suportada pelo papel filtro

$\epsilon_v$  - Deformação volumétrica específica

$\epsilon_a$  - Deformação axial específica

$w$  - Umidade

$W$  - Peso

$\Delta w$  - Variação da umidade

$\Delta u$  - Variação de pressão neutra

$\Delta v_{el}$  - Variação de velocidade

- $e$  - Índice de vazios  
 $\Delta e$  - Variação do índice de vazios  
 $L$  - Lado  
 $h$  - Altura  
 $S$  - Grau de saturação  
 $d$  - Diâmetro  
 $\delta$  - Densidade relativa  
 $\gamma_t$  - Peso específico úmido  
 $\gamma_{sm\acute{a}x}$  - Densidade seca máxima  
 $\Delta H$  - Variação de altura  
 $\tau_R$  - Tensão cisalhamento na ruptura  
 $\bar{A} = \Delta u / \sigma_d$  - Parâmetro de pressão neutra  
 $\bar{B} = \Delta u / \Delta \sigma$  - Parâmetro de pressão neutra  
 $UU, \overline{UU}$  - Ensaio triaxial rápido (\*)  
 $CU, \overline{CU}$  - Ensaio triaxial adensado rápido (\*)  
 $CD$  - Ensaio triaxial adensado lento  
 $C_v$  - Coeficiente de adensamento  
 $C_r$  - Índice de recompressão  
 $C_c$  - Índice de compressão primária  
 $C_s$  - Índice de descompressão  
 $C_\alpha$  - Coeficiente de compressão secundária  
 $\sigma_{vm}$  - Pressão de pré-adensamento  
 $K, N$  - Parâmetros da formulação hiperbólica  
 $C_{orr}$  - Coeficiente de correlação  
 $E_i = 1/a$  - Módulo de elasticidade inicial  
 $p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$   
 $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$   
 $q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$   
 $E_{secante}$  - Módulo de elasticidade secante  
 $C_u$  - Coesão não drenada  
 $\phi_u$  - Ângulo de atrito não drenado

---

(\*) A barra indica medida de pressão neutra

- $C'$  - Coesão drenada  
 $\phi'$  - Ângulo de atrito drenado  
 $P$  - Perímetro  
 $A_{OS}$  - Área da amostra  
 $E_m$  - Módulo de elasticidade da membrana  
 $A_{om}$  - Área transversal inicial da membrana  
 $t_{om}$  - Espessura inicial da membrana  
 $r_{om}$  - Raio inicial da amostra  
 $\epsilon_{at}$  - Deformação específica axial devida ao adensamento e/ou à deformação não drenada  
 $P_a$  - Pressão atmosférica  
 $E_t$  - Módulo de elasticidade tangente  
 $\nu_i$  - Coeficiente de Poisson  
 $CE$  - Condutividade elétrica  
 $100Na/T$  - Teor salino  
 $T$  - Capacidade de troca catiônica  
 $V$  - Percentagem de saturação de bases  
 $K_i$  - Relação sílica/alumina  
 $K_r$  - Relação sílica/sexquióxidos  
 $CP$  - Corpo de prova  
 $TT$  - Tensões totais  
 $TE$  - Tensões efetivas  
 $w_{ot}$  - Umidade ótima  
 $\gamma_{smax}$  - Densidade seca máxima  
 $\delta$  - Densidade dos grãos



RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.S.)

COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO-RESISTÊNCIA DE SOLOS  
COMPACTADOS DOS NÚCLEOS DAS BARRAGENS ENGº ARMANDO  
RIBEIRO GONÇALVES (RN) E BOCAINA (PI)

Lucyana Vieira de Melo

Fevereiro de 1986

Orientador: Prof. Willy Alvarenga Lacerda

Programa : Engenharia Civil

Este trabalho visa o estudo dos parâmetros geotécnicos dos materiais empregados nos núcleos das Barragens Engº Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e de Bocaina (PI), através de ensaios triaxiais do tipo UU e  $\overline{CU}$  e ensaios de adensamento.

Para um melhor entendimento do comportamento dos materiais estudados, pesquisou-se sua origem e formação geológica e realizou-se ensaios de análise química e mineralógica, correlacionando os dados obtidos nos ensaios com os dados pesquisados.

Na revisão bibliográfica, pesquisou-se os parâmetros geotécnicos e a origem geológica de outros materiais empregados em barragens recentemente construídas no Nordeste, comparando-os com os dos materiais estudados.

Finalmente, procurou-se aplicar aos dados obtidos através de ensaios a formulação hiperbólica proposta por Kondner (22) e depois desenvolvida por Duncan e Chang (12).

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL  
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR DEGREE OF MASTER OF  
SCIENCE (M.Sc.)

STRESS-STRAIN-STRENGTH BEHAVIOUR OF COMPECTED SOILS  
FROM THE CORES OF ENGº ARMANDO RIBEIRO GONÇALVES, "RN"  
AND BOCAINA, "PI" DAMS

Lucyana Vieira de Mélo

February 1986

Chairman: Prof. Willy Alvarenga Lacerda  
Department: Civil Engineering

The present study is an investigation of the geotechnical parameters of the materials used in the cores of Engº Armando Ribeiro Gonçalves dam, in the state of Rio Grande do Norte, and Bocaina, dam im the state of Piaui. This investigation is based upon triaxial tests, type UU and  $\overline{CU}$ , as well as consolidation test.

In order to improve the understading of both materials geological studies and chemical and mineralogical analysis were performed. The geotechnical parameters obtained were then correlated to the results of those analysis and to the geological origin of the materials.

A study concerning the geological origin and geotechnical parameters of others materials used in recently built dams in Northest Brasil was done and the data availeble was compared with the data obtained here.

Finally, one attempt was made to apply the hiperbolic formulation, proposed by Kondner (22) and later developed by Duncan and Chang (12), to the results of the triaxial tests.

## ÍNDICE:

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

## CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## II.1. Introdução

II.2. Considerações Sobre a Geologia do Nordeste

## CAPÍTULO III . CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

III.1. Caracterização dos Materiais das  
Áreas de Empréstimo da Barragem Engº  
Armando Ribeiro Gonçalves ( Barragem  
do Açú)

## III.1.1. Descrição do Projeto

## III.1.2. Geologia Local

## III.1.3. Geologia das Áreas de Empréstimo

## III.1.3.1. Área de Empréstimo nº 1

## III.1.3.2. Área de Empréstimo nº 2

## III.1.3.3. Área de Empréstimo nº 3

## III.1.3.4. Área de Empréstimo nº 4

III.1.4. Propriedades Geotécnicas dos Solos  
dos Empréstimos

## III.1.4.1. Distribuição Granulométrica

## III.1.4.2. Características de Plasticidade

## III.1.4.3. Características de Compactação

## III.1.4.4. Características de Resistência

### III.2. Caracterização dos Materiais das Áreas de Empréstimo da Barragem de Bocaina

#### III.2.1. Descrição do Projeto

#### III.2.2. Geologia Local

#### III.2.3. Propriedades Geotécnicas dos Solos dos Empréstimos

##### III.2.3.1. Distribuição Granulométrica

##### III.2.3.2. Características de Plasticidade

##### III.2.3.3. Características de Compactação

##### III.2.3.4. Características de Resistência

## CAPÍTULO IV - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

### IV.1. Introdução

### IV.2. Programa de Ensaios

#### IV.2.1. Ensaios de Caracterização

#### IV.2.2. Ensaios de Cisalhamento Direto

#### IV.2.3. Ensaios Triaxiais

#### IV.2.4. Ensaios de Adensamento com Drenagem Vertical

#### IV.2.5. Ensaios de Análise Química

#### IV.2.6. Ensaios de Dispersibilidade

#### IV.2.7. Análise Mineralógica

## CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### V.1. Distribuição Granulométrica

### V.2. Ensaios de Cisalhamento Direto

#### V.2.1. Material da Barragem do Açú

V.2.2. Material da Barragem de Bocaina

V.3. Ensaio UU

V.3.1. Material da Barragem do Açu

V.3.2. Material da Barragem de Bocaina

V.4. Ensaio  $\overline{CU}$

V.4.1. Material da Barragem do Açu

V.4.2. Material da Barragem de Bocaina

V.5. Critério de Ruptura

V.6. Ensaio de Adensamento

V.6.1. Material da Barragem do Açu

V.6.2. Material da Barragem do Bocaina

## CAPÍTULO VI - APLICAÇÃO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA

## CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

VII.1. Conclusões

VII.2. Sugestões

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## APENDICE A: CORREÇÕES EM ENSAIOS TRIAXIAIS E DE ADENSAMENTO

A.1. Introdução

A.2. Correção da Resistência devida ao papel filtro

A.3. Correção da Resistência da Membrana

A.4. Correção da Resistência devida ao Atrito do Pistão

A.5. Medida de deformação da Célula de Adensamento

APENDICE B: FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA

B.1. Introdução

B.2. Obtenção dos Módulos de Deformação Através de Ensaíos Triaxiais.

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Na construção de barragens de terra, procurou-se durante muito tempo empregar materiais de características geotécnicas bem conhecidas, ditas "convencionais". No entanto, com a crescente alta do custo do transporte, a evolução das técnicas de laboratório e a construção de barragens de grandes dimensões, tornou-se inevitável o uso de materiais de características não muito conhecidas e de difícil trabalhabilidade.

O uso cada vez mais freqüente destes materiais, ditos "não convencionais", gera problemas não apenas relacionados ao projeto mas também outros ligados à sua análise em laboratório e à sua aplicação no campo.

Deve-se salientar aqui que, de acordo com Mori (36), a classificação dos materiais como "convencionais" ou "não convencionais" é bastante vaga e está sujeita a modificações com o tempo, pois depende do estado de avanço tecnológico do país.

O objetivo deste trabalho é estudar e fornecer dados sobre as características geotécnicas dos materiais empregados nos núcleos das Barragens Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves (RN) e da Barragem do Bocaina (PI) através de ensaios de laboratório, pois tais materiais apresentaram indicações de serem "não-convencionais".

Os parâmetros geotécnicos necessários para caracterizar o comportamento dos dois materiais foram determinados a partir de ensaios comuns de compressão triaxial não adensados não drenados ( $\overline{UU}$ ) e adensados - não drenados ( $\overline{CU}$ ), estes com medida de pressão neutra, ensaios de adensamento e ensaios de cisalhamento direto.

Dados sobre a formação geológica dos dois materiais também foram pesquisados, com a finalidade de correlacionar

as características geotécnicas dos mesmos com sua origem geológica.

Foram realizados ainda ensaios químicos nos dois materiais, com o objetivo de tentar explicar, através da composição química dos mesmos, alguns aspectos do seu comportamento tensão-deformação e resistência; ensaios de dispersibilidade como o "pinhole", ensaios comparativos de granulometria e ensaios de dispersão rápida.

São apresentados também, alguns dados geotécnicos e geológicos de outros materiais empregados em barragens recentes do Nordeste e de outras regiões do Brasil, visando-se com isto compreender melhor o comportamento dos dois materiais estudados.



## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### II.1. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, diversos pesquisadores de mecânica dos solos têm-se dedicado ao estudo do comportamento tensão-deformação dos solos compactados. Exaustivos programas de ensaios de laboratório foram executados com o propósito de determinar não só as características de resistência, tensão-deformação e pressão neutra, como também a influência do processo de compactação, umidade de moldagem, velocidade e distribuição dos carregamentos, condições de drenagem e outros fatores no comportamento desses materiais.

Inúmeros artigos e trabalhos abordando o assunto foram publicados.

Marsal (32) fez uma revisão dos fundamentos envolvidos no comportamento dos solos coesivos, discutindo a relação entre os fenômenos intrínsecos e as tensões efetivas destes materiais, baseando-se nos estudos de Mitchell (35).

Casagrande e Hirschfeld (6) investigaram as características de resistência, tensão-deformação e pressões neutras da argila de "Canyon Dam", através de séries completas de ensaios triaxiais tipo  $\overline{UU}$ ,  $\overline{CU}$  e  $\overline{CD}$ ; poucos ensaios de cisalhamento direto lento e ensaios especiais de três tipos: Ensaio (PH), onde se elevam as pressões confinantes hidrostaticamente; ensaios (PC), onde as deformações laterais são nulas, e ensaios tipo  $K=cte$ ; sendo que em todos eles a umidade da amostra foi mantida constante. Os ensaios especiais serviram para investigar o desenvolvimento das pressões neutras sob várias condições de carregamento, sem se produzir nenhuma condição de ruptura.

As envoltórias de resistência dos ensaios triaxiais foram obtidas para diferentes valores de umidade de compactação,

podendo-se assim estudar a influência da umidade de moldagem na resistência do solo estudado.

Seed e Chan (40) pesquisaram os fatores que influem na resistência dos solos coesivos compactados, tais como as forças interpartículas, a umidade da moldagem, o método de compactação utilizado, fenômenos tixotrópicos, fatores físicos (atrito), fatores físico-químicos (coesão) e fatores químicos (cimentação), chegando a importantes conclusões que em muito auxiliaram no entendimento do comportamento dos solos coesivos compactados. São algumas delas:

- a resistência das argilas compactadas depende principalmente da densidade seca, da umidade e da estrutura. Mantendo-se a umidade constante, a resistência tende a aumentar com o aumento da densidade seca;
- a resistência ao cisalhamento dos solos compactados, principalmente a baixas deformações específicas, pode aumentar consideravelmente, por um "envelhecimento" a umidade constante devido a efeitos de tixotropia;
- a compactação estática proporciona maior resistência a baixas deformações e pressões neutras menores do que a compactação por pisoteamento, porém a razão  $\sigma_1/\sigma_3$ , quase não sofre influência. No entanto, quando a resistência é determinada a altas deformações específicas, o método de compactação não tem efeito significativo sobre a resistência do solo para umidade e densidade constantes e iguais;
- estruturas dispersas apresentam resistência menor e pressões neutras maiores que às correspondentes a estruturas floculadas.

Lambe (28), ao descrever a natureza das superfícies minerais dos solos, fez considerações sobre as forças existentes

entre as partículas e descreveu os vários componentes da resistência ao cisalhamento dos solos.

Lowe III e Karafiath(30) pesquisaram a resistência ao cisalhamento dos solos argilosos adensados anisotropicamente e para isto realizaram ensaios de laboratório do tipo CU (adensados isotropicamente) e do tipo CAU (adensados anisotropicamente), ambos com as mesmas condições iniciais de umidade. Comparando os resultados, chegaram à conclusão de que os valores de resistência obtidos nos ensaios tipo CAU são maiores que os obtidos indiretamente através dos ensaios tipo CU.

No Brasil, somente a partir da década de 60 iniciou-se a sistematização dos dados de observações de campo e de laboratório com caráter de pesquisa.

Cruz (8), (9) apresentou trabalhos sobre os solos residuais compactados, reunindo dados de observações de campo e de ensaios de laboratório que permitiram entender melhor as características de resistência dos solos residuais compactados utilizados em barragens da Região Centro-Sul do Brasil. Mais recentemente Cruz(10), publicou trabalhos sobre a resistência e trabalhabilidade de solos lateríticos e saprolíticos compactados. Nos seus trabalhos, Cruz procura correlacionar os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ), compressibilidade ( $\sigma_d$  para  $\epsilon = 5\%$ ) e pressão neutra com a percentagem de argila, umidade ótima, estrutura, densidade dos grãos e atividade coloidal dos solos estudados.

Guimarães (19) pesquisou os modelos tensão- deformação aplicados a solos e estudou os parâmetros elásticos do solo residual compactado da Barragem de Itaúba, dando um tratamento matemático aos dados obtidos através de ensaios, comprovando para este solo a existência da relação entre  $\sigma_1$  e  $K = \sigma_1 / \sigma_3$  estreitamente ligada à trajetória de tensões.

Schnaid (39) pesquisou o comportamento tensão- deformação do solo coluvionar da Barragem de Nova Avanhadava a par

tir de modelos não lineares elásticos. Os parâmetros necessários para a formulação foram obtidos em ensaios convencionais de compressão triaxial não adensados-não drenados e o modelo não linear-elástico foi aplicado a curvas tensão-deformação variação volumétrica obtidas em ensaios  $K=cte$ , sugerindo que a formulação elástica para materiais transversalmente anisotrópicos deve ser incorporada aos modelos não lineares na previsão de comportamento dos solos compactados e levando à conclusão de que os modelos não lineares-elásticos são aplicáveis com bons resultados à previsão de deformações no final de construção em barragens de terra.

Além dos autores acima, muitos outros elaboraram trabalhos sobre o comportamento dos solos compactados empregados em barragens de terra no Brasil e o campo para investigação ainda é bastante extenso, principalmente na área dos solos saprolíticos e sedimentares.

A resistência ao cisalhamento dos solos e os fatores que a afetam, levando-se em conta as pressões neutras, já foram exaustivamente discutidos, em Marsal (32), Cruz (8), (9), Bishop e outros (1) e Lins (29). Neste capítulo, portanto, para não tornar o assunto repetitivo, optou-se por pesquisar dados sobre alguns materiais empregados em barragens de terra recentes do Nordeste.

## II.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A GEOLOGIA DO NORDESTE

As regiões semi-áridas do Nordeste enfrentam sérias dificuldades relacionadas com a pequena quantidade e a má distribuição de chuvas durante o ano. Somando-se isto ao fato de que os índices de evaporação anual (2.000mm/ano) são sempre superiores aos índices de precipitação (800mm/ano), torna-se natural a preocupação com obras que visam ao melhor aproveitamento dos seus recursos hídricos.

A geologia regional, segundo Miranda (34), não é muito favorável à retenção dos volumes de água precipitados. Aproximadamente 60% da área semi-árida da região Nordeste é constituída por um embasamento cristalino, sendo os 40% restantes constituídos de terrenos sedimentares. É na zona onde predomina o cristalino que são construídas as principais barragens do Nordeste. Nas bacias sedimentares, exceto em condições favoráveis ao barramento dos rios, é comum o uso de poços para o abastecimento.

Quase a totalidade dos rios da zona semi-árida são de regime intermitente e irregular, com caráter torrencial, devido à intensidade e irregular distribuição das chuvas; isto aliado ao clima, promove mudanças do relevo criando, devido à intensa erosão, uma grande quantidade de vales e grotas. A frequência com que o quadro climático se repete permite a esquematização do perfil de um vale pico da área do cristalino.

Um vale totalmente desenvolvido da região do cristalino pode ser descrito como segue e está esquematizado na figura (II.1).

As ombreiras são recobertas por um manto de intemperismo subdividido em duas camadas: Uma camada superficial de um solo residual maduro de granulometria areno-argilosa, coloração vermelha ou amarela sem nenhuma aparência da rocha de origem a não ser por eventuais veios de quartzo. O solo dessa camada enquadra-se no grupo SC da Classificação Unificada. A camada mais profunda é constituída de um solo residual jovem ou saprolítico que conserva a aparência da rocha mãe e se compõe normalmente de quartzo, mica e feldspato totalmente alterado. Este solo pode ser enquadrado no grupo ML ou SM da Classificação Unificada.

O fundo do vale é recoberto por uma planície aluvionar, cortada pela calha do rio. A camada mais superficial, lateral ao canal, é formada pela deposição de areias finas, siltes e argilas, durante os transbordamentos que inundam toda a planície.

cie. No leito do rio são encontradas areias grossas e pedregulhos. Nos níveis mais profundos destes aluviões estão localizadas lentes de pedregulhos, testemunhas da capacidade de transporte das cheias que estabeleceram a profundidade máxima de entalhamento do vale. Os sedimentos aluvionares repousam diretamente sobre o saprolito não existindo aí solo residual maduro.

Ainda segundo Miranda (34), outros tipos de vales, de nominados "vales incompletos", estão esquematizados na figura II.2 e são:

- I - vales onde a rocha aflora na parte mais profunda e nas ombreiras, ocorrendo, no restante, solos residuais jovens de pequena espessura;
- II - vales com o fundo em rocha, recoberto parcialmente por um pequeno depósito de sedimentos grosseiros enquanto que, nas ombreiras, os solos residuais apresentam-se mais desenvolvidos;
- III - vales que diferem dos solos totalmente desenvolvidos apenas pela ausência do solo residual no fundo do vale. Os sedimentos grosseiros assentam-se diretamente sobre a rocha que chega a aflorar em alguns pontos da calha do rio.

De uma maneira geral, o material utilizado na construção das barragens de terra na região Nordeste do Brasil, são obtidos em jazidas de solo residual (areia argilosa - SC) localizadas nas proximidades da barragem, com espessuras que possibilitam sua exploração. Jazidas de solos aluvionares, sedimentares e outros, também vêm sendo utilizados com frequência. Alguns dados sobre a origem geológica e as características de resistência destes solos estão resumidas na tabela (II.1). As características de plasticidade da fração fina destes materiais estão apresentadas na figura II.3, os valores de densi

dade seca máxima e umidade ótima estão na figura II.4 e as faixas granulométricas dos diversos materiais estão na figura II.5 e II.5 a. As faixas de valores de densidade seca máxima e umidade ótima são bastante extensas, sendo que os menores valores de densidade seca máxima e maiores valores de umidade ótima pertencem aos materiais que na sua faixa granulométrica apresentam uma maior percentagem de material fino.

### II.3 . SUMÁRIO E OBSERVAÇÕES FINAIS

A geologia do Nordeste é bastante complexa e os vales da região bastante diversificados, o que torna a tarefa de escolher o local do eixo de uma barragem muito difícil. Resolvido o problema da escolha do eixo barravel o projetista se depa<sup>ra</sup> com o problema da escolha dos materiais, o que, por vezes, pode inviabilizar a execução da obra ou trazer serios proble<sup>mas</sup> durante a construção.

Nos capítulos seguintes procurou-se estudar o comportamento de dois materiais , utilizados na construção de barra<sup>gens</sup> de terra que durante a análise de laboratório se comporta<sup>ram</sup> razoavelmente bem e que durante a execução da obra foram de trabalhabilidade difícil ou provocaram até a alteração da geometria da barragem como o material da barragem do Açú.

BARRAGEM	ORIGEM DO SOLO	ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$				ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO (tipo CU)		FONTES DOS DADOS
		Cu (KPa)	$\phi_u$	Cu (KPa)	$\phi_u$	C' (KPa)	$\phi'$ (KPa)	C (KPa)	$\phi$	
CHAPEU	Aluvionar	55 a 90	8 a 12 <sup>o</sup>	20 a 50	12 a 14 <sup>o</sup>	20 a 30	23 a 27 <sup>o</sup>	-	-	LSI
JOANA	Residual	-	-	0 a 10	13 a 15 <sup>o</sup>	0 a 13	22 a 31 <sup>o</sup>	57 a 120	14 a 32 <sup>o</sup>	LSI
PONTAL	Resid/ Aluvionar	65 a 90	19 a 24 <sup>o</sup>	10 a 45	9 a 22 <sup>o</sup>	5 a 90	19 a 35 <sup>o</sup>	-	-	LSI
PALMEIRI-NHA	Residual	-	-	0 a 85	11 a 21 <sup>o</sup>	0 a 60	29 a 37 <sup>o</sup>	-	-	LSI
AÇU	Aluvionar	25 a 101	1 a 10 <sup>o</sup>	12 a 53	4 a 13 <sup>o</sup>	12 a 54	10 a 21 <sup>o</sup>	43 a 126	3 a 16 <sup>o</sup>	(**)
AÇU (E2)	Aluvionar	50 a 160	20 a 32 <sup>o</sup>	20 a 140	14 a 31 <sup>o</sup>	0 a 20	32 a 35 <sup>o</sup>	-	-	DNOCS
AÇU (E4)	Aluvionar	120 a 170	9 a 16 <sup>o</sup>	0 a 120	16 a 20 <sup>o</sup>	20 a 45	18 a 28 <sup>o</sup>	10 (*)	20 <sup>o</sup> (*)	DNOCS
BOCAINA	Resid/ Aluvionar	58 a 142	6 a 28 <sup>o</sup>	9 a 19	12 a 18 <sup>o</sup>	3 a 20	22 a 31 <sup>o</sup>	75 a 85	29 a 42 <sup>o</sup>	(**)
BOCAINA(I)	Resid/ Aluvionar	-	-	-	-	-	-	15 a 100	38 a 49 <sup>o</sup>	(**)
BOCAINA	Resid/ Aluvionar	120 a 230	0 a 13 <sup>o</sup>	10 a 85	10 a 18 <sup>o</sup>	5 a 35	13 a 33 <sup>o</sup>	35	39 <sup>o</sup>	LSI

LSI - Laboratório de solos e instrumentação da UFPE

DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

\*\* - Ensaios realizados no presente trabalho

\*... - Ensaio de cisalhamento Direto Lento inundado e adensado

TABELA II.1.- RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE ALGUNS SOLOS COMPACTADOS EMPREGADOS EM BARRAGENS DO NE.



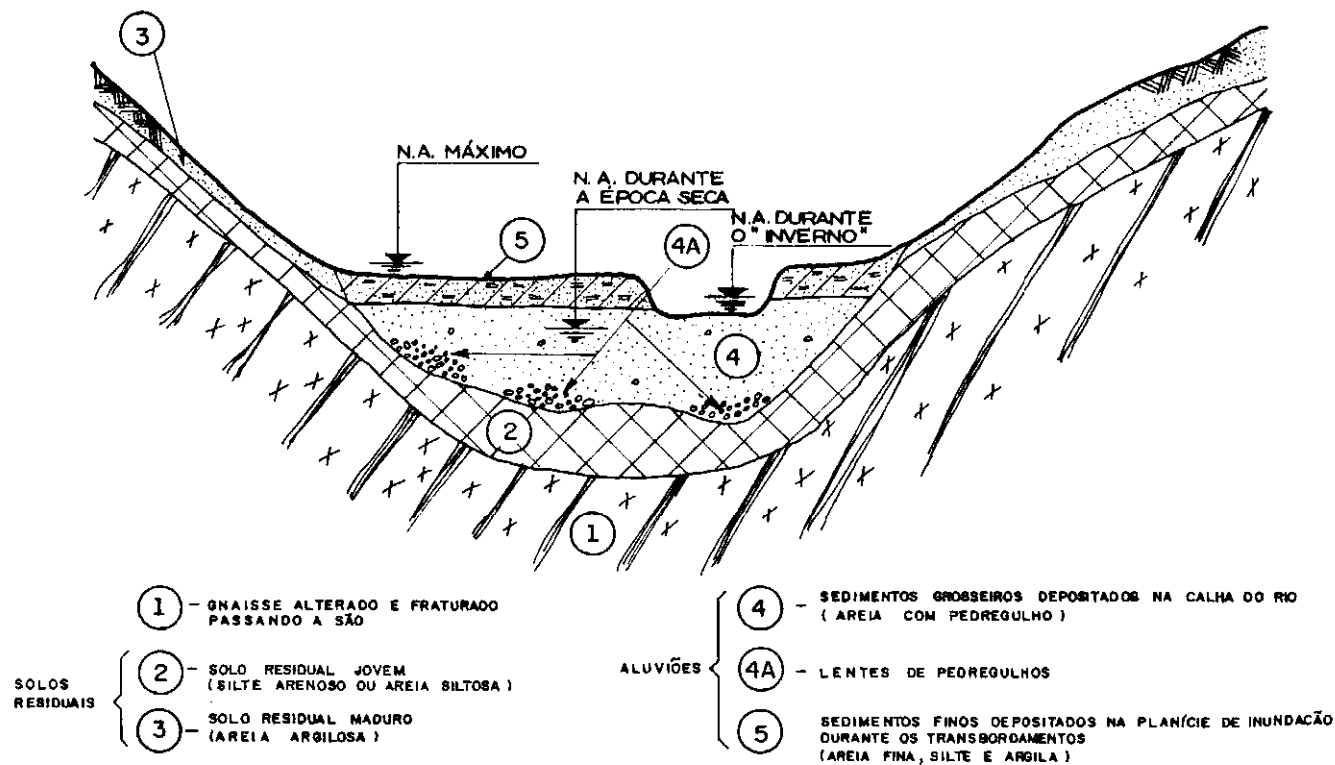
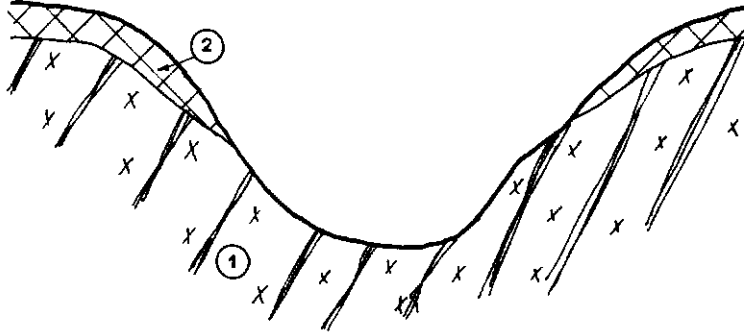
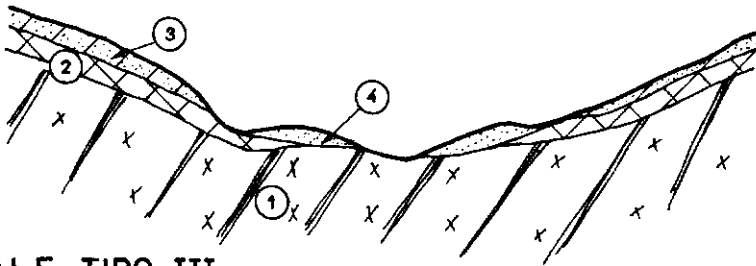
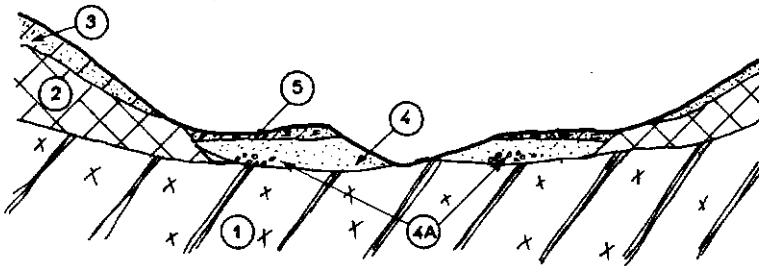


FIG. II.1 — PERFIL ESQUEMÁTICO DE UM VALE NA ÁREA DO CRISTALINO

( Apud — MIRANDA — 1982 )

VALE TIPO IVALE TIPO IIVALE TIPO III

- |                 |      |   |  |
|-----------------|------|---|--|
|                 | (1)  | - | GNAISSE ALTERADO E FRATURADO PASSANDO A SÃO  |
| SOLOS RESIDUAIS | (2)  | - | SOLO RESIDUAL JOVEM (SILTE ARENOSO OU AREIA SILTOSA)   |
|                 | (3)  | - | SOLO RESIDUAL MADURO (AREIA ARGILOSA)  |
|                 | (4)  | - | SEDIMENTOS GROSSEIROS DEPOSITADOS NA CALHA DO RIO (AREIA COM PEDREGULHOS)                                      |
| ALUVIÕES        | (4A) | - | LENTE DE PEDREGULHOS   |
|                 | (5)  | - | SEDIMENTOS FINOS DEPOSITADOS NA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DURANTE OS TRANSBORDAMENTOS (AREIA FINA, SILTE E ARGILA) |

FIG. II.2 - VALES INCOMPLETOS DA REGIÃO NORDESTE

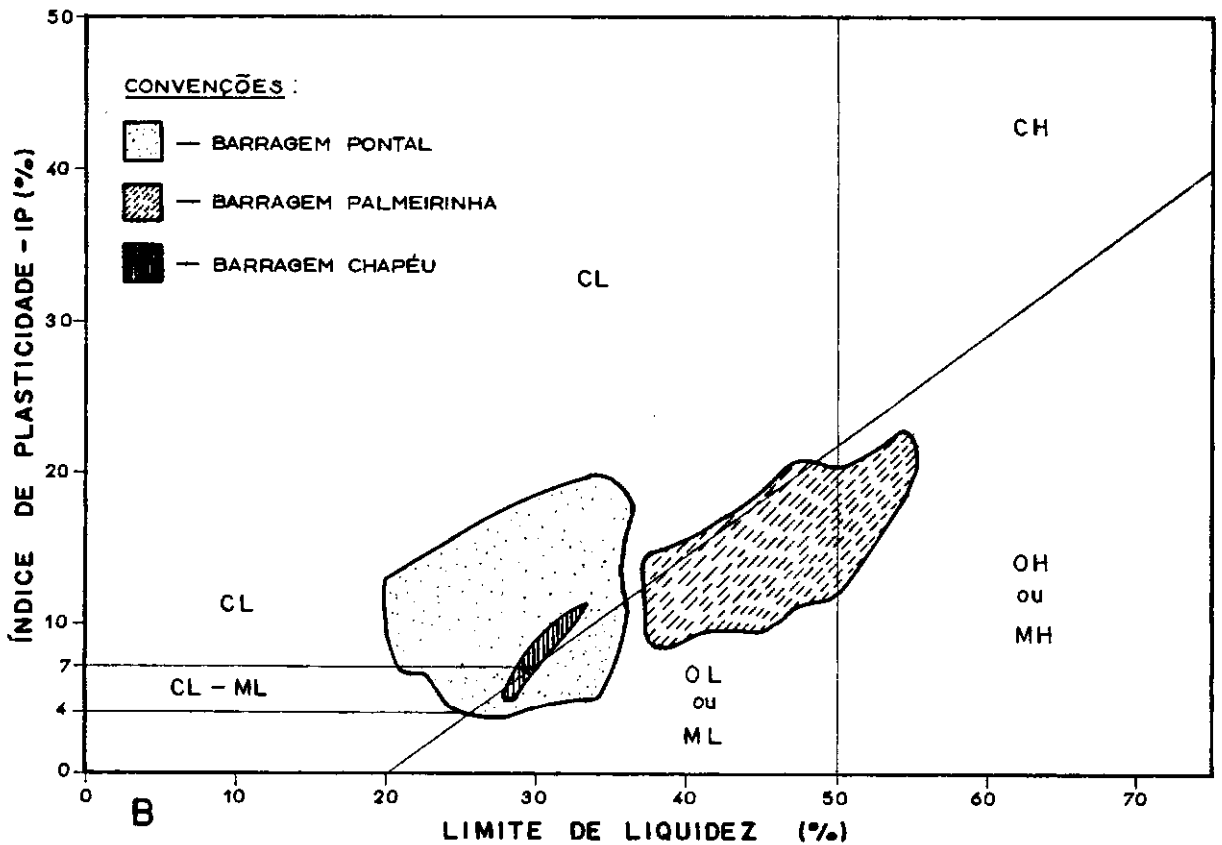
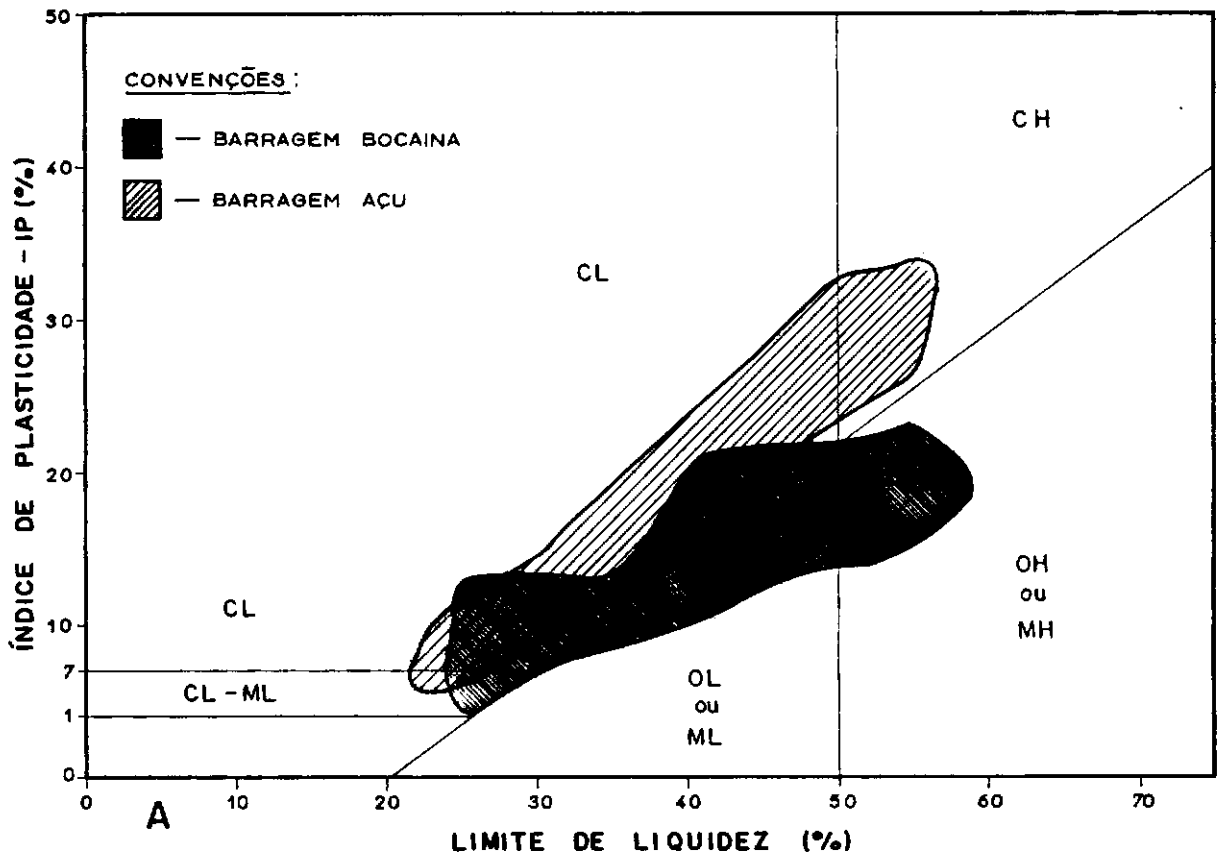


FIG. II.3 - CARACTERÍSTICAS DE PLASTICIDADE DE ALGUNS SOLOS EMPREGADOS EM BARRAGENS DO NE.

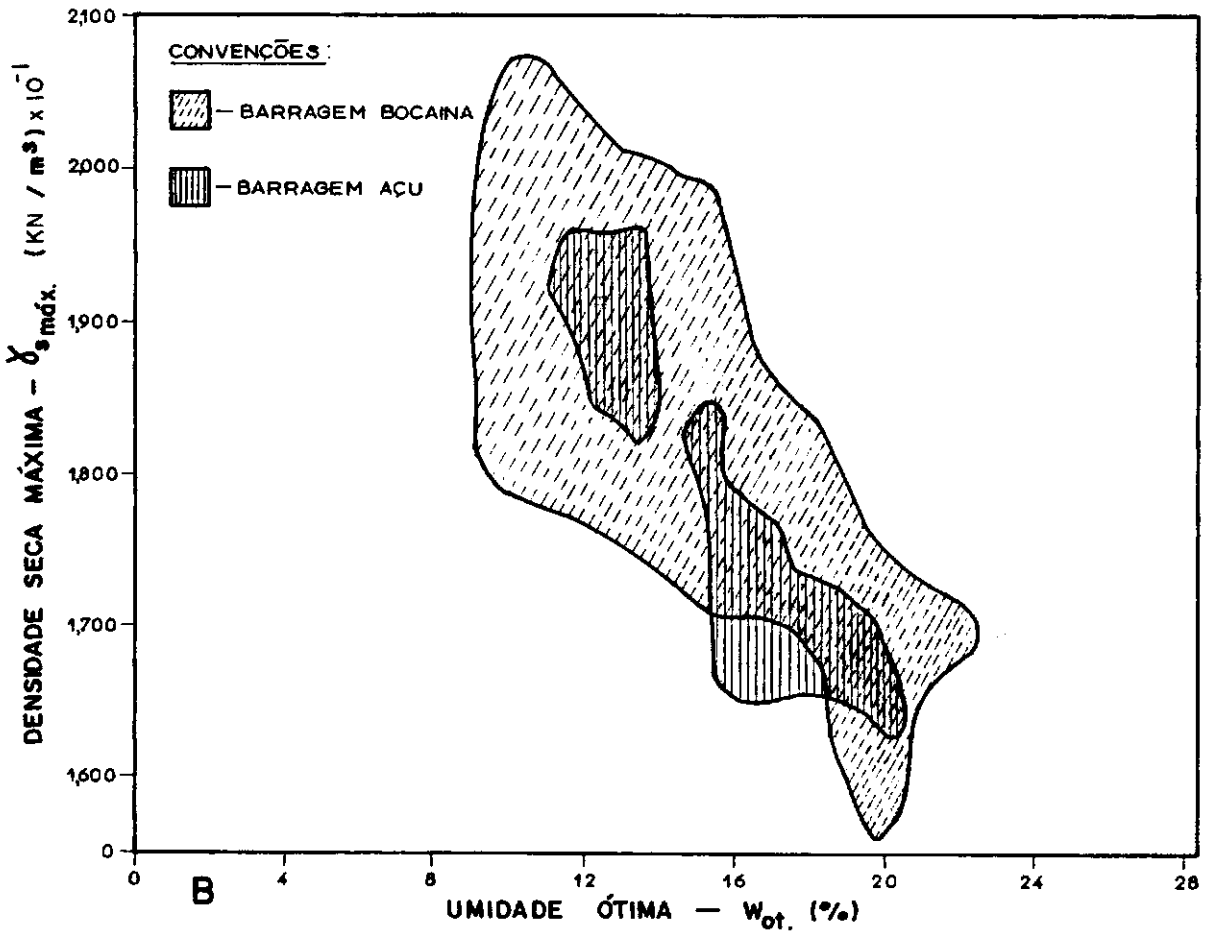
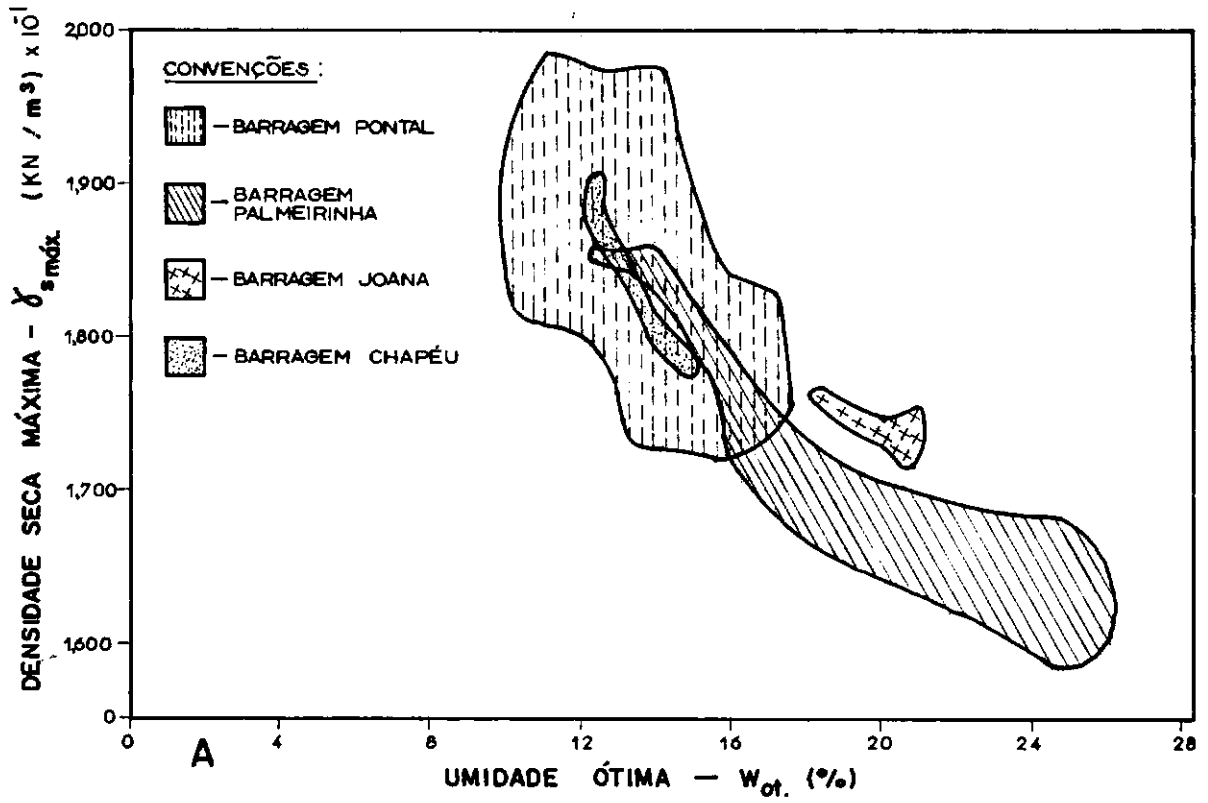


FIG. II.4 - CARACTERÍSTICAS DE COMPACTAÇÃO DE ALGUNS SOLOS EMPREGADOS EM BARRAGENS DO NE.

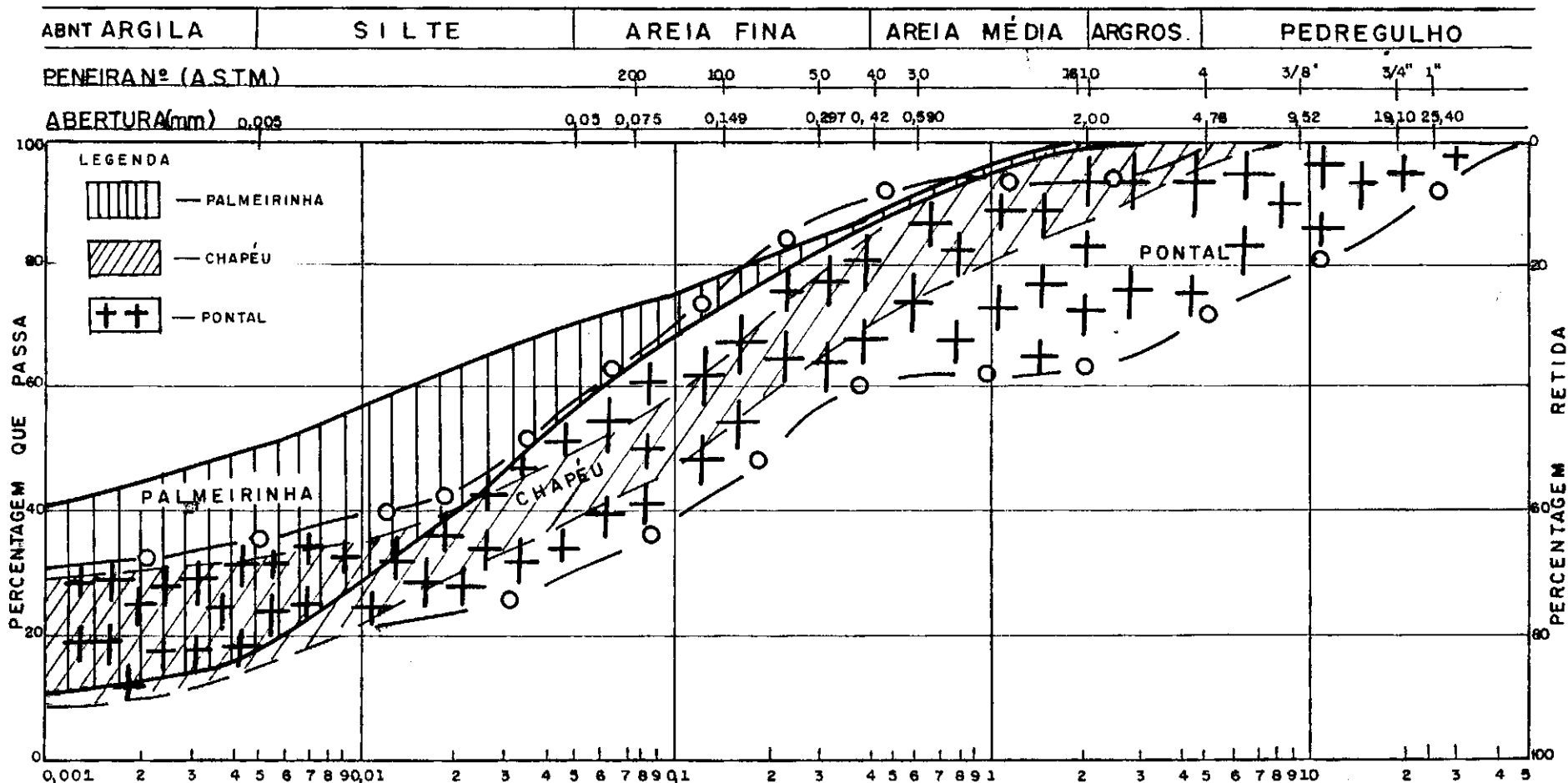
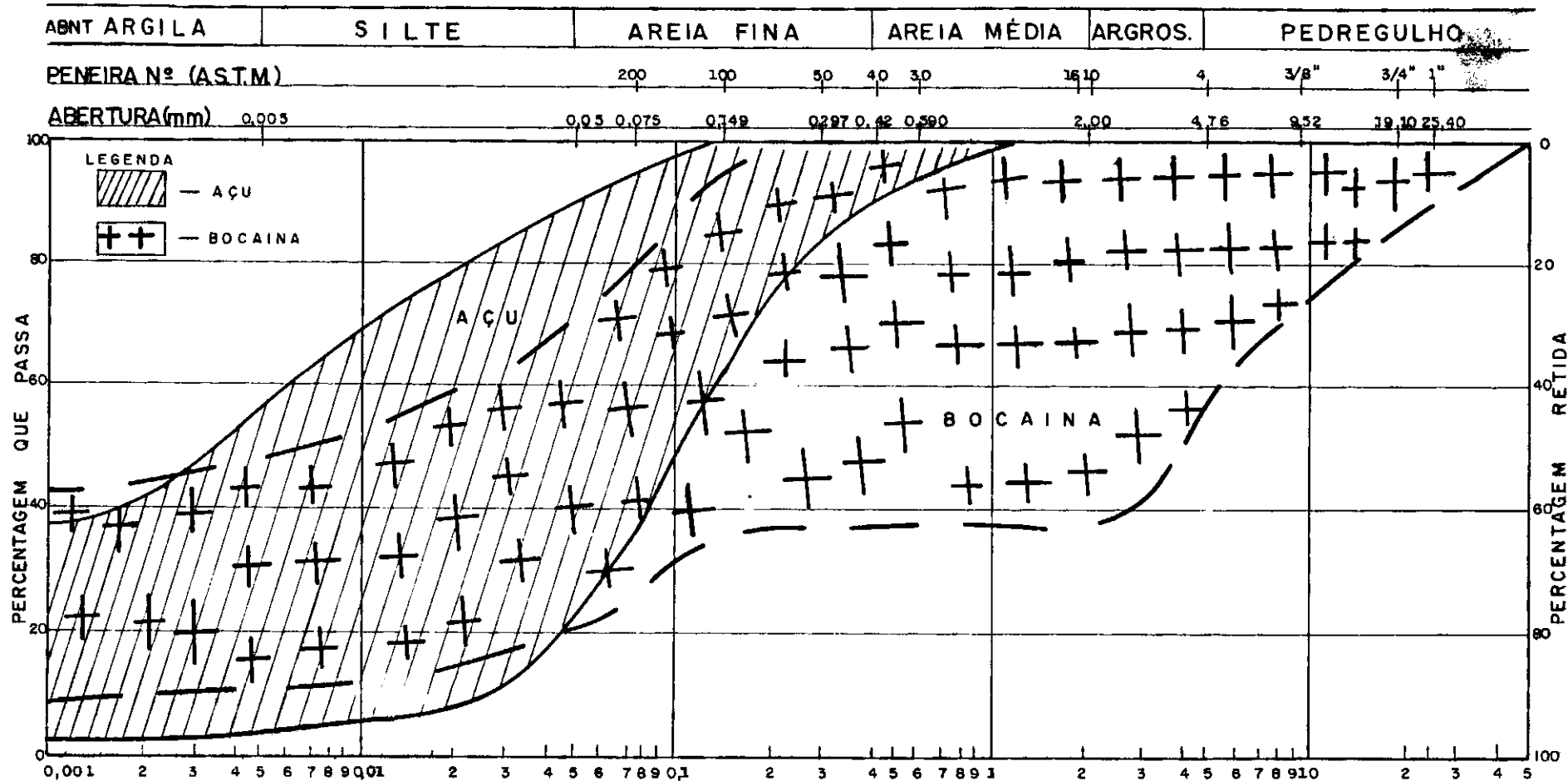


FIG. II. 5 - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DE ALGUNS SOLOS EMPREGADOS EM BARRAGENS.



**FIG. II. 5a - FAIXAS GRANULOMÉTRICAS DOS SOLOS DAS BARRAGENS DE AÇÚ E BOCAINA**

### CAPÍTULO III

#### CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

#### III.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS ÁREAS DE EMPRÉSTIMO DA BARRAGEM ENGENHEIRO ARMANDO GONÇALVES (BARRAGEM DO AÇU)

##### III.1.1. Descrição do Projeto

A barragem do Açú, de acordo com o projeto, está construída sobre o rio Açú-Piranhas, pertencendo ao sistema hidrográfico do rio Piranhas no município de Açú, no Estado do Rio Grande do Norte. O local da barragem dista 190km da cidade de Natal e situa-se 6km a montante da cidade de Açú. A finalidade da obra é a regularização e perenização do rio, constituindo-se na principal fonte hídrica do projeto de irrigação do Baixo-Açú. A figura III.1 mostra um arranjo geral da obra.

A barragem é do tipo zonada e possui as seguintes características principais:

- Volume de acumulação	$2.400 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Extensão pelo coroamento	2.450m
- Volume de terra utilizado	$4.950.000 \text{ m}^3$
- Altura máxima	40m

O dique auxiliar possui altura de 19m, comprimento de 1.680m e volume de terra de  $530.000 \text{ m}^3$ .

Duas ensecadeiras, uma a montante e outra de fechamento do canal, foram incorporadas à barragem, tendo respectivamente alturas máximas de 14m e 16m, comprimentos de 600m e volumes de terra de  $516.000 \text{ m}^3$  e  $54.700 \text{ m}^3$ .

A geometria da barragem e a seção geológica do eixo barrável estão apresentadas nas figuras III.2a e III.2b.

### III.1.2. Geologia Local

O estudo da geologia local feito durante as investigações preliminares, indica, ao longo da calha do rio, desde o eixo da barragem até o Km 33 para montante, a presença de aluvões arenosos com espessura de 10m ou mais onde a rocha de embasamento não aflora.

O embasamento rochoso dentro do rio é constituído por intercalações de metacalcário preto e migmatito, com mármores de cor cinza-chumbo, que se tornam frequentes à medida que se afasta do eixo da barragem.

O embasamento rochoso da região é apresentado por rochas metamórficas pré-cambrianas (tais como gnaisses e migmatitos mica-xistos, granitos, calcários e mármores, quartzitos ) intensamente fraturados e dobrados, com intrusões de rochas básicas (basaltos e diabásios).

A deposição dos sedimentos na bacia Potiguar iniciou-se no período cretáceo com o arenito Açu, o qual apresenta fósseis somente nas camadas superiores, definindo assim um ambiente de deposição marinha.

O arenito Açu apresenta um ciclo completo de deposição clástica iniciando com conglomerados, seguidos de arenitos e folhelhos que apresentam na parte superior lentes de calcário.

As rochas intrusivas básicas, o basalto da margem direita do rio, os diques de diabásio da margem esquerda e os sedimentos da formação barreiras são de idade terciária.

Ocorrem também na região depósitos recentes de aluvões e dunas sendo estas últimas restritas a trechos da faixa litoranea. No local da barragem, os depósitos aluvionares assentam-se diretamente sobre as rochas metamórficas de idade pré-cambriana. O mapa geológico da área e a localização das jazidas estão apresentados na figura III.2c.



### III.1.3. Geologia das Áreas de Empréstimo

#### III.1.3.1. Área de Empréstimo nº 1

Na margem esquerda, cerca de 3Km da barragem, foi de terminada e caracterizada uma extensa ocorrência do arenito Açú-fácies conglomerática basal, hoje solo-residual, cuja classificação granulométrica tátil-visual é areia média siltosa , pouco argilosa, com seixos rolados dispersos, de granulometria variável de 1 até 10cm.

A superfície da área de empréstimo apresenta uma cama da de areia eluvionar, apresentando também em algumas áreas concentrações eluviais de seixos. Topograficamente, a área é bastante suave e dentro dela, em vários locais, aflora o embasamento rochoso migmático sobre o qual se assenta o arenito Açú. Em alguns locais, o embasamento é apresentado por corpos de anfibólio-biotita xisto decompostos, que promovem a formação de solos residuais argilosos em afloramentos estreitos de espessura pequena (menor que 1m) o que os torna inaproveitáveis como empréstimo para barragens deste porte.

As concentrações de seixos à superfície foram aproveitadas como proteção superficial do talude de jusante dos maciços compactados.

#### III.1.3.2. Área de Empréstimo nº 2

Situa-se à margem esquerda, dentro da calha do rio, cortada pelo eixo da barragem, com 70% de sua área a jusante do eixo. É constituída pelo terraço aluvionar superior, que é inundado todos os anos, durante as cheias, sendo topograficamente plano. Estruturalmente o material da área é constituído por intercalações de materiais clásticos de diferentes granulometrias, normalmente areia fina e argila, transportados pelas

águas do rio, sendo comum nos solos argilosos e siltosos certo teor de argila orgânica.

Abaixo da cota 21, inicia-se o terraço inferior que se caracteriza pela sua composição granulométrica - areias grossas e médias com pedregulho. Em certas áreas o terraço aluvionar superior se apoia diretamente sobre o embasamento rochoso, que em alguns pontos aflora como ilhas isoladas e alinhadas de acordo com a gnaissificação.

#### III.1.3.3. Área de Empréstimo nº 3

Localiza-se na margem direita, numa depressão estrutural, do embasamento, cerca de 500m para jusante do eixo, fora da linha de fluxo direto do rio, apresentando assim depósitos aluvionares clásticos mais finos, uniformes e argilosos, com baixo teor orgânico. Em alguns locais dentro desta área, o embasamento rochoso é uniforme e não aflora, sendo a área totalmente aproveitável.

#### III.1.3.4. Área de Empréstimo nº 4

Localiza-se na margem direita cerca de 15km à montante do eixo da barragem e a 20km do dique auxiliar.

Apresenta bastante uniformidade e maior concentração de clásticos finos que o empréstimo anterior, também com algum teor de matéria orgânica.

Das quatro áreas de empréstimo esta é a que apresenta o maior volume de solos argilosos os quais foram empregados também no maciço do dique auxiliar.

Do ponto de vista estratigráfico e granulométricos das camadas, as áreas de empréstimo 3 e 4 correspondem ao denominado terraço superior.

Na área de empréstimo nº 4, o embasamento rochoso aflora em vários locais.

Exceto a área nº 1, todas as outras são inundadas por ocasião das cheias do Rio Açu.

#### III.1.4. Propriedades Geotécnicas dos Solos de Em préstimo

##### III.1.4.1. Distribuição Granulométrica

Os solos da área de empréstimo nº 1, segundo o Projeto, são solos residuais do arenito Açu e apresentam uma composição granulométrica bem distribuída onde predominam frações grossas (areias e pedregulhos) em percentagem variável e pequena per  
centagem de argila.

Neste empréstimo agrupam-se solos de três tipos:

- areia fina a grossa, argilosa com pedregulhos, com  
preendendo partículas com dimensões desde pedregulho médio ou grosso, até argila, possuindo uma per  
centagem de finos entre 20 e 50%;
- pedregulhos arenosos, argilosos sujeitos a se  
grega  
ção;
- pedregulhos arenosos e areias com pedregulhos cor  
res  
pondendo à fração grosseira dos materiais anteriores com pequena percentagem de argila, menor que 5%.

Os solos das áreas de empréstimo 2, 3 e 4 possuem a mesma origem geológica, ou seja, são solos sedimentares alu  
vio  
nares, sendo tratados como um mesmo conjunto de materiais que se divide basicamente em dois tipos:

- siltes argilosos com areia ou areias siltosas, sendo que este material apresenta-se com maior percentagem de areia no empréstimo nº 2. De um modo geral, há uma fração predominante de siltes e observa-se, também, a ocorrência de traços de matéria orgânica;
- areias de granulação variada, siltosas, pouco argilosas - este tipo de solo foi encontrado em maior quantidade na área de empréstimo nº 2 aparecendo intercalado com camadas de siltes arenosos e argilas siltosas, e pertence ao grupo (SM) da classificação unificada. Na figura III.3 são apresentadas curvas granulométricas das áreas de empréstimo, ressaltando-se as curvas obtidas para o material estudado.

#### III.1.4.2. Características de Plasticidade

Os valores de limite de liquidez e do índice de plasticidade, dos materiais das áreas de empréstimo, fornecidos pelo DNOCS, estão apresentados na figura III.4, ressaltando-se os pontos obtidos no presente trabalho.

Os finos da areia argilosa com pedregulho do empréstimo nº 1, segundo os ensaios de plasticidade foram enquadrados na classificação unificada como um solo do grupo CL.

Também a fração fina dos solos dos empréstimos 2, 3 e 4 foi classificada, segundo a classificação unificada, como argila de baixa plasticidade (CL), havendo em pequena quantidade amostras que, devido à percentagem de matéria orgânica, enquadram-se no grupo CH da Classificação Unificada.

#### III.1.4.3. Características de Compactação

A figura III.5 mostra o gráfico de densidade seca máxima ( $\gamma_{sm\acute{a}x}$ ) versus umidade ótima ( $w_{ot}$ ). Os resultados estão

apresentados por empréstimo e as duas curvas correspondentes às amostras ensaiadas para a elaboração deste trabalho estão apresentadas na figura IV.1, no capítulo seguinte.

Para as amostras dos empréstimos compactadas com a energia do Proctor Normal, observa-se que os dados de  $\gamma_{sm\acute{a}x}$  e  $w_{ot}$  abrangem uma ampla faixa de valores, ficando porém definidas duas regiões distintas: uma de umidades ótimas baixas (8 a 12%) e densidades secas máximas elevadas ( $1,85$  a  $2,0 \text{ KN/m}^3 \times 10^{-1}$ ) correspondente, em sua maior parte, aos materiais da área de empréstimo nº 1; e outra região com faixa de valores bem amplas correspondente aos materiais dos empréstimos 2, 3 e 4. No entanto, para os solos da área de empréstimo nº 2, os pesos específicos máximos variaram entre 1,75 e  $1,92 \text{ KN/m}^3 \times 10^{-1}$  e as umidades ótimas entre 11 e 16,5%; para os solos dos empréstimos nºs 3 e 4, estes valores se encontram na faixa de 1,6 a  $1,85 \text{ KN/m}^3 \times 10^{-1}$  e 12 a 22%, respectivamente.

#### III.1.4.4. Características de Resistência

Para determinar a resistência dos materiais dos empréstimos, foram executados ensaios triaxiais sob várias condições de solicitação (triaxiais rápidos e triaxiais adensados rápidos com medida de pressões neutras e triaxiais lentos). Os resultados obtidos durante a análise das jazidas foram fornecidos pelo DNOCS para a elaboração deste trabalho e estão apresentados nas figuras III.6.a, III.6.b, III.7.a, III.7.b e III.8.

De acordo com os dados, observou-se que a areia fina a grossa argilosa com pedregulhos do empréstimo 1 apresenta valores combinados de coesão e ângulo de atrito em termos de tensão efetivas elevados; no entanto, a coesão é maior que a esperada, enquanto que o ângulo de atrito apresenta valores inferiores ao esperado para este tipo de material, com base em sua granulometria.

Os parâmetros de resistência obtidos para o material dos empréstimos 2,3 e 4 nos ensaios triaxiais rápidos indicam uma elevada resistência média com uma maior parcela devida à coesão, sendo o ângulo de atrito relativamente baixo. Os resultados dos ensaios triaxiais adensados-rápidos apresentam uma ampla faixa de variação, notando-se que a amostra Pl8, do empréstimo 4, apresentou comportamento predominantemente coesivo, enquanto que as amostras Pl00, do empréstimo 2 e Pl6, do empréstimo 4, apresentam predominância de resistência por atrito. A amostra P93 do empréstimo 2, tanto nos ensaios rápidos quanto nos adensados rápidos, fornecem parâmetros de resistência elevados sendo a maior parcela devida ao atrito.

Os dados de resistência dos materiais ensaiados fornecidos pelo DNOCS estão resumidos na tabela III.1 e no capítulo seguinte serão apresentados os dados obtidos, no presente trabalho, através dos ensaios realizados em duas amostras do material utilizado no núcleo da barragem.

### III.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DAS ÁREAS DE EMPRÉSTIMO DA BARRAGEM DE BOCAINA

#### III.2.1. Descrição do Projeto

A Barragem de Bocaina localiza-se sobre o leito do Rio Guaribas, a montante das cidades de Bocaina e Picos, no Estado do Piauí, distando cerca de 6km da primeira e 27km da segunda. Suas finalidades são o abastecimento d'água e a regularização de vazão e irrigação.

A barragem é do tipo zonada, em terra compactada, com o núcleo em material impermeável e espaldares em solo semi-permeável. Possui as seguintes características principais:

- Volume d'água acumulado  $106 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Área inundada 1.100ha

- Extensão pelo coroamento	356m
- Largura do coroamento	13m
- Altura máxima	57,5m
- Nível d'água máximo	48m
- Volume do maciço	1.500.000m <sup>3</sup>
- Inclinação dos taludes:	
montante	1: 3,5
jusante	1: 3 e 1: 2,5

O arranjo geral das obras e uma secção típica da barragem estão apresentadas nas figuras III.9 e III.10, respetivamente.

### III.2.2. Geologia Local

De acordo com o projeto, baseado em levantamento bibliográfico sobre a geologia da faixa sudoeste do Estado do Piauí, pode-se dizer que esta região é composta por três pacotes sedimentares sub-horizontalizados com um leve mergulho para Oeste.

As rochas representativas de cada pacote afloram ao longo de uma faixa de direção N-S e são denominadas Formação Serra Grande, Formação Pimenteiras e Formação Cabeças.

A Formação Serra Grande é composta por um pacote sedimentar de arenitos brancos com cimentação calcífera, granulação grosseira, apresentando leitos conglomeráticos e em certas regiões aparecem intercalações de siltitos e folhelhos. Esta formação aflora ao longo de uma faixa N-S, com largura variável ao longo da fronteira dos Estados do Piauí e Ceará.

A Formação Pimenteiras é composta por um pacote sedimentar de folhelhos vermelhos, apresentando intercalações de arenitos e siltitos de coloração cinza claro. Esta formação

também aflora na direção N-S. Como seu caráter litológico é vulnerável à erosão, ocorre comumente em fundos de vales, ficando às vezes preservada quando está capeada pela Formação Cabeças, que é a mais resistente.

A Formação Cabeças é composta de arenitos com cores claras; às vezes chegando a vermelho, granulação fina e média, apresentando um aspecto meciço devido à espessa estratificação, e em certos locais mostra intercalações de siltitos e folhelhos laminados de cores claras.

A topografia da região é composta predominantemente por uma paisagem de morros com relevo tabulares, ocorrendo à Este um relevo em forma de cuestas.

Esta topografia é típica da atuação de processos erosivos sobre o pacote de rochas horizontalizadas com estruturas concordantes.

A geologia da área de implantação das obras é composta pela Formação Cabeças, sendo que no fundo dos vales ocorrem alguns afloramentos da Formação Pimenteiras. O mapa geológico da área e a localização das jazidas estão apresentadas na figura III.11.

Os vales principais, alargados pela diminuição da erosão nas planícies e nos sopés das encostas, embora continuem profundos, têm um perfil suavizado em forma de U e apresentam uma abertura quase contínua de aluviões como está esquematizado na figura III.12.

Nas encostas do vale, ocorre uma massa do talus com espessura variando entre 2 e 4m, composto por blocos de rocha angulosos, envoltos em matriz areno-siltosa. Na planície ocorre um depósito aluvial composto por areia fina silto-argilosa avermelhada com lentes de material argiloso cinza, de espessura variando entre 10 e 15m.



A seção geológica esquemática do Rio Guaribas pode ser vista na figura III.12a e a do eixo barravel na figura III 12b.

Os solos da área, segundo o trabalho da SUDENE "Levantamento Exploratório dos Solos da Bacia do Parnaíba", são solos litólicos pedregosos e rochosos, sitos em relevos do tipo suavemente ondulado, ondulado e fortemente ondulado. Os solos brunos não cálcicos de textura argilosa, também pedregosos, aprecem associados aos solos litólicos nos locais onde o relevo é mais suave. Ocorrem também solos latossólicos em chapadas elevadas. No entanto, a faixa de solo aluvial é a de maior interesse.

De acordo com o trabalho da SUPLAN-MA "Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Piauí", ocorrem também na área associação de latossol vermelho-amarelo de textura média com areias quartzosas, ambos em um relevo plano e suavemente ondulado correspondente às chapadas da região.

### III.2.3. Propriedades . . Geotécnicas dos solos dos Empréstimos

#### III.2.3.1. Distribuição Granulométrica

Os solos dos empréstimos da Barragem de Bocaina apresentam uma composição granulométrica aberta, onde nota-se a ausência de areia fina e média e a presença de pedregulho fino e médio em percentagem de até 40%. A percentagem de finos dos materiais varia entre 20 e 70% sendo que a percentagem de argila varia entre 10 e 50%. As curvas granulométricas dos materiais estão apresentadas na figura III.13..

#### III.2.3.2. Características de Plasticidade

Os valores dos limites de liquidez (LL) e índice de Plasticidade (IP) dos materiais pesquisados nos empréstimos

fornecidos pela COTEC situam-se ao longo da linha "A", sendo enquadrados dentro da classificação unificada como argila de baixa plasticidade (CL) quando situam-se acima da linha "A", ou silte de baixa plasticidade (ML) quando situam-se abaixo da linha "A". Algumas amostras do empréstimo 10 (E 10) têm valores de LL e IP situados à direita da linha "B" e logo abaixo da linha "A", sendo classificados como silte de média a alta plasticidade (MH). O gráfico de plasticidade onde estão apresentados os valores de LL e IP pode ser visto na figura III.14.

#### III.2.3.3. Características de Compactação

Os valores de densidade seca máxima e umidade ótima de dezenas de ensaios feitos no laboratório da obra, estão apresentados na figura III.15, para os diversos empréstimos.

Para as amostras dos diferentes empréstimos compactadas com a energia do Proctor Normal, observa-se que os dados de  $\gamma_{smax}$  e wot variam numa faixa bastante ampla de valores. No entanto nota-se que as amostras do empréstimo (E 18), cujos finos são classificados como material ML pela Classificação Unificada, apresentam os maiores valores de  $\gamma_{smax}$  entre 1,77 e 2,07 Mg/m<sup>3</sup> e os menores valores de wot entre 9 e 15%. As amostras do empréstimo (E10) cujos valores de LL e IP situam-se na região do material MH, apresentam os menores valores de  $\gamma_{smax}$  entre 1,56 e 1,80 Mg/m<sup>3</sup> e os maiores valores de wot entre 14,6 e 20,6%. As amostras das demais jazidas apresentavam valores de  $\gamma_{smax}$  e wot intermediários e variando dentro de uma faixa ampla de valores. As curvas de compactação correspondentes as duas amostras ensaiadas na elaboração deste trabalho estão apresentadas na figura IV.1 do capítulo seguinte.

#### III.2.3.4. Características de Resistência

Com a finalidade de determinar as características de resistência dos materiais dos empréstimos, foram feitos en

saos triaxiais sob várias condições de solicitação (triaxiais rápidos e triaxiais adensados rápidos) e ensaios de cisalhamento direto. Os resultados obtidos foram fornecidos pela Laboratório de Solos e Instrumentação da Universidade Federal de Pernambuco e estão apresentados nas figuras III.16, III.17.a, III.17.b e III.18.

De acordo com os dados obtidos, observou-se que as amostras do empréstimo (E.10), por serem mais plásticas, apresentam baixos valores de resistência em termos de tensão efetiva, se comparados com os demais, sendo a maior parcela de resistência devida ao atrito.

Os parâmetros de resistência obtidos para as demais amostras dos outros empréstimos nos ensaios triaxiais rápidos apresentaram uma resistência média elevada, sendo que em algumas a parcela maior é devida ao atrito e em outras, à coesão. Nos ensaios adensados rápidos os parâmetros de resistência obtidos para todas as amostras apresentaram-se elevados, sendo que predomina a resistência por atrito.

Com relação ao ensaio de cisalhamento direto realizado, a resistência da amostra do furo nº 15 do empréstimo 15 (E15/15) obtida foi elevada, sendo sua maior parcela devida ao atrito, o que está de acordo com as características granulométricas do material ensaiado.

Os dados de resistência dos materiais ensaiados estão resumidos na tabela III.2 e dados obtidos através de ensaios realizados com duas amostras do empréstimo 24 (E 24) serão apresentados no capítulo seguinte.

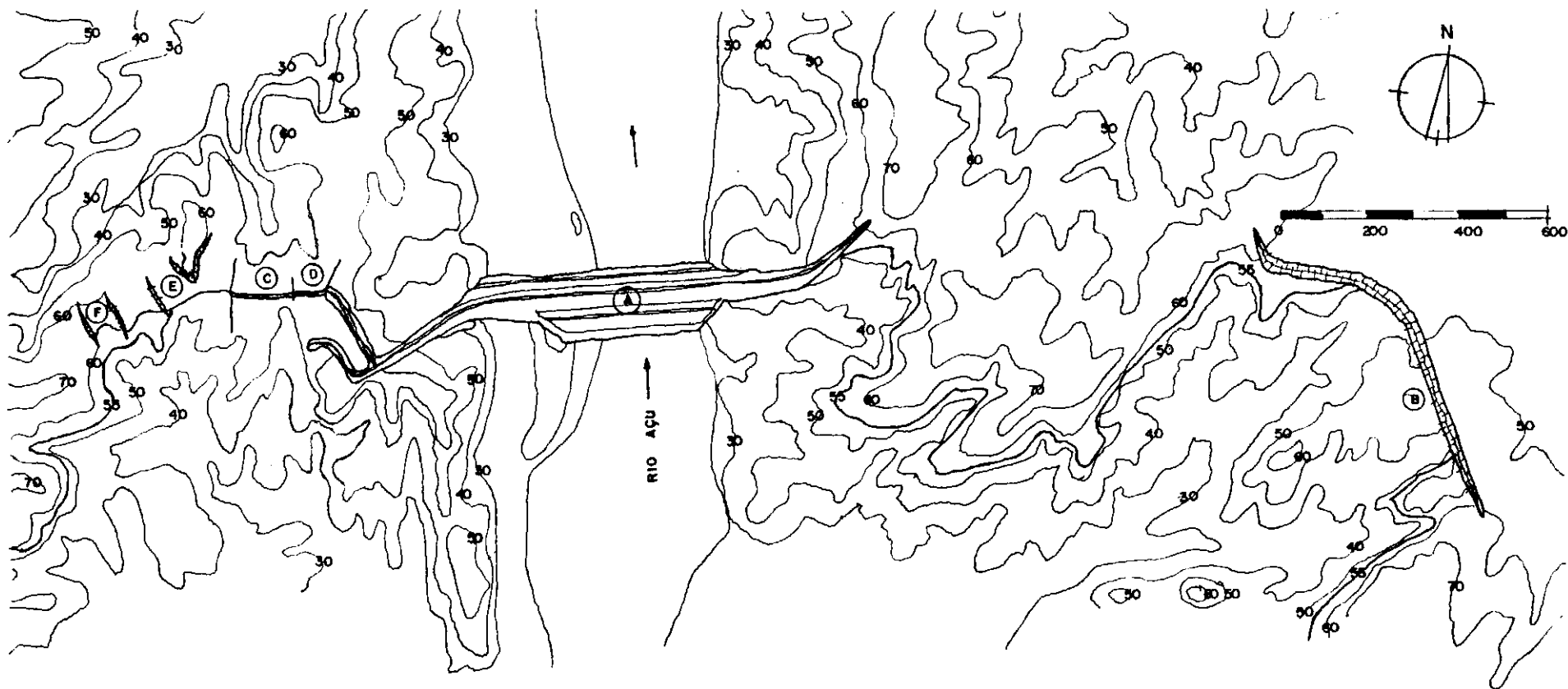
POÇO	AMOSTRA	EMPRESA TIPO	ENSAIO $\overline{UU}$				ENSAIO $\overline{CU}$				ENSAIO CD	
			$C_u$ (KPa)	$\phi_u$	$C'$ (KPa)	$\phi'$	$C_u$ (KPa)	$\phi_u$	$C'$ (KPa)	$\phi'$	$C'$ (KPa)	$\phi'$
P2/5	A <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	110	21°	70	28°	-	-	-	-	20	33°
P2/6	A <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	130	19°	0	36°	180	9°	150	20°	20	33°
P4/4	A <sub>2,1</sub>	E <sub>1</sub>	200	14°	160	16°	0	20°	0	41°	-	-
P4/4	A <sub>2,2</sub>	E <sub>1</sub>	150	19°	90	26°	0	18°	3	18°	-	-
P93	A <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	50	32°	30	33°	140	31°	20	35°	-	-
P100	A <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>	160	20°	90	29°	20	14°	0	32°	-	-
P16/6	A <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	170	9°	110	17°	0	20°	20	28°	-	-
P18	A <sub>2</sub>	E <sub>4</sub>	120	16°	80	21°	120	16°	46	18°	-	-

TABELA III.1 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS DOS EMPRÉSTIMOS DA BARRAGEM ENGENHEIRO ARMANDO GONÇALVES, FORNECIDOS PELO DNOCS.

EMPRESTIMO	AMOSTRA	ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$				ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO (*)	
		$C_u$ (KPa)	$\phi_u$	$C_u$ (KPa)	$\phi_u$	$C'$ (KPa)	$\phi'$	C	$\phi$
E10	10	120	0°	40	16°	25	20°	-	-
E15	6	100	13°	25	15°	30	22°	-	-
	3A	230	4°	85	12°	30	33°	-	-
	15	-	-	-	-	-	-	35	39°
E17	15	-	-	25	18°	5	30°	-	-
	27	-	-	25	11°	20	19°	-	-
E18	18	-	-	50	11°	35	24°	-	-
	35	-	-	10	13°	5	29°	-	-
E21	4	-	-	32	12°	25	22°	-	-
	10	-	-	20	10°	20	21°	-	-

(\*) Cisalhamento Direto Rápido não Saturado

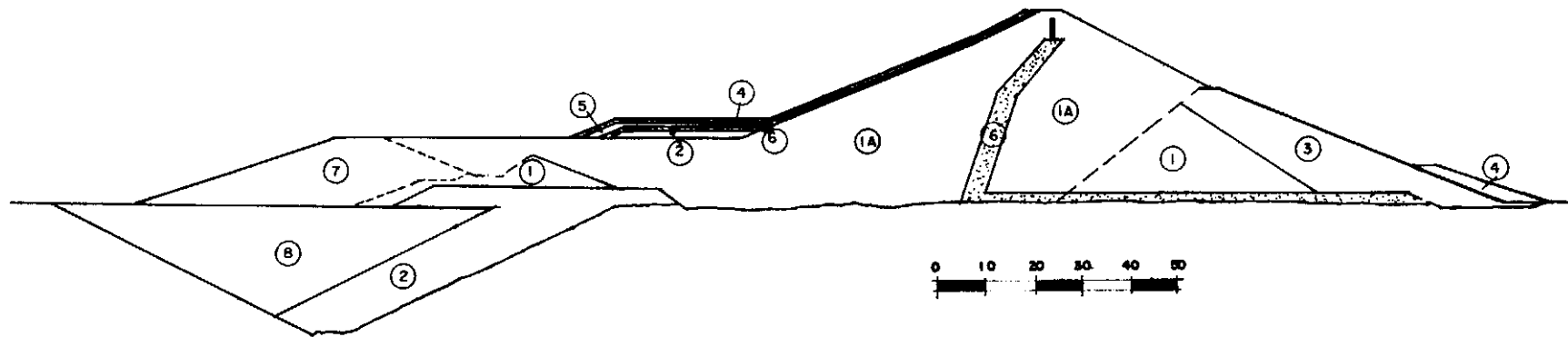
TABELA III.2 - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS DOS EMPRESTIMOS DA BARRAGEM DE BOCAINA FORNECIDOS PELO LSI/UFPE.



A BARRAGEM PRINCIPAL  
B DIQUE AUXILIAR  
C VERTEDOIRO PRINCIPAL

D DIQUE FUSVEL  
E DIQUE TRANSBORDAVEL 1  
F DIQUE TRANSBORDAVEL 2

FIG.III.1 ARRANJO GERAL DAS OBRAS DA BARRAGEM DO AÇU



1 AREIA FINA E GROSSA ARGILOSA COM PEDREGULHO

1A AREIA FINA E GROSSA ARGILOSA COM PEDREGULHO (COMPACTADA NA RECONSTRUÇÃO)

2 ARGILA SILTOSA PRETA

3 PEDREGULHO ARENOSO

4 ENRROCAMENTO

5 TRANSIÇÃO

6 FILTROS

7 ENSECADEIRA

8 REATERRO COM AREIA COMPACTADA

FIG. III. 2ª SECÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DO AÇU

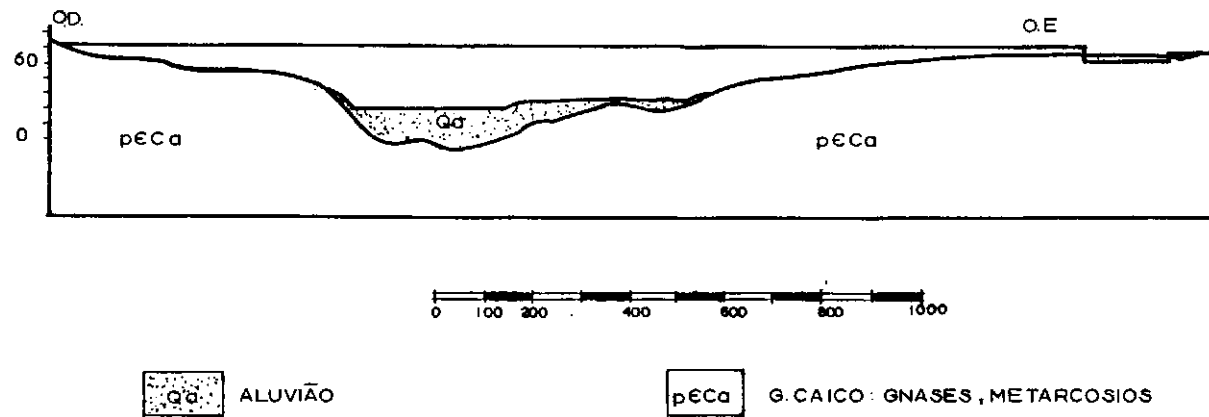
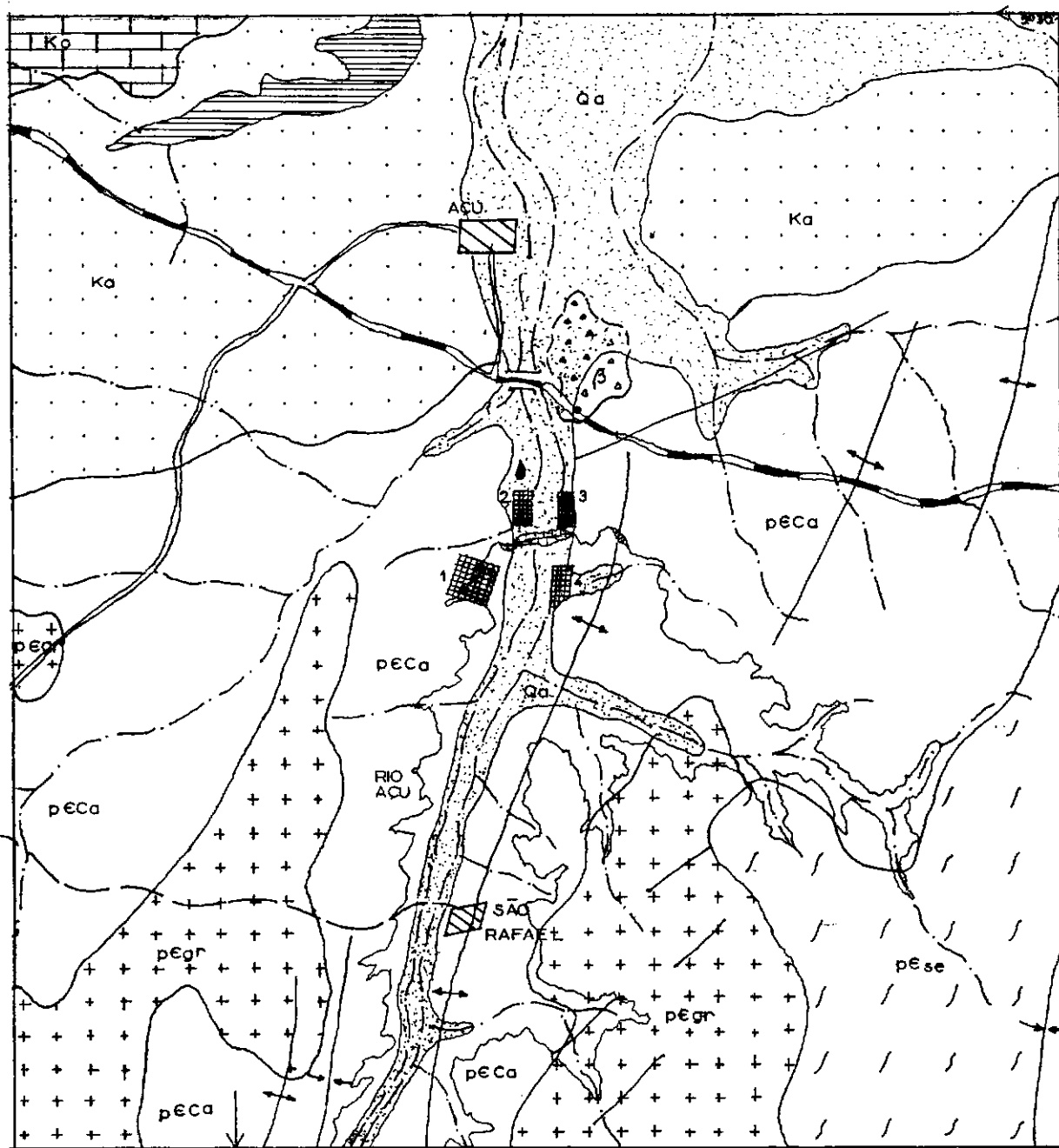


FIG.III 2b SEÇÃO GEOLÓGICA DO EIXO BARRAVEL DO AÇU





## CONV. CARTOGRÁFICAS

- RIO OU RIACHO
- LAGOA
- ROD. FED. PAVIMENTADA
- ROD. EST. PAVIMENTADA
- ESTRADA SECUNDÁRIA
- CIDADE
- BARRAGEM
- JAZIDA DE MAT. TERROSO

## CONV. GEOLÓGICAS

- ALUVIÃO
- BASALTO
- F. JANDAÍRA : CALCÁRIO
- F. AÇU: ARENITO
- F. SERIDÓ : MICAXISTO
- G. CAICO: GNAISSES, METARCOSIOS
- GRANITOS
- ANTICLINAL
- SINCLINAL
- FRATURA

**FIG. III.2c — MAPA GEOLÓGICO E LOCALIZAÇÃO DAS JAZIDAS BARRAGEM DO AÇU**

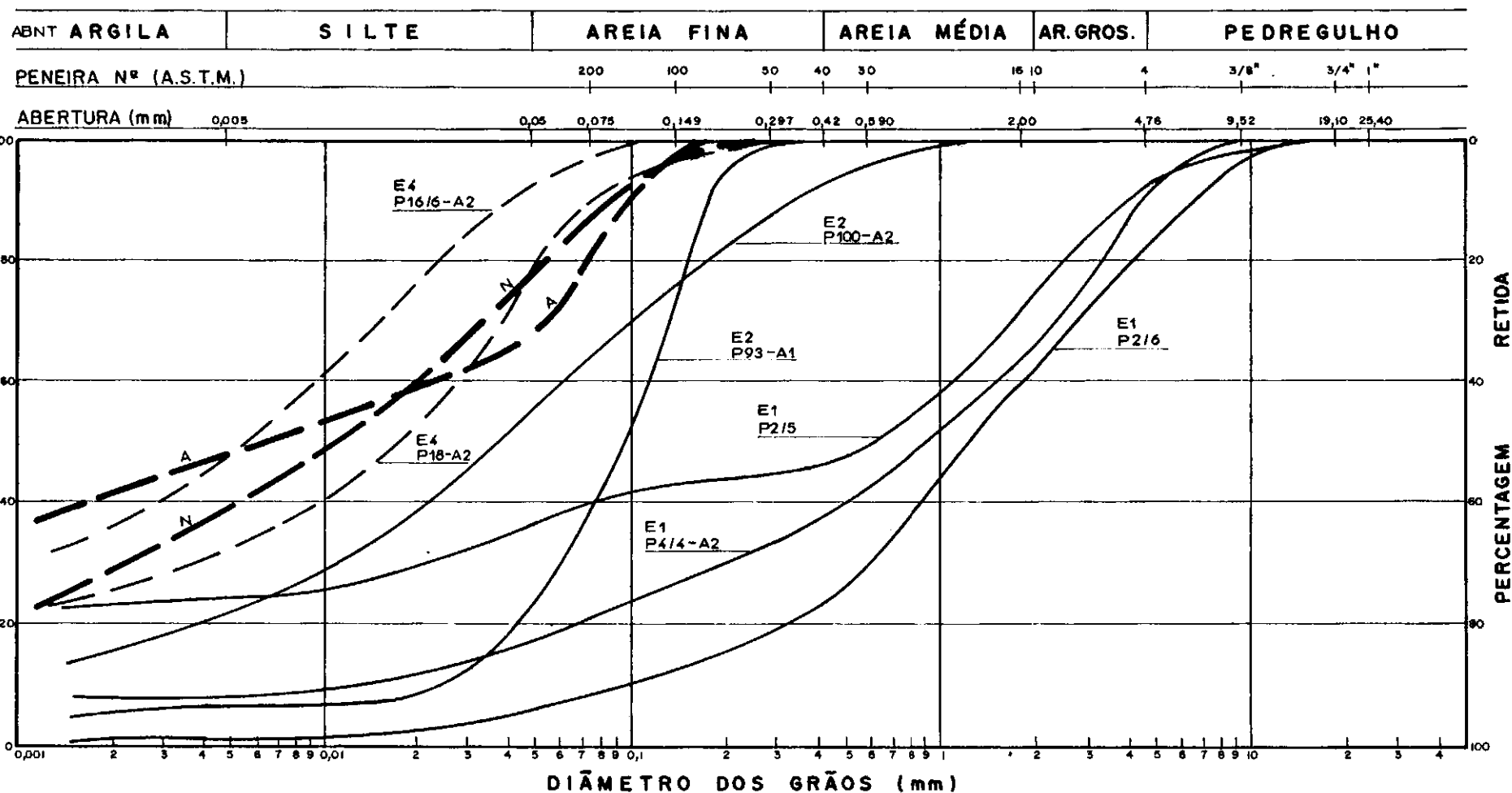
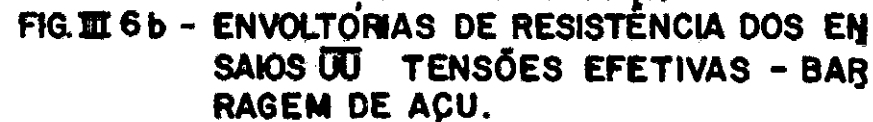
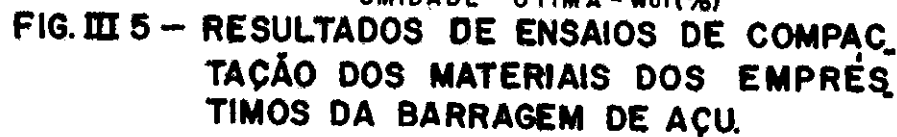
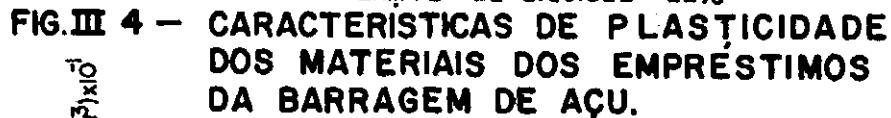


FIG. III.3 — CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS DOS EMPRÉSTIMOS DA BARRAGEM DO AÇÚ .



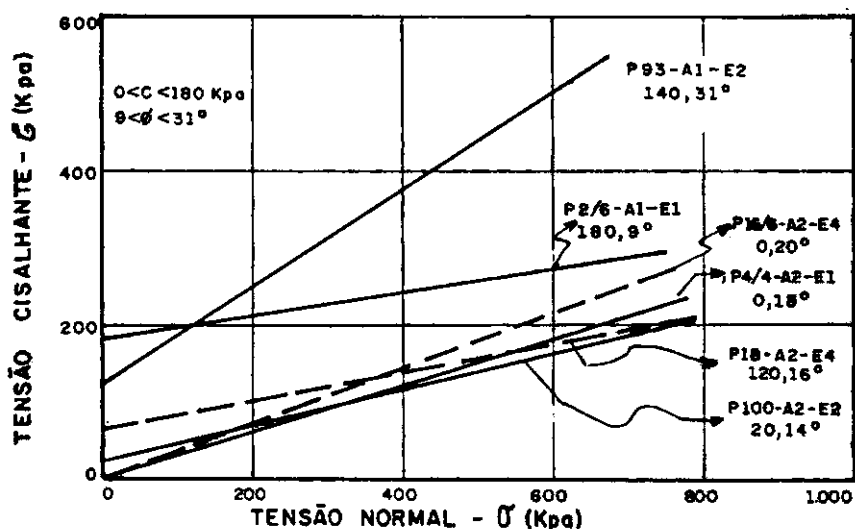


FIG. III 7a - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS  $\bar{\sigma}$  TENSÕES TOTAIS — BARRAGEM DE AÇU.

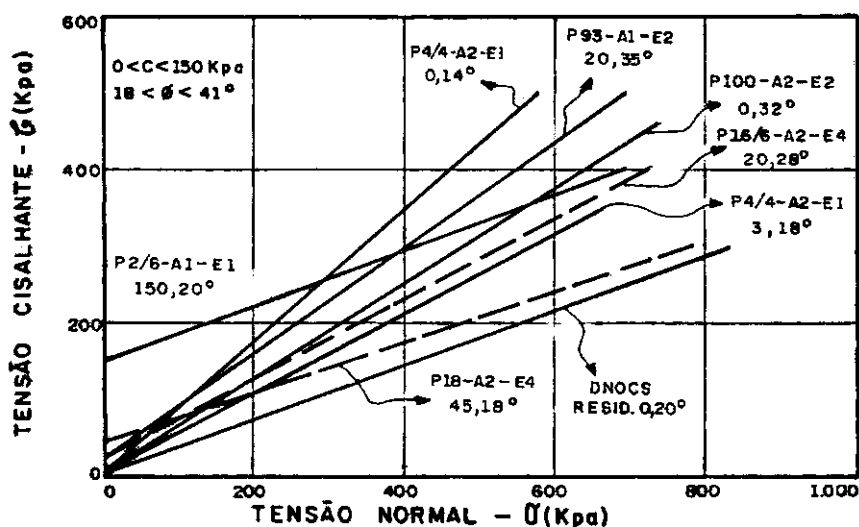


FIG. III 7b - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS  $\bar{\sigma}$  TENSÕES EFETIVAS — BARRAGEM DE AÇU.

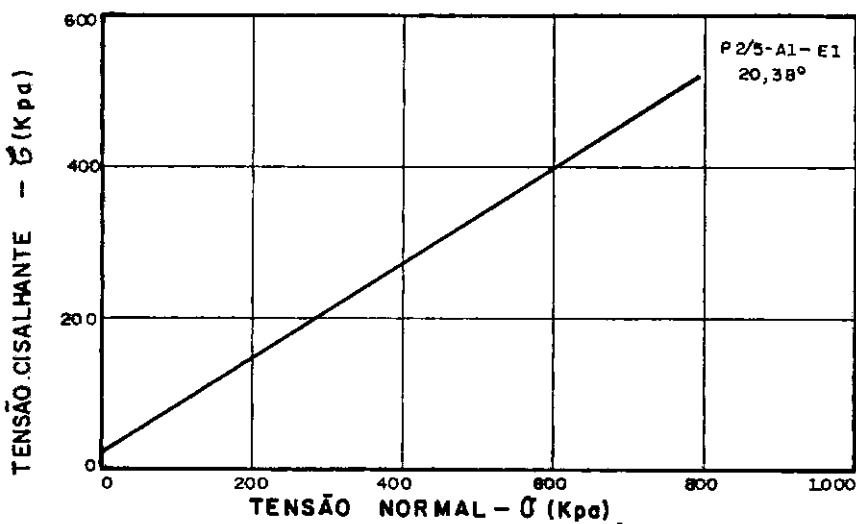


FIG. III 8 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS  $\bar{\sigma}$  TENSÕES EFETIVAS — BARRAGEM DE AÇU.

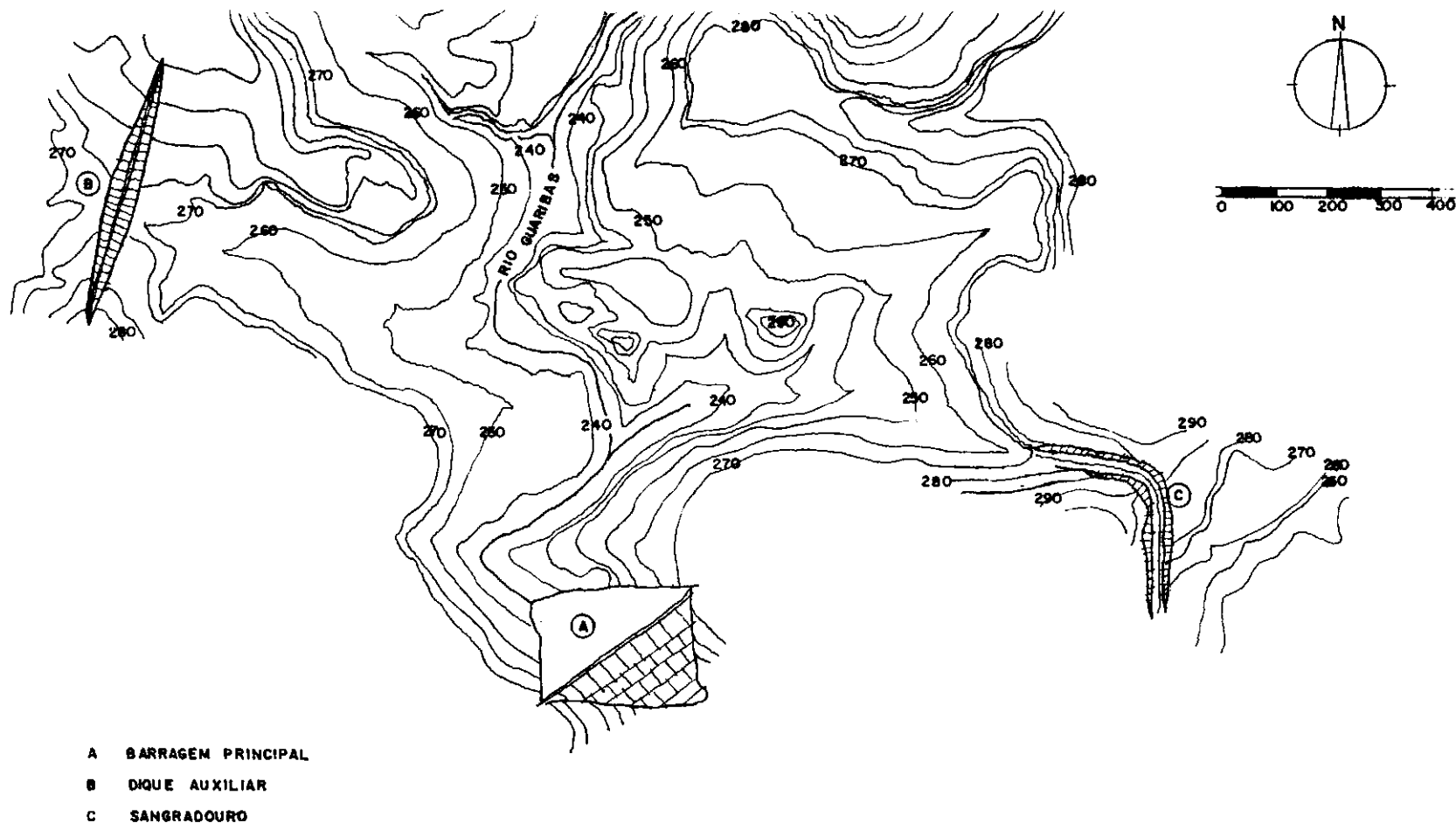


FIG.III.9 ARRANJO GERAL DAS OBRAS DA BARRAGEM DE BOCAINA

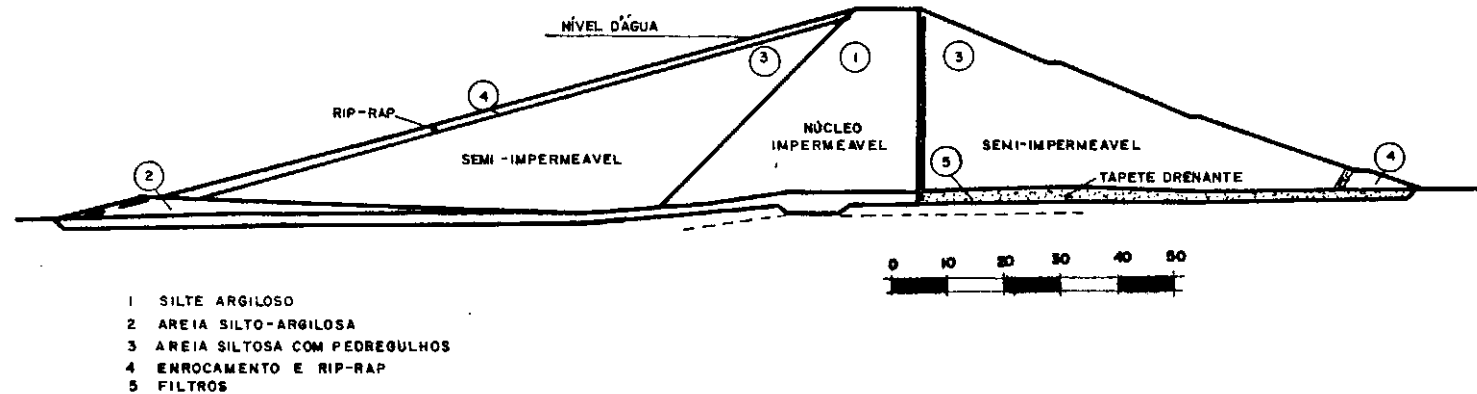
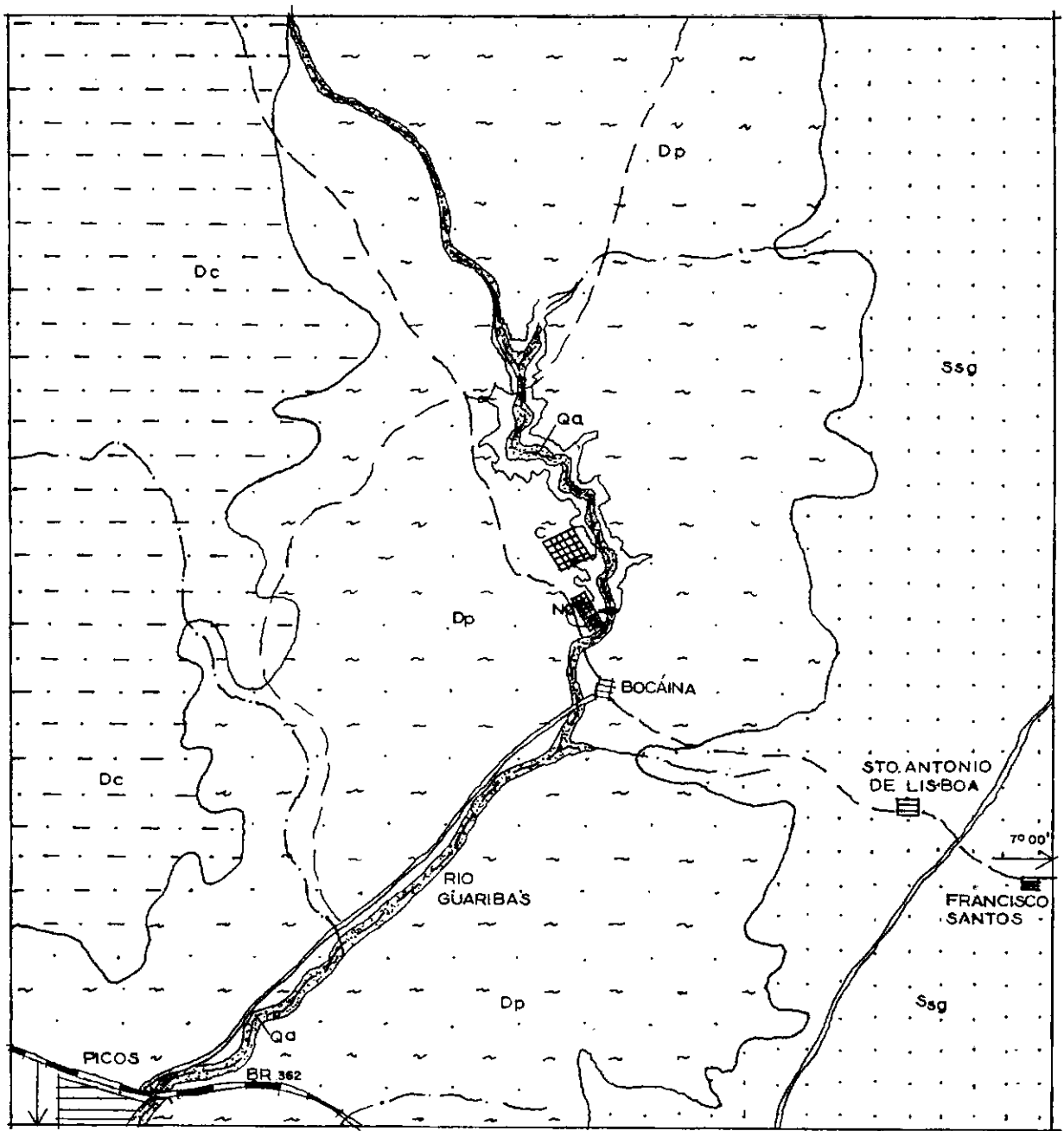


FIG. III.10 SEÇÃO TRANSVERSAL DA BARRAGEM DE BOCAINA



CONV. CARTOGÁFICAS

CONV. GEOLÓGICAS



RIO OU RIACHO



ROD. FED. PAVIMENTADA



ROD. EST. PAVIMENTADA



ESTRADA SECUNDÁRIA



CIDADE



BARRAGEM E BACIA HIDRÁULICA

JAZIDA DE MAT. C: CONVECIONAL  
TERROSO NC: NÃO CONVENC.

ALUVIÃO



F. CABEÇAS ARENITOS, SILTITOS

F. PIMENTEIRAS ARENITOS, SILTITOS  
FOLHELHO

F. SERRA G. ARENTO CONGLOMERÁTICO



CONTATO LITOLÓGICO

**FIG. III.II — MAPA GEOLÓGICO E LOCALIZAÇÃO DAS JAZIDAS  
BARRAGEM DE BOCAÍNA**

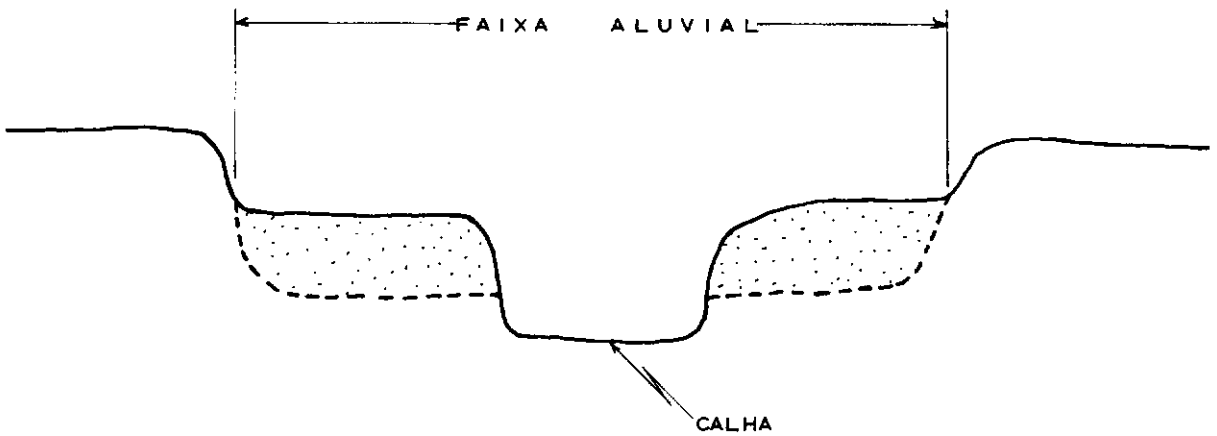
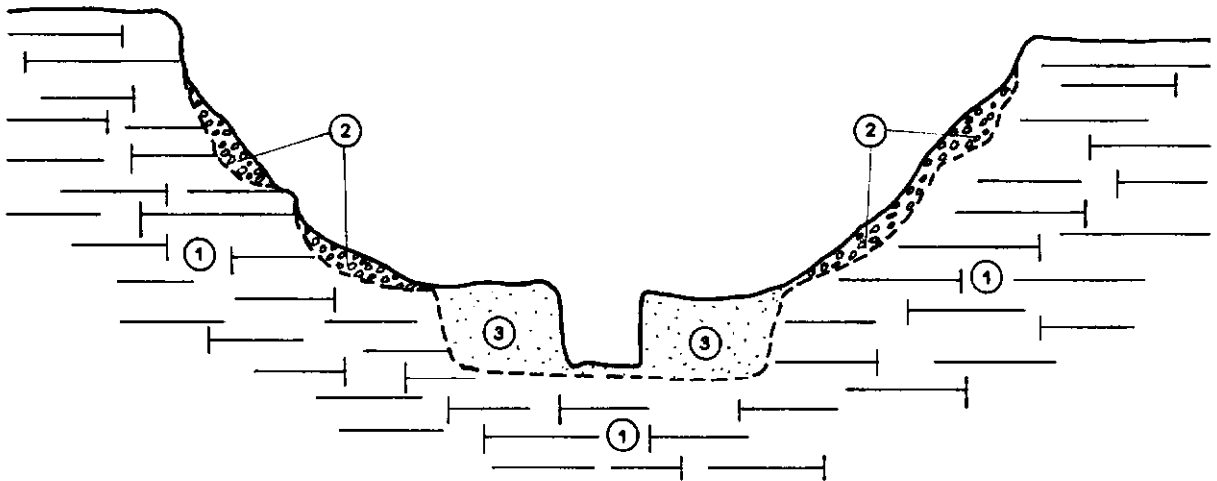


FIG. III.12 — CROQUI ESQUEMÁTICO DA FAIXA ALUVIAL DO RIO GUARIBAS .



- SUPERFÍCIE DO TERRENO
- TOPO ROCHOSO PROVÁVEL
- ① — ARENITO — granulação fina a média, coloração esbranquiçada e avermelhada com intercalações de silto e folhelho .
- ② — TALUS — blocos de rocha em matriz silto-arenosa .
- ③ — ALUVIÃO — areia fina silto-argilosa marrom avermelhada com lentes de material argiloso .

FIG. III.12a — SECÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DO RIO GUARIBAS .



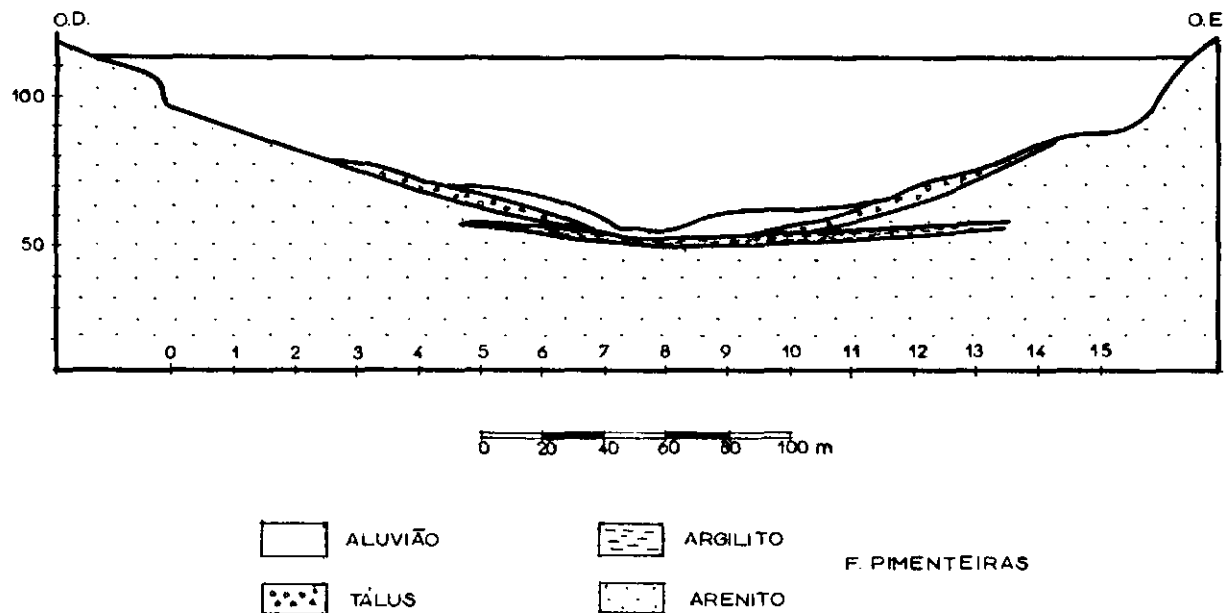


FIG. III.12b SEÇÃO GEOLÓGICA DO EIXO BARRAVEL DE BOCAINA

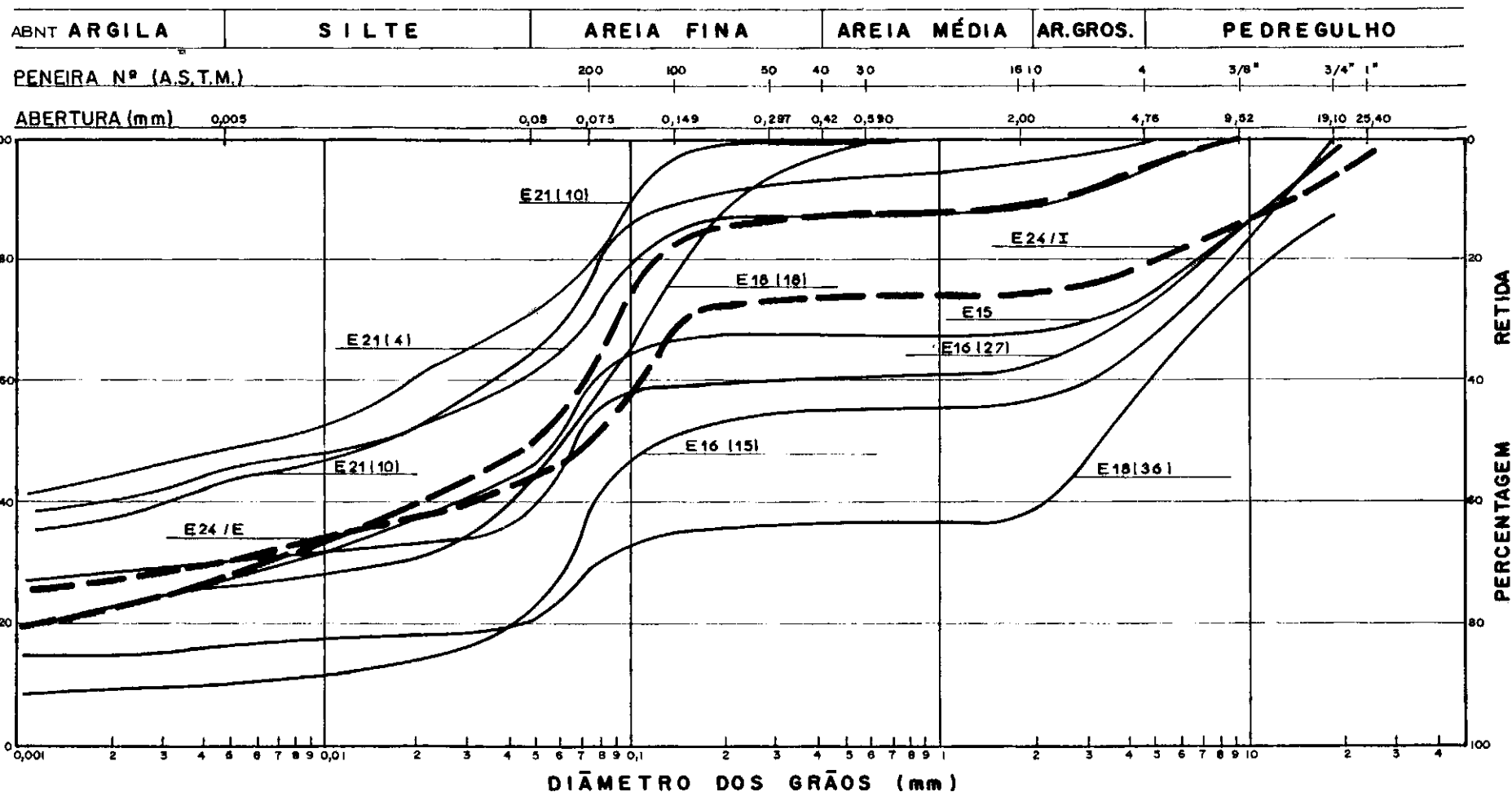
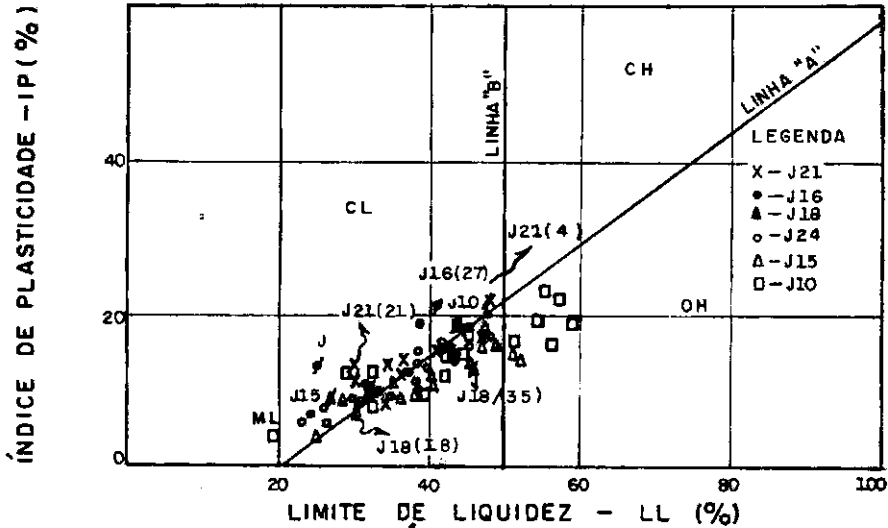
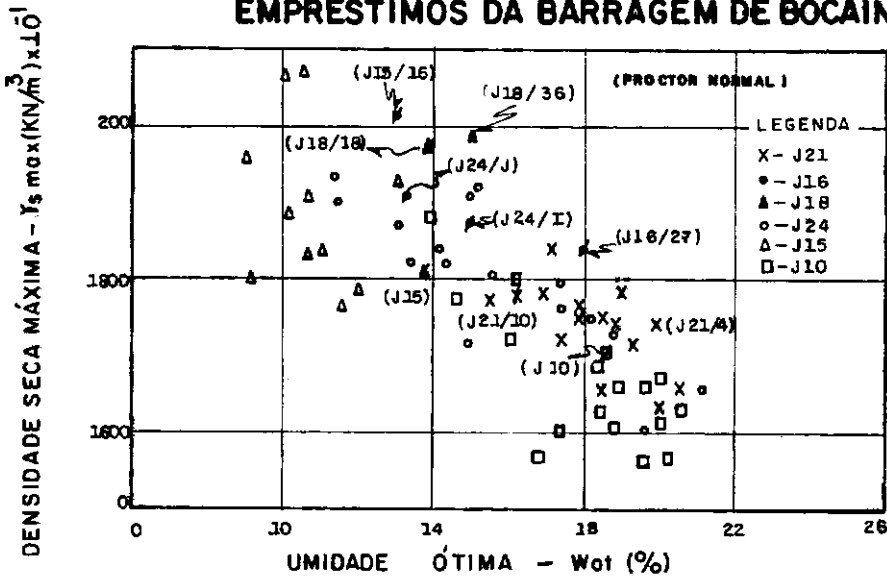


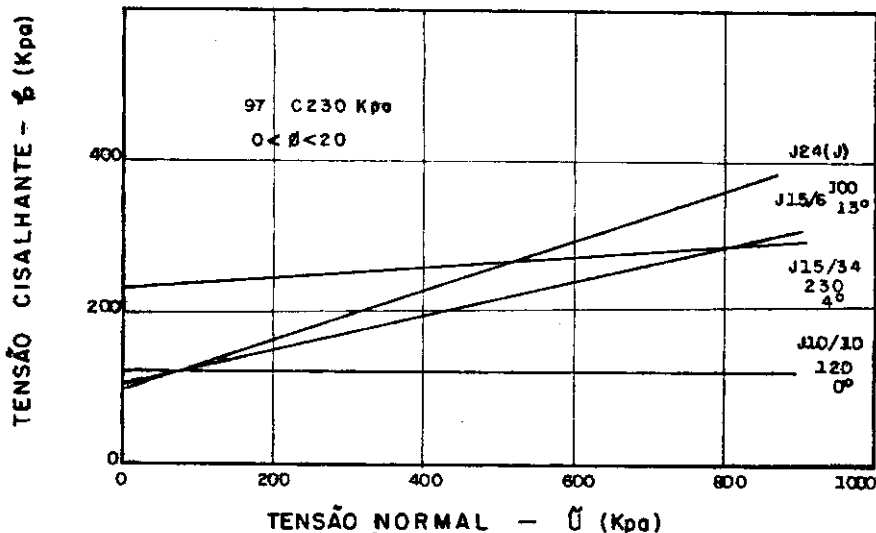
FIG. III.13 — CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS DOS EMPRÉSTIMOS DA BARRAGEM DE BOCAINA .



**FIG. III 14 - CARACTERÍSTICAS DE PLASTICIDADE DOS MATERIAIS DOS EMPRÉSTIMOS DA BARRAGEM DE BOCAINA.**



**FIG. III 15 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO DO MATERIALS DOS EMPRÉSTIMOS DA BARRAGEM DE BOCAINA.**



**FIG. III 16 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS UU - BARRAGEM DE BOCAINA.**

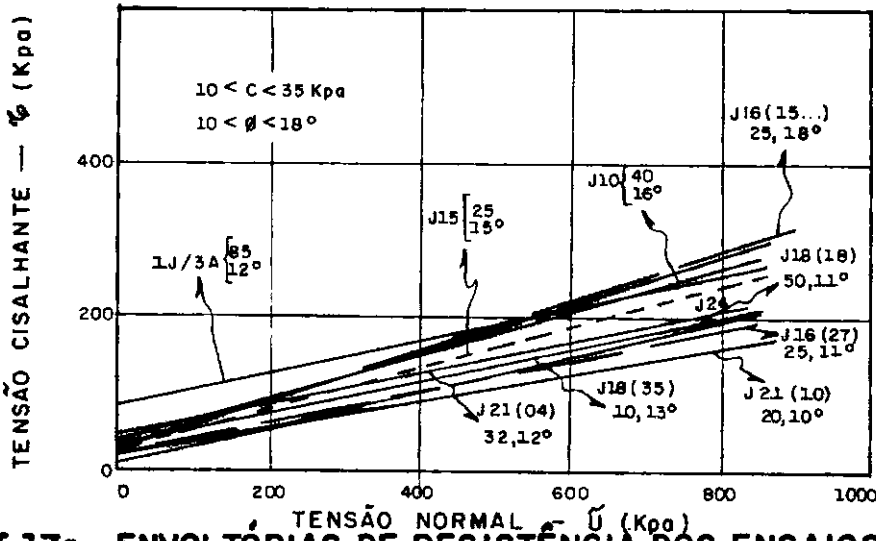


FIG. III 17a - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS  $\overline{C\bar{U}}$ -TENSÕES TOTAIS - BARRAGEM DE BOCAINA.

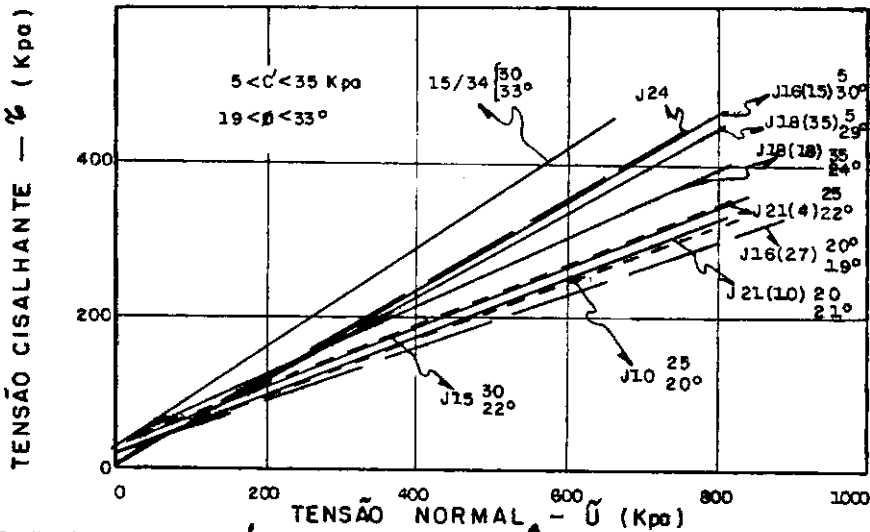


FIG. III. 17b - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS  $\overline{C\bar{U}}$ -TENSÕES EFETIVAS - BARRAGEM DE BOCAINA.

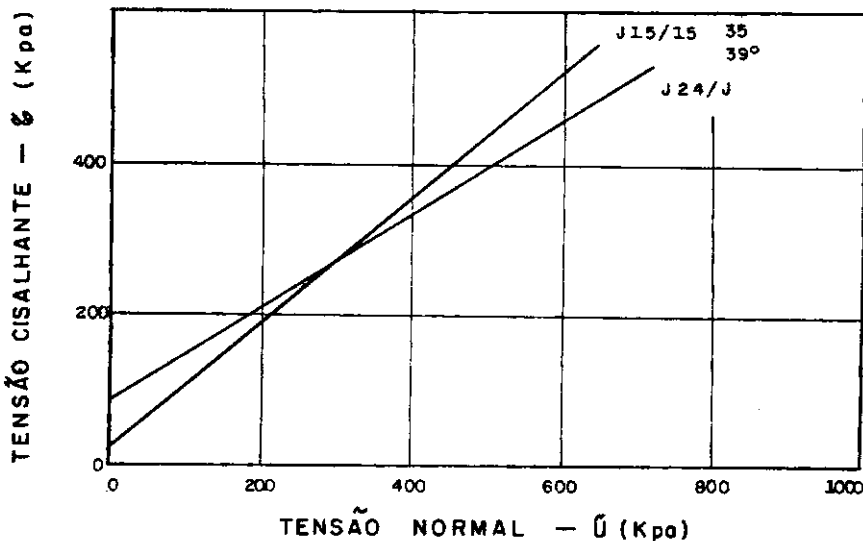


FIG. III 18 - ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS DE CISA-LHAMENTO DIRETO - BARRAGEM DE BOCAINA.

## CAPÍTULO IV

### APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

#### IV.1. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de determinar melhor as características de resistência tensão-deformação e pressões neutras dos materiais utilizados nos núcleos das Barragens Eng<sup>o</sup> Armando Ribeiro Gonçalves (Açu) e Bocaina foram ensaiadas algumas amostras dos dois materiais.

As duas amostras da Barragem do Açu estudadas foram colhidas no local de estocagem, já que na época em que foi iniciado este trabalho (fev/84) a barragem já estava com seu reservatório praticamente cheio e os empréstimos já haviam sido inundados. O material estudado foi a argila siltosa de baixa plasticidade e de coloração escura, possivelmente pertencente ao empréstimo n<sup>o</sup> 4, empregada no núcleo da Barragem.

O material da Barragem de Bocaina ensaiado, pertencente ao empréstimo n<sup>o</sup> 24, foi empregada em um trecho do núcleo, entre as cotas 244,70 e 246,30m, sendo uma argila siltosa com pedregulho de coloração amarela.

#### IV.2. PROGRAMA DE ENSAIOS

Para o estudo dos dois materiais, foi realizado um total de 12 ensaios triaxiais, sendo 6 rápidos e 6 adensados rápidos; 7 ensaios de cisalhamento direto e 11 ensaios de adensamento. Além destes foram realizados ensaios de análise química e mineralógica, ensaios granulométricos e de caracterização, ensaios de compactação e ensaios de dispersibilidade.

#### IV.2.1. Ensaaios de Caracterização

Nos materiais estudados, realizaram-se vários ensaios de caracterização, tais como massa específica real dos grãos (MB-28), limite de liquidez (MB-30), limite de plasticidade (MB-31), granulometria por peneiramento (EB-22), granulometria por sedimentação (MB-32). A preparação das amostras obedece às recomendações da MB-27 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os resultados obtidos nos ensaios acima encontram-se listados na tabela (IV.1). As curvas granulométricas, a localização dos materiais finos na carta de plasticidade e os dados dos ensaios de compactação feitos nas amostras da Barragem do Açú estão apresentados nas figuras III.3, III.4 e III.5 do capítulo anterior, respectivamente. Os mesmos dados obtidos para as amostras de Bocaina estão nas figuras III.13, III.14 e III.15.

As curvas de compactação obtidas para os materiais das duas barragens estão na figura IV.1.

#### IV.2.2. Ensaaios de Cisalhamento Direto

Os ensaios de cisalhamento direto efetuados são do tipo deformação controlada e foram realizados numa prensa de cisalhamento de fabricação nacional, onde foi montado um anel dinamométrico com capacidade para 50N. As deformações horizontais e verticais foram medidas através de deflectômetros com sensibilidade de 0,01mm.

Os corpos de prova ensaiados foram moldados a partir de cilindros de solo compactado com a energia do Proctor Normal, na direção normal ao das camadas compactadas em três séries de ensaios. Em cada uma das séries mantinha-se constante

a umidade e variava-se as tensões aplicadas, de modo a obter-se a envoltória de resistência.

Ao ensaiar-se os materiais, utilizou-se a caixa de cisalhamento com 50,8mm de lado, tornando possível compactar o solo em um cilindro com as dimensões do Proctor Normal. No caso do material da Barragem de Bocaina, compactou-se o material que passou na peneira nº 4 (4,76mm), pois este apresentou em sua granulometria 9% de material graúdo (pedregulho).

A velocidade de ruptura utilizada em todos os ensaios foi de 0,88mm/min e o intervalo de tempo decorrido entre a aplicação da carga vertical e a ruptura foi de 40 minutos em média no caso do solo do Açu, e 20 minutos em média no caso do solo de Bocaina, segundo recomenda Lambe (27).

As umidades de moldagem das séries de corpos de prova do material do Açu foram umidade ótima - 3%, umidade ótima e umidade ótima + 4%. Em cada série de ensaio, ou seja, para cada condição de umidade, ensaiou-se corpos de prova com pressões verticais variando de 100 a 500 KPa.

Com o material da Barragem de Bocaina, as umidades de moldagem das séries de corpos de prova foram umidade ótima-2%, umidade ótima e umidade ótima +2%. Optou-se neste caso por uma faixa de umidade mais estreita, pois este material se mostrou mais sensível à variação de umidade que o material da Barragem do Açu. Ensauiou-se, em cada série, corpos de prova com tensões verticais variando de 50 a 200 KPa.

Após a moldagem de cada corpo de prova, foram retiradas cápsulas de umidade do solo restante da moldagem para confirmar a umidade da série, desprezando-se os corpos de prova com desvio de umidade superior a 1%. Cuidou-se, também, de verificar a presença de pedregulhos e/ou raízes na superfície de ruptura.

Os resultados obtidos nos ensaios acima estão resumidos nas tabelas IV.2 e IV.6. As curvas tensão deformação horizontal, variação de volume deformação horizontal e as envoltórias de resistência encontram-se nas figuras IV.2 e IV.6, para os materiais das barragens do Açú e de Bocaina respectivamente.

Foram realizados, ainda, ensaios de cisalhamento direto em uma amostra indeformada tipo bloco, colhida na cota 246,477 do maciço e localizada na estaca 6, 32,30m para montante.

Os resultados obtidos estão apresentados na tabela IV.6 e as curvas tensão-deformação horizontal, variação de volume - deformação horizontal e as envoltórias obtidas estão apresentadas na figura IV.7.

#### IV.2.3. Ensaio Triaxiais

Os ensaios triaxiais realizados foram de dois tipos : ensaios rápidos e ensaios adensados rápidos, ambos com medida de pressões neutras.

Os dois tipos de ensaios acima foram realizados em corpos de prova cilíndricos de diâmetro médio 35,6mm (1,4"), moldados a partir de cilindros de solo compactado com as dimensões e a energia do Proctor Normal. De cada cilindro de solo compactado, moldaram-se dois corpos de prova cilíndricos obedecendo à relação altura/diâmetro superior a 2,5 (Ver Lambe (27), Bishop & Henkel (2)). No caso do solo de Bocaina, para facilitar a moldagem dos corpos de prova e evitar a influência dos pedregulhos na representatividade dos ensaios, compactou-se o material que passa na peneira nº 4 (4,75mm).

Para caracterizar as amostras empregadas no núcleo das Barragens do Açú e de Bocaina, foram realizados ensaios com cada um dos materiais, em 3 séries de corpos de prova com umidades acima e abaixo da umidade ótima. Em cada série foram



mantidas as condições de umidade, não sendo permitido uma variação de umidade superior a 1% dentro de uma mesma série.

Com o material da Barragem do Açú, tanto nos ensaios rápidos (UU) quanto nos ensaios adensados-rápidos (CÚ), ensaiaram-se corpos de prova numa faixa de pressões confiantes entre 100 e 500 KPa. Com o material da Barragem de Bocaina, a faixa de pressões utilizada foi de 100 a 400 KPa nos dois tipos de ensaios.

Após a moldagem, os corpos de prova foram montados nas células do triaxial de fabricação nacional (Ronald Top), tomando-se o cuidado de verificar sua umidade e determinar suas dimensões de modo a manter o padrão pré-fixado ( $\Delta_w \% < 1\%$  e  $H/D \geq 2,5$ ). As pedras porosas utilizadas nos dois tipos de ensaios foram cuidadosamente saturadas, sendo saturadas por circulação d'água as de alta pressão de borbulhamento utilizadas nos ensaios UU (posteriormente verificou-se que a saturação era ineficiente) e as comuns utilizadas nos ensaios CÚ, saturadas por fervura.

Nos ensaios adensados rápidos (CÚ), a saturação dos corpos de prova foi obtida por meio de contrapressão aplicada em estágios de 50 KPa, a intervalos de 4hs, até atingir-se um valor de  $\bar{B} = (\Delta u / \Delta \sigma)$  entre 0,98 e 1,0. Após a saturação, procedia-se ao adensamento isotrópico, utilizando-se uma pedra porosa na base e papel filtro lateral, conforme Bishop e Henkel (2). O adensamento de todos os corpos de prova foi acompanhado através de medidas de variação volumétrica feitas por meio de uma bureta com capacidade para 50ml e sensibilidade de 0,10ml. As pressões confinantes, nos dois tipos de ensaios, foi aplicada hidraulicamente através de um sistema auto-compensante de potes de mercúrio (Ver Bishop e Henkel, (2)).

A ruptura dos corpos de prova foi realizada em prensa de fabricação nacional (Ronald Top), com capacidade para 100 N e 25 velocidades de deslocamento do pistão, sendo o carregamento vertical medido através de anéis dinamométricos com capacidade para 10 e 20 N, dependendo da carga máxima esperada, e

as deformações verticais medidas através de um deflectômetro com sensibilidade de 0,01mm.

A velocidade de ruptura utilizada nos ensaios rápidos ( $\overline{UU}$ ) foi de 1,51mm/min, segundo Bishop e Henkel (2), e as velocidades de ruptura escolhidas para os ensaios adensados rápidos ( $\overline{CU}$ ) seguiram a sugestão de Blight (3), onde se estima o tempo de ruptura em corpos de prova de 35,6mm como sendo de 7 a 8 t50 (tempo para ocorrer 50% do adensamento) e encontram-se listadas nas tabelas IV.4 e IV.8 para os materiais do Aço e de Bocaina, respectivamente.

Nos ensaios adensados rápidos ( $\overline{CU}$ ) do material da Barragem do Aço, o tempo de ruptura para uma deformação axial específica de 4,5 a 5% foi de 6 a 7 horas. Após esta deformação elevou-se a velocidade do ensaio para um valor cerca de 10 vezes maior, em alguns casos cerca de 25 vezes, até atingir uma deformação axial específica de 18% (vide item V.4.1. - discussão dos resultados).

Nos dois tipos de ensaios, na ruptura, efetuaram-se medidas de pressões neutras na base dos corpos de prova; utilizam-se transdutores de pressões tipo PT 10 de fabricação nacional (Interface) com capacidade máxima de 1000KPa e indicador digital IM5 do mesmo fabricante.

Os resultados finais obtidos para os ensaios rápidos ( $\overline{UU}$ ) estão indicados nas tabelas IV.3, IV.3a, IV.7 e IV.7a e os resultados dos ensaios adensados rápidos ( $\overline{CU}$ ) encontram-se nas tabelas IV.4, IV.4a, IV.8 e IV.8a para os materiais do Aço e de Bocaina, respectivamente. As curvas tensão-deformação, pressão neutra-deformação e as envoltórias de resistência obtidas dos ensaios acima estão apresentadas nas figuras IV.3, IV.4, IV.8 e IV.9.

#### IV.2.4. Ensaios de Adensamento com Drenagem Vertical

Nos ensaios de adensamento foram utilizadas prensas do tipo Bishop de fabricação nacional (Ronald Top), com relação

de braço de alavanca de 10:1. As deformações verticais dos corpos de prova foram medidas através de extensômetros que permitem leituras com sensibilidade de 0,01mm.

Os corpos de prova ensaiados foram moldados com diâmetro de 87,4mm (área =  $60\text{cm}^2$ ) e altura de 20mm, o que torna a relação diâmetro/altura superior a 2,5m como propôs Lambe (27). A moldagem foi feita na direção normal ao das camadas compactadas, nas mesmas condições de umidade dos ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, a partir de cilindros de solo compactados com as dimensões do cilindro e a energia do Proctor Normal. Após a compactação, era feita a moldagem do corpo de prova cravando-se o anel biselado do ensaio de adensamento no topo do cilindro compactado.

Para reduzir o atrito entre o anel e o corpo de prova, passou-se vaselina no anel e para evitar o efeito da má compactação e do amoldamento durante a desmoldagem na parte externa do cilindro de solo compactado, por ocasião da moldagem, o anel biselado foi centralizado no topo do cilindro, eliminando-se no mínimo 5mm de solo ao longo do perímetro do cilindro e no topo do mesmo. Após a moldagem, foram determinados o peso e a umidade da amostra.

A drenagem vertical dos corpos de prova foi feita em ambas as faces, utilizando-se sempre entre a amostra e as pedras porosas papel filtro.

Os ensaios de adensamento realizados nos materiais das Barragens do Açú e de Bocaina nas condições de umidade previamente estabelecidas foram divididos em dois grupos:

- a) Ensaio realizado em amostras com a umidade de compactação, sem a inundação do corpo de prova, tomando-se o cuidado de colocar sobre a célula um papel-toalha umedecido para evitar a perda de umidade da amostra durante o ensaio.

- b) Ensaio realizado em amostras inicialmente com a unidade de compactação, inundando-as após estabilização da carga de 160 KPa.

O procedimento de inundar os corpos de prova após a estabilização da carga de 160KPa, utilizado nos ensaios do grupo B, foi seguido com o intuito de observar se os altos valores de tensão desviatória obtidos para os corpos de prova do material da Barragem do Açú, adensados com 300 KPa de tensão confinante no ensaio  $\overline{C\bar{U}}$ , estavam relacionados com uma mudança de estrutura ocasionada pela saturação dos mesmos nesta pressão. No entanto, durante o ensaio de adensamento feito segundo este procedimento, nada se detectou que pudesse estar relacionado com o comportamento do ensaio  $\overline{C\bar{U}}$ .

Nos dois grupos de ensaios, as cargas verticais aplicadas em cada estágio foram constantes, sendo o incremento de carga igual à carga anterior ( $\Delta P/P=1$ ) e procedendo-se ao ensaio em duas etapas, uma de carregamento e outra de descarregamento. Na etapa de carregamento, as pressões aplicadas foram 10, 20, 40, 80, 160, 320 e 1.280 KPa, sendo 1.280 KPa a capacidade de operação normal do equipamento. A fase de descarregamento foi realizada com pressões de 640, 160, 40 e 10 KPa. O tempo de duração de cada estágio de carregamento não foi uniforme, tendo em vista a não definição da reta de adensamento secundário em todos os ensaios. Os tempos empregados podem ser vistos nas curvas  $\Delta H$  ou  $e_v \times \log t$  apresentados nas figuras IV.5c, IV.5d, IV.10c e IV.11a.

Os resultados obtidos para os dois materiais acham-se resumidos nas tabelas (IV.5 e III.9), onde são apresentados os valores das pressões de pré-adensamento determinadas pelo método de Casagrande; as curvas de índice de vazios (e), coeficiente de permeabilidade (K) e coeficiente de adensamento (C<sub>v</sub>) com  $\log p$  estão apresentadas nas figuras IV.5 e IV.10. Algumas curvas de deformação ( $\Delta H$ ) com  $\log t$  correspondentes aos ensaios são apresentadas nas figuras IV.5c, IV.5d, IV.10c e IV.11a.

#### IV.2.5. Ensaio de Análise Química

Através da análise química da fração argila das duas amostras em estudo, uma da Barragem do Açú e outra da Barragem de Bocaina, procurou-se conhecer melhor o comportamento geotécnico e a origem e formação geológica dos dois materiais.

Neste estudo foram feitas as determinações das quantidades de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ , carbono, pH, cátions trocáveis, sais solúveis e condutividade elétrica do extrato de saturação.

A utilidade destas determinações reside no fato de que, através destas, pode-se prever qualitativamente algumas propriedades geotécnicas dos solos tais como índice de vazios, plasticidade, granulometria, teor de umidade, permeabilidade, resistência, etc. Pode-se ainda conhecer através dos dados da análise química o grau de alteração química, determinado através da relação molecular sílica/alumina ( $K_i$ ), ou fazer correlações com a análise difratométrica, determinando o tipo de argila predominante.

As amostras foram colhidas no empréstimo (amostra da Barragem de Bocaina) ou em local de estocagem (amostra da Barragem do Açú), secas ao ar, destorroadas e enviadas em sacos plásticos para o laboratório de análises químicas de solos do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SNLCS/EMBRAPA).

Todas as determinações foram feitas na percentagem do material que passou na peneira com malha de 2mm de abertura denominada de terra fina.

##### IV.2.5.1. Apresentação e Discussão dos Resultados

Os resultados da análise química feita em duas amostras de solo, uma da barragem de Bocaina e outra da Barragem

do Açú, estão apresentadas nas tabelas IV.11a. b e c. A tabela IV.11a apresenta os valores do pH em água e em KcL 1N(\*); os cations trocáveis: Cálcio ( $\text{Ca}^{++}$ ); Magnésio ( $\text{Mg}^{++}$ ); Potássio ( $\text{K}^+$ ); Sódio ( $\text{Na}^+$ ); o valor T (capacidade de troca catiônica); o valor V (percentagem de saturação de bases; a saturação com alumínio e a percentagem de fósforo assimilável.

A tabela IV.11.b apresenta os valores das percentagens de carbono orgânico (\*\*); matéria orgânica; nitrogênio; relação carbono/nitrogênio; percentagens de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{NnO}$ ; os valores das relações moleculares Ki e Kr e da relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  e do equivalente de  $\text{CaCO}_3$ .

A tabela IV.11.c apresenta os valores da saturação com sódio e a consutividade elétrica no extrato de saturação para a amostra da barragem do Açú.

Através dos resultados obtidos, pode-se fazer as seguintes observações: O pH do material da Barragem do Açú indica que este material possui uma leve alcalinidade (pH-7,7), comum nos solos minerais de regiões áridas. Devido a ausência de prótons  $\text{AL}^{+++}$  e  $\text{H}^+$ , este material está completamente saturado de bases. O material da Barragem de Bocaina possui um pH de 5,6, sendo este um material de moderada acidez comum nos solos minerais de regiões úmidas, apesar de tratar-se de um material de região semi-árida. Devido, ainda, à presença de  $\text{AL}^{+++}$  e  $\text{H}^+$  no material da Barragem de Bocaina, que conferem ao mesmo um caráter ácido, a saturação das bases reduziu-se para 79%. A percentagem de saturação de bases está diretamente ligada ao pH.

---

(\*) O valor do pH em KcL 1N só tem sentido para as amostras com pH em água menor que 7.

(\*\*) A percentagem de matéria orgânica é obtida multiplicando-se a percentagem de Carbono Orgânico por 1,724 pois admite-se que há 58% de carbono na composição média do humus.

No material da Barragem do Açú há uma predominância de cátions absorvidas de  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  e  $\text{Na}^+$ . As quantidades de cálcio e sódio estão bastante próximas com valor entre 8 e 9 mg / 100g de terra fina, sendo estas as características de um solo de região árida, onde a drenagem é insuficiente, o que provoca um acúmulo de sais alcalinos, devendo haver neste caso um complexo de sódio ou de sódio e cálcio. A capacidade de troca catiônica deste material é de 22,5mg/100g.

No material da Barragem de Bocaina também há uma predominância de  $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$ , vindo a seguir o  $\text{Na}^+$  e o  $\text{K}^+$ . No entanto, para este material as quantidades de ions trocáveis são bem menores que as do material do Açú. A capacidade de troca catiônica deste material é de 5,6mg/100g, bem inferior à do material do Açú, o que indica uma maior lixiviação.

A quantidade de matéria orgânica das duas amostras, é praticamente a mesma, sendo inferior a 1%, o que confere aos dois materiais um caráter mineral e não orgânico, segundo Brady (5). As percentagens de nitrogênio determinadas evidenciam a pequena quantidade de matéria orgânica já que esta é essencialmente a única fonte de nitrogênio dos solos, (ver Brady(5)).

A coloração escura do material da Barragem do Açú não é devida a nenhum caráter orgânico, como se poderia pensar. O pH alcalino aliado ao alto teor de  $\text{Na}^+$  encontrado neste material é o responsável por essa coloração. Por outro lado, a coloração vermelho-amarela do material da Barragem de Bocaina é uma característica dos solos que sofreram intenso processo de intemperismo.

Os valores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  das duas amostras são bastante diferentes, sendo os do material da Barragem do Açú superior aos do material da Barragem de Bocaina, o que confirma a maior intemperização do material da Barragem de Bocaina.

Os valores da relação  $K_i$  e  $K_r$  obtidos através das relações moleculares sílica/alumina e sílica/sexquióxidos, respectivamente, para o material da Barragem do Açú foram superiores a 2,0, indicando que se trata de um material não laterítico com baixo grau de intemperização. O material da Barragem de Bocaina apresentou valores de  $K_i$  e  $K_r$  inferiores ou iguais a 2,0 e superiores a 1,33, o que indica que este material é laterítico e está mais intemperizado.

A alta concentração de  $Na^+$  no complexo sortivo ( $100 Na^+/T$ ) encontrada para o material da Barragem do Açú evidencia a baixa permeabilidade do material, o que foi confirmado nos ensaios de adensamento, quando se achou valores do coeficiente de permeabilidade da ordem de  $10^{-7}$  cm/seg. Vale ressaltar que a permeabilidade foi determinada no ensaio feito sem inundação inicial da amostra.

A condutividade elétrica do extrato de saturação do material da Barragem do Açú foi elevado, superior a 4mMhos/cm; tendo em vista o alto teor salino desta amostra,  $100 Na^+/T$  superior a 15% e o pH alcalino, maior que 7, pode-se dizer que este material tem um caráter solódico. O caráter solódico pode estar ligado à presença de materiais expansivos do grupo (2:1.).

No material da Barragem de Bocaina não se determinou a condutividade elétrica do extrato de saturação; porém, como o pH é ácido, menor que 7 e a percentagem de sódio no complexo sortivo é maior que 6% e menor que 15%, podem dizer que a condutividade elétrica do extrato saturado não será superior a 4mMhos/cm. No entanto, como a percentagem de sódio no complexo sortivo é maior que 6%, este material tem um caráter salino.

A alta percentagem de sódio detectada no material da Barragem do Açú pode ser de caráter pedogenético, ou seja, pode ter sua origem ligada aos processos de formação tais como clima, pluviosidade, material de origem, organismos vivos, idade, etc.



A salinização, segundo Primavesi (38), ocorre frequentemente em zonas com poucas chuvas, isto é, em climas semi-árido ou sub-úmido, com concentrações de chuvas reduzidas, onde o solo possuir superfície compacta e pobre capacidade de infiltração. As águas acumuladas na superfície, mesmo as águas doces, possuem em solução sais de Na, Ca e, também, pequena quantidade de Mg e K. Estes sais ficam como resíduo após a evaporação da água pluvial e têm sua concentração aumentada ano após ano, o que resulta numa redução do pH e finalmente na salinização.

Outra hipótese para a alta concentração de sódio é atribuí-la a um processo chamado "edafização" que consiste na migração dos íons de  $\text{Na}^+$  das camadas inferiores, talvez do arenito Açú de formação marinha para as camadas superiores.

O cátion presente entre as umidades cristalográficas das argilas silicáticas (montmorilonita, caulinita e illita), exerce grande influência sobre os limites de plasticidade, coesão e dispersão das mesmas. No caso do cátion predominante ser o sódio, os limites de plasticidade da argila, se ampliam muito principalmente se esta for a montmorilonita. Isto confere ao material um manuseio difícil e características de permeabilidade baixa, podendo também causar, devido as amplas faixas de plasticidade, baixos valores de resistência.

OBS.: Os dados citados a respeito da análise química foram pesquisados nos livros da área de agronomia e junto a pessoas ligadas ao Embrapa.

Nas tabelas IV.11 a,b e c estão também os resultados da análise química feita numa amostra do material da barragem do Açú, feita pelo laboratório da PUC.

#### IV.2.6. Ensaio de Dispersibilidade

Muitas das propriedades físicas de um solo estão ligadas intimamente à sua composição química. A dispersibilidade das argilas, segundo Sherard e outros (41) está intimamente relacionada com a percentagem de cátions de sódio presente em sua composição química. Desse modo, devido à alta percentagem de sódio encontrado no material da Barragem do Açú, optou-se por fazer nos materiais pesquisados ensaios de dispersibilidade.

Os ensaios executados foram os descritos por Bordeaux e Nakao (4) e estão relacionados a seguir:

1. Ensaio comparativos de granulometria, onde executa-se o ensaio conforme o método MB-22 da ABNT, usando o defloculante hexametáfosfato de sódio, efetuando-se em seguida o ensaio de granulometria sem agitação mecânica e sem defloculante. A percentagem de dispersão é calculada como segue:

$$\% \text{ de dispersão} = \frac{\% \text{ em peso dos grãos menores que } 0,005\text{mm no ensaio c/'água}}{\% \text{ em peso dos grãos menores que } 0,005\text{mm no ensaio MB-36}}$$

Os resultados encontrados indicam uma percentagem de dispersão de 11% para o material da Barragem do Açú, que o classifica como um solo não dispersivo, e de 4% para o material da Barragem de Bocaina, que o classifica como não dispersivo.

2. Ensaio de dispersão rápida (Crumb test), que consiste em deixar cair num becker com 150cm<sup>3</sup> de água destilada um torrão de amostra seca ao ar, com cerca de 2g, e observar por uma hora a tendência da água ao redor do torrão de se tornar turva devido à presença de partículas em suspensão. Conforme o aspecto da água, classifica-se a amostra segundo 4 graus de dispersibilidade que variam de não dispersiva à altamente dispersiva.

De acordo com este ensaio, o material da Barragem do Açú foi classificado como sendo pouco a moderadamente dispersivo; o torrão se desfaz e a água fica colorida apenas próximo a ele.

O material da Barragem de Bocaina foi classificado como sendo não dispersivo; o torrão se desfaz, não há qualquer coloração da água que indique partículas de argila em suspensão.

3. Ensaio de furo de agulha (Pinhole Test), cujo procedimento foi padronizado e descrito por Sherard e outros (41) e consiste em se promover um fluxo de água com pressões previamente estabelecidas através de um orifício feito com uma agulha no interior de um corpo de prova compactado. A água que atravessa o corpo de prova é coletada e a vazão é medida, procurando-se determinar visualmente a quantidade e a velocidade de carreamento das partículas.

Através dos resultados obtidos neste ensaio, classificou-se o material da Barragem do Açú, segundo a classificação do Sherard (41), como ND4, ou seja, trata-se de um solo intermediário que é erodido vagarosamente sob uma carga hidráulica de 2". O material de Bocaina enquadra-se nos solos do grupo ND2, que são solos não dispersivos, os quais não apresentam erosão sob cargas de 15" e 40".

#### IV.2.7. Análise Mineralógica

Tendo em vista o alto teor salino detectado pela análise química nas amostras da Barragem do Açú, o que sugeriu a presença de minerais expansivos do grupo 2:1 na sua composição, julgou-se necessário determinar através de uma análise mineralógica o tipo de mineral argílico presente.

A preparação das amostras foi feita no laboratório análise de solos da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), seguindo-se o procedimento descrito a seguir.

A separação da argila total ( $\phi < 2\mu\text{m}$ ) foi feita por sedimentação. Dispersou-se o material agitando-o por 5 minutos em um agitador elétrico (stirrer). O dispersante usado foi uma solução diluída de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a 2% com PH de 9,5.

Tentou-se analisar as amostras de Raio X apenas saturando-se com K e Mg, sem se remover a matéria orgânica e o Fe, o que se mostrou insatisfatório, uma vez que os picos não eram resolvidos e se confundiam, por vezes, com o "background".

Seguindo-se o procedimento descrito por Jackson (29), removeu-se a matéria orgânica.

Obtida a fração argila em suspensão e livre de matéria orgânica, separaram-se em tubo de centrífuga duas aliquotas contendo uma cerca de 50mg do sólido e outra, cerca de 100mg. A primeira (50mg) foi saturada com Mg e a segunda com K.

Fizeram-se três lâminas orientadas, duas com a amostra saturada com K e uma terceira com a amostra saturada com Mg.

Uma das amostras saturadas com K foi analisada ao natural (difratograma 1, figura IV.12), a outra foi analisada depois de aquecida a 550°C por duas horas (difratograma 2, figura IV.12). Essas duas lâminas, depois de prontas para análise, foram mantidas no dissecador.

A amostra saturada com Mg e também com uma solução de etanol contendo 10% em volume de glicerol foi analisada ao natural (difratograma 3, figura IV.12).

Todo o trabalho de Raio X foi realizado com radiação de Cu, Kv 40mA20 - velocidade do goniometro 2°/min e velocidade do papel 20 mm/min, no Laboratório de Análise Petrográfica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

As espécies minerais foram identificadas através de seus picos basais característicos, segundo Jackson (20) e Grim

(18), os quais estão assinalados nos difratogramas apresentados na figura IV.12.

Através da análise dos difratogramas observou-se que:

- As duas amostras ensaiadas, A e N, apresentam a mesma mineralogia;
- Mesmo após a remoção da matéria orgânica não foi possível obter com precisão os resultados da análise, sendo necessário melhorar a técnica utilizada no preparar das amostras para se conseguir uma maior capacidade de resolução do aparelho. Isto pode ser conseguido separando-se a fração argila em pelo menos duas frações; argila grossa e argila média + fina e/ou removendo os carbonatos, os óxidos livres de Fe antes de saturar as amostras;
- Com os dados disponíveis nos difratogramas, conclui-se que a mineralogia é representada por minerais do tipo 2:1, incluindo minerais expansivos, interestratificados irregularmente, o que sugere um grau de intemperismo moderado e concorda com os dados da análise química;
- Há, também, indícios da presença de minerais micáceos e alguma caulinita, evidenciada pelo pico a 7,4A que aparece na amostra saturada com K ao natural.

OBS.: Foi realizado ainda, no laboratório de análise mineralógica da PUC, uma análise do material da barragem do Açu e o resultado está incluído na figura IV.12.

MATERIAL		BARRAGEM DE BOCAINA		BARRAGEM DO AÇU	
AMOSTRA		E	I	A	N
COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)	Pedregulho	9	20	-	-
	Areia Grossa	2	5	-	1
	Areia Média	2	3	1	1
	Areia Fina	37	25	32	20
	Silte	22	17	19	38
	Argila	28	30	48	40
Limite de Liquidez (%)		25	32	46	37
Limite de Plasticidade (%)		12	22	25	22
Índice de Plasticidade (%)		13	10	21	15
Densidade Real dos Grãos		2,714	2,674	2,725	2,643
Umidade Ótima (%)		13,4	15	19,5	20,4
Massa Específica Aparente Seca Máxima (KN/m <sup>3</sup> )x10 <sup>-1</sup>		1,912	1,875	1,708	1,666.
Classificação Unificada		CL	SC	CL	CL

TABELA IV.1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E COMPACTAÇÃO

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_v$	PARÂMETROS INICIAIS DOS GRUPOS DE PROVA							$\tau_R$ (KPa)	$\frac{\Delta L}{L}$ (%)
			W (g)	L (cm)	h (cm)	(%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )		
w ótima - 3%	1	100	194,60	5,08	3,66	17,94	0,513	92,44	2,06	147	3,34
	2	200	194,80	5,08	3,70	17,70	0,525	89,14	2,04	187	4,16
	3	400	148,20	5,08	2,85	16,97	0,534	83,95	2,02	229	3,99
w ótima	1	100	190,08	5,08	3,67	20,35	0,584	91,96	2,01	136	5,36
	2	200	170,74	5,08	3,46	20,54	0,666	81,50	1,91	159	4,28
	3	400	180,00	5,08	3,49	20,44	0,593	91,14	2,00	221	4,02
w ótima + 4%	1	100	163,60	5,08	3,43	24,55	0,781	83,07	1,85	42	9,69
	2	200	175,30	5,08	3,57	24,20	0,725	88,22	1,90	64	9,59
	3	300	189,20	5,08	3,81	24,40	0,709	91,01	1,92	64	9,60
	4	400	190,00	5,08	3,85	24,90	0,726	90,62	1,91	66	0,59
	5	500	195,50	5,08	3,91	24,05	0,692	91,83	1,94	71	7,61

W - peso

L - lado

h - altura

w - umidade

$\sigma_v$  - tensão vertical aplicada

$\delta$  - densidade dos grãos

e - índice de vazios

S - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico úmido

$\tau_R$  - tensão cisalhante de ruptura

$\Delta L/L$  - deformação específica na ruptura

$\delta = 2,725$

$v_r = 0,87 \text{ mm/min}$

TABELA IV.2 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DO AÇU

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	W (g)	PARAMETROS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA					
				d (cm)	h (cm)	w (%)	e	s (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )
wot-3%	1	100	203,40	3,59	9,97	17,61	0,542	85,88	2,02
	2	300	194,40	3,57	9,96	17,75	0,596	78,71	1,95
	3	400	191,50	3,53	9,87	17,24	0,608	75,09	1,98
	4	500	198,30	3,56	9,97	17,17	0,549	82,63	2,00
wot	1	100	202,30	3,56	10,07	19,62	0,569	91,63	2,02
	2	200	200,00	3,57	9,92	19,81	0,581	90,00	2,02
	3	400	196,20	3,57	9,99	20,01	0,605	87,37	1,96
	4	500	204,40	3,62	9,89	21,13	0,594	94,02	2,01
wot+4%	1	100	200,00	3,64	9,95	24,95	0,710	92,83	1,93
	2	200	199,20	3,65	9,89	24,84	0,709	92,64	1,93
	3	500	197,00	3,60	10,02	25,30	0,714	93,56	1,93

$\sigma_c$  - tensão confinante

W - Peso

d - diâmetro

h - altura

w - umidade

e - índice de vazios

s - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico umido

$v_r = 1.507 \text{ mm/min}$

TABELA IV.3 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS UU REALIZADOS NA AMOSTRA  
DA BARRAGEM DO AÇU.



UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA $\epsilon_a$ (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (KPa)	p (KPa)	q (KPa)
wot -3%	1	100	4,01	226	213	113
	2	300	4,02	260	430	139
	3	400	4,05	270	535	135
	4	500	4,01	317	659	159
wot	1	100	3,97	140	170	70
	2	200	4,08	190	295	95
	3	400	4,01	190	495	96
	4	500	4,03	193	597	97
wot +4%	1	100	4,02	55	128	28
	2	200	4,04	58	229	29
	3	500	3,99	69	535	35
wot -3%	1	100	12,04	278	239	139
	2	300	12,05	375	488	188
	3	400	12,16	397	599	199
	4	500	12,04	423	712	212
wot	1	100	11,92	197	199	99
	2	200	12,02	246	323	123
	3	400	12,10	234	517	117
	4	500	12,13	233	617	117
wot +4%	1	100	12,06	70	135	35
	2	200	12,13	73	237	37
	3	500	11,98	86	543	43

$\sigma_1 - \sigma_3$  - tensão desviatória

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

TABELA IV.3A - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA-ENSAIOS UU REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DO AÇU PARA AS DEFORMAÇÕES MOBILIZADAS DE 4 e 12%

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	W (g)	DIMENSÕES		PARÂMETROS INICIAIS				PARÂMETROS FINAIS			VELOCIDADE DE RUPTURA (mm/min)
				d (cm)	h (cm)	w (%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (M <sub>g</sub> /m <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\gamma_t$ (M <sub>g</sub> /m <sup>3</sup> )	
Wot -3%	1	100	196,50	3,55	9,98	18,11	0,569	84,12	1,98	23,81	0,629	2,01	0,0155
	2	200	205,00	3,54	10,16	16,79	0,505	87,80	2,06	23,18	0,612	2,02	0,0155
	3	300	199,20	3,60	9,92	16,76	0,564	78,54	1,97	22,60	0,597	2,03	0,0155
	4	500	199,65	3,57	9,85	17,98	0,540	88,00	2,03	19,68	0,520	2,08	0,042
Wótima	1	100	202,20	3,61	9,78	20,85	0,582	94,68	2,02	24,48	0,647	2,00	0,011
	2	230	200,20	3,62	9,89	20,54	0,619	87,70	1,96	23,34	0,617	2,02	0,059
	3	450	203,10	3,61	9,85	20,35	0,580	92,78	2,01	22,31	0,590	2,03	0,042
	4	500	202,65	3,61	9,90	21,64	0,608	94,03	1,99	19,77	0,522	2,08	0,011
Wot +4%	1	100	199,30	3,63	9,91	25,33	0,074	95,01	1,94	26,46	0,699	1,97	0,016
	2	200	193,30	3,53	10,01	25,38	0,680	98,60	1,97	24,26	0,641	2,00	0,011
	3	300	201,50	3,62	9,94	24,52	0,671	96,60	1,97	22,89	0,605	2,02	0,011
	4	500	202,53	3,67	10,00	25,58	0,734	92,11	1,91	23,12	0,611	2,02	0,011

$\sigma_c$  - tensão confinante

w - umidade

$S_f$  = 100% (grau de saturação final)

W - peso

e - índice de vazios

d - diâmetro

S - grau de saturação

h - altura

$\gamma_t$  - peso específico úmido

TABELA IV.4 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS  $\overline{CU}$  REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DO AÇU

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	DEFOR MAÇÃO DE RUP TURA $\epsilon_a$ (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ KPa	$\Delta u$ (KPa)	$\bar{A}$	p (KPa)	p' (KPa)	q (KPa)
Wot - 3%	1	100	4,08	90	45	0,50	145	100	45
	2	200	4,04	113	96	0,85	257	161	57
	3	300	4,19	170	154	0,91	385	231	85
	4	500	4,21	275	233	0,85	638	405	138
Wot	1	100	4,15	123	100	0,81	162	62	61
	2	230	4,15	178	99	0,56	319	220	89
	3	450	4,12	223	247	1,11	562	315	112
	4	500	4,18	245	254	1,04	623	369	123
Wot + 4%	1	100	4,20	90	53	0,59	145	92	45
	2	200	4,10	138	109	0,79	269	160	69
	3	300	4,15	173	158	0,91	387	229	97
	4	500	4,12	156	285	1,83	578	293	78
Wot - 3%	1	100	12,26	114	40	0,35	157	117	57
	2	200	12,13	150	95	0,63	275	180	75
	3	300	12,75	209	157	0,75	405	248	105
	4	500	12,64	330	229	0,69	665	436	165
Wot	1	100	12,45	141	92	0,65	171	79	71
	2	230	12,45	223	93	0,42	342	249	112
	3	450	12,36	264	269	1,02	582	313	132
	4	500	12,55	295	256	0,87	648	392	148
Wot + 4%	1	100	12,31	101	46	0,46	151	105	51
	2	200	12,30	167	109	0,65	284	175	84
	3	300	12,45	208	174	0,84	404	230	104
	4	500	12,37	190	324	1,71	595	271	95

$(\sigma_1 - \sigma_3)$  - tensão desviatória

$\Delta u$  - acréscimo da pressão neutra

$\bar{A} = \Delta u / \sigma_d$  - parâmetro de pressão neutra

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

TABELA VI.4.A - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA-ENSAIOS CU REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DO AÇU PARA AS DEFORMAÇÕES MOBILIZADAS DE 4 e

AMOS TRA	UMI- DADE	PARÂMETROS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA				PARÂMETROS FINAIS DOS CORPOS DE PROVA			$C_r$	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_{vm}$ (Kpa)	OBSERVA ÇÕES	
		w (%)	e (%)	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )						
N	Wot-3%	16,88	0,530	84,17	2,02	13,32	0,352	2,22	0,035	0,190	0,055	270	s/inund	2,645
	Wot	20,70	0,549	99,65	2,07	16,80	0,444	2,14	0,030	0,200	0,040	140	s/inund	
	Wot+4%	24,38	0,701	91,92	1,93	17,67	0,467	2,12	0,040	0,255	0,050	130	s/inund	
A	Wot-2%	18,93	0,581	88,79	2,05	18,42	0,502	2,15	0,025	0,210	0,030	430	c/inund	2,725
	Wot+2%	21,72	0,643	92,05	2,02	17,83	0,486	2,16	0,055	0,280	0,055	320	c/inund	
	Wot+4%	25,31	0,778	88,65	1,76	18,83	0,513	1,96	0,030	0,296	0,060	150	c/inund	

OBS.:  $S_f = 100\%$  (grau de saturação final)

w - Umidade

e - Índice de vazios

S - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico úmido

$\sigma'_{vm}$  - pressão de pré-adensamento

$C_r$  - índice de recompressão

$C_c$  - índice de compressão primária

$C_s$  - índice de descompressão

TABELA IV.5 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO DA BARRAGEM DO AÇU.

AMOSTRA	UMIDA DE	CORPO DE PROVA	$\sigma_v$ (KPa)	PARÂMETROS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA							$\tau_R$ (KPa)	$\frac{\Delta L}{L}$ (%)
				(g)	L (cm)	h (cm)	w (%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )		
COMPACTADO NO LABORATÓRIO	Wot-2%	1	100	170,18	5,08	3,77	11,04	0,723	41,44	1,75	158	3,29
		2	200	157,91	5,08	3,25	11,05	0,601	49,90	1,88	257	4,87
		3	400	184,80	5,08	3,91	11,40	0,651	47,52	1,83	390	8,33
	Wot	1	125	159,35	5,08	3,25	13,47	0,621	58,86	1,90	163	9,24
		2	200	198,55	5,08	3,96	13,44	0,585	62,36	1,94	202	12,04
		3	400	194,02	5,08	3,84	14,19	0,583	66,05	1,96	334	16,54
	Wot+2%	1	100	217,50	5,08	4,30	14,77	0,589	68,05	1,96	130	7,36
		2	200	205,56	5,08	3,81	14,95	0,492	82,47	2,09	184	9,14
		3	400	225,50	5,08	4,24	15,03	0,522	78,17	2,05	295	12,69
INDEFOR MADA	W <sub>campo</sub>	1	100	842,00	10,16	4,18	13,81	0,560	65,94	1,95	156	3,65
		2	200	860,00	10,16	4,18	14,31	0,534	71,66	1,99	286	2,56
		3	50	875,50	10,16	4,18	15,14	0,517	78,31	1,99	144	3,75
		1R	100	888,00	10,16	4,20	13,71	0,485	75,59	2,05	220	3,11
		2R	200	865,00	10,16	4,20	14,27	0,532	71,72	2,00	259	5,81

OBS.: Os Ensaio 1R e 2R são Repetições Devido a Observação de Pedregulhos e/ou Raízes na Superfície de Ruptura.

$\sigma_v$  - tensão Vertical

W - peso

L - lado

h - altura

w - umidade

e - índice de vazios

S - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico úmido

$\tau_R$  - tensão cisalhante de ruptura

$\frac{\Delta L}{L}$  - deformação horizontal específica de ruptura

TABELA IV.6 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO REALIZADO NA AMOSTRA DA BARRAGEM DE BOCAINA

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	W (g)	PARÂMETROS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA					
				d (cm)	h (cm)	w (%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )
wot -2%	1	100	191,00	3,55	10,05	11,66	0,579	54,65	1,92
	2	200	193,50	3,55	10,05	11,28	0,553	55,37	1,95
	3	400	189,50	3,55	9,90	11,47	0,565	55,13	1,93
wot	1	50	193,50	3,48	9,78	13,84	0,485	77,48	2,08
	2	200	194,50	3,53	9,88	13,98	0,538	70,48	2,01
	3	400	197,60	3,61	0,82	13,29	0,565	63,87	1,97
wot +2%	1	100	201,20	3,56	9,74	15,53	0,510	82,64	2,08
	2	200	205,93	3,54	9,92	15,81	0,490	87,57	2,11
	3	400	210,50	3,58	10,06	15,37	0,507	82,28	2,08

$$v_r = 1,507 \text{ mm/min}$$

$\sigma_c$  - tensão confinante

W - peso

d - diâmetro

h - altura

w - umidade

e - índice de vazios

S - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico úmido

TABELA IV.7-RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS UU REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DE BOCAINA

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	DEFORMAÇÃO DE RUPTURA $\epsilon_a$ (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (KPa)	P (KPa)	q (KPa)
Wot-2%	1	100	3,81	421	311	211
	2	200	3,81	480	440	240
	3	400	4,04	603	702	302
Wot	1	50	4,09	242	171	121
	2	200	4,05	333	367	167
	3	400	4,07	417	609	209
Wot+2%	1	100	4,11	148	174	74
	2	200	4,03	179	290	90
	3	400	3,98	217	509	109
Wot-2%	1	100	11,43	442	321	221
	2	200	11,43	663	532	332
	3	400	12,12	977	889	489
Wot	1	50	12,27	297	199	149
	2	200	12,15	487	444	244
	3	400	12,22	694	747	347
Wot+2%	1	100	12,32	255	228	128
	2	200	12,10	279	340	140
	3	400	11,93	334	567	167

$(\sigma_1 - \sigma_3)$  - tensão desviatória

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

TABELA IV.7.A - PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA-ENSAIOS UU REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DE BOCAINA PARA AS DEFORMAÇÕES MOBILIZADAS DE 4 E 12%.

UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	W (g)	DIMENSÕES		PARÂMETROS INICIAIS				PARÂMETROS FINAIS			VELOCIDADE DE RUPTURA (mm/min)
				d (cm)	h (cm)	w (%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	
Wót-2%	1	100	198,15	3,57	9,92	12,19	0,526	62,89	2,00	19,42	0,527	2,12	0,217
	2	200	201,50	3,61	9,47	11,55	0,534	58,71	1,97	18,21	0,494	2,15	
	3	400	200,37	3,58	9,94	12,13	0,520	63,31	2,00	17,21	0,527	2,12	
Wótima	1	100	207,27	3,62	9,89	13,40	0,511	71,15	2,04	18,43	0,500	2,14	0,288
	2	200	200,40	3,51	9,97	12,69	0,473	72,83	2,08	17,20	0,467	2,17	
	3	300	211,50	3,60	10,06	13,37	0,490	74,07	2,07	17,08	0,463	2,17	
	4	400	193,91	3,48	9,94	12,81	0,492	70,59	2,05	16,40	0,445	2,19	
Wótima+2%	1	100	213,00	3,62	10,00	15,00	0,507	80,17	2,07	17,50	0,475	2,16	0,217
	2	200	212,00	3,61	10,00	15,00	0,507	80,21	2,07	17,30	0,469	2,17	
	3	400	217,00	3,63	9,95	15,39	0,486	85,90	2,11	15,68	0,425	2,02	

$\sigma_c$  - tensão confinante

W - peso

d - diâmetro

h - altura

W - umidade

e - índice de vazios

S - grau de saturação

$\gamma_t$  - peso específico úmido

TABELA IV.8 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS  $\bar{C}_u$  REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DE BOCAINA



UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	DEFOR MAÇÃO DE RUPTURA $\epsilon_a$ (%)	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ (KPa)	$\Delta u$ (KPa)	$\bar{A}$ $\Delta u / \sigma_d$	p (KPa)	p' (KPa)	q (KPa)
Wot - 2%	1	100	4,07	82	65	0,79	141	76	41
	2	200	4,11	141	129	0,91	271	142	71
	3	400	4,13	239	248	1,04	520	272	120
Wot	1	100	4,19	98	59	0,60	149	90	49
	2	200	4,07	170	124	0,73	285	161	85
	3	300	4,10	226	184	0,81	413	229	113
	4	400	4,12	286	213	0,74	543	330	143
Wot + 2%	1	100	4,05	89	62	0,70	145	83	45
	2	200	4,05	170	129	0,76	285	156	85
	3	400	4,24	302	244	0,81	551	307	151
Wot - 2%	1	100	12,15	140	48	0,34	170	122	70
	2	200	12,51	245	109	0,44	323	214	123
	3	400	12,72	416	222	0,53	608	386	208
Wot	1	100	12,26	123	49	0,40	162	113	62
	2	200	12,21	230	110	0,48	315	205	115
	3	300	12,13	315	170	0,54	458	288	158
	4	400	12,36	422	203	0,48	611	408	211
Wot + 2%	1	100	12,15	140	48	0,34	170	122	70
	2	200	12,51	225	109	0,48	323	214	123
	3	400	12,72	416	222	0,53	608	386	208

$(\sigma_1 - \sigma_3)$  - tensão desviatória

$\Delta u$  - acréscimo da pressão neutra

$A = \Delta u / \sigma_d$  - parâmetro de pressão neutra

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$$

$$p' = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$$

TABELA IV.8.A - PARÂMETROS DE RUPTURA DOS ENSAIOS  $\overline{CU}$  REALIZADOS NA AMOSTRA DA BARRAGEM DE BOCAINA PARA AS DEFORMAÇÕES DE 4 e 12%.

AMOSTRA	UMI DADE	PARÂMETROS INICIAIS DOS CORPOS DE PROVA				PARÂMETROS FINAIS DOS CORPOS DE PROVA			$C_r$	$C_c$	$C_s$	$\sigma'_{vm}$ (KPa)	OBSERVA ÇÕES	$\delta$
		w (%)	e	S (%)	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)	e	$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )						
E	wot-2%	12,30	0,508	65,71	2,02	12,45	0,338	2,28	0,050	0,175	0,022	210	s/inund	2,714
	wot	14,10	0,448	85,42	2,14	12,42	0,337	2,28	0,035	0,095	0,020	400	s/inund	
	wot+2%	14,94	0,515	78,94	1,80	14,22	0,386	2,81	0,050	0,135	0,015	430	s/inund	
I	$w_{campo}$	15,54	0,575	72,27	1,95	10,58	0,283	2,31	0,085	0,210	0,020	100	s/inund	2,674
		15,16	0,503	80,58	2,05	10,43	0,279	2,31	0,090	0,225	0,030	180	c/inund	

OBS.:  $S_f = 100\%$

w - umidade  
e - índice de vazios  
S - grau de saturação  
 $\gamma_t$  - peso específico úmido  
 $\delta_t$  - densidade dos grãos

$\sigma'_{vm}$  - pressão de pré-adensamento  
 $C_r$  - índice de recompressão  
 $C_c$  - índice de compressão primária  
 $C_s$  - índice de descompressão

TABELA IV.9 - RESUMO E RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO DA BARRAGEM DE BOCAINA

MATERIAL	AMOSTRA	UMIDADE	ENSAIO DE CISA LHAMENTO DIRE TO		ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$			
					TENSÕES TOTAIS		TENSÕES EFETIVAS		TENSÕES TOTAIS	
			C (KPa)	$\phi$	$C_u$ (KPa)	$\phi_u$	$C'$ (KPa)	$\phi'$	$C_u$ (KPa)	$\phi_u$
AÇU	COMPACTA DA NO LABORATÓ RIO	w <sub>ot</sub> -3%	126	15%	90 a 101	6 a 10%	12 a 18	18% a 21%	12 a 20	11 a 13%
		w <sub>ot</sub>	105	16%	69 a 101	2 a 3%	48 a 54	12 a 15%	43 a 53	7 a 9%
		w <sub>ot</sub> +4%	43	3%	25 a 32	1%	30 a 36	10 a 17%	44 a 50	4 a 6%
BOCAINA	COMPACTA DA NO LABORATÓ RIO	w <sub>ot</sub> -2%	85	42%	85 a 142	14 a 28%	3 a 13	24% a 31%	13	12 a 15%
		w <sub>ot</sub>	85	32%	86 a 91	11 a 21%	10 a 20	23% a 30%	10 a 15	14 a 19%
		w <sub>ot</sub> +2%	75	29%	58 a 102	6 a 7%	10	28% a 31%	9 a 20	15 a 18%
BOCAINA	INDEFOR- MADA	w <sub>campo</sub>	95	38%	RESISTÊNCIA DE PICO	S/ PEDREGULHOS NA SUP. DE RUP.				
			100	44%		C/ PEDREGULHOS NA SUP. DE RUP.				
			15	45%	RESISTÊNCIA RESIDUAL	S/ PEDREGULHOS NA SUP. DE RUP.				
			15	49%		C/ PEDREGULHOS NA SUP. DE RUP.				

TABELA IV. 10 - RESUMO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS ENSAIOS TRIAXIAIS E DE CISALHAMENTO DIRETO REALIZADOS NOS MATERIAIS DAS BARRAGENS DO AÇU E DE BOCAINA

(A)

MATERIAL	COMPLEXO SORTIVO (meq/100g)										VALOR V (sat.de bases)	100 Al <sup>+++</sup> S+Al <sup>+++</sup>	P <sub>assimilável</sub>
	pH (1:2,5) Água	KCL 1N	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	VALOR S (soma)	Al <sup>+++</sup>	H <sup>+</sup>	VALOR T (soma)			
AÇU	7,7	-	9,0	4,7	0,27	8,56	22,5	0,0	0,0	22,5	100	0	89
BOCAINA	5,6	4,4	2,0	1,1	0,31	0,95	4,4	0,1	1,1	5,6	79	2	2
AÇU (*)	7,8	-	12,9	7,6	0,25	7,11	27,9	0,0	0,5	28,4	98	0	-

(B)

MATERIAL	C (orgânico) %	QUANTIDADE DE MATÉRIA ORGÂNICA	N %	C N	ATAQUE POR				SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Equivalente de CaCO <sub>3</sub> %
					H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	NaOH (0,8%)						
					SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
AÇU	0,41	0,71	0,06	7	20,8	12,1	7,8	0,84	2,92	2,07	2,43	2
BOCAINA	0,40	0,69	0,08	5	12,8	10,9	7,2	0,42	2,00	1,40	2,38	-
AÇU (*)	-	-	-	-	23,1	12,5	7,7	0,87	3,14	2,26	2,55	-

(C)

MATERIAL	100 Na T	PASTA SATURADA		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
		C.E DO EXTRATO mmhos/cm 25° C	ÁGUA %				
AÇU	38	4,12	66	2,2	2,3	0,01	1,18
BOCAINA	12	-	-	-	-	-	-
AÇU (*)	25	-	-	-	-	0,07	16,60

OBS.: Sais solúveis feito na pasta de saturação

(\*)-ensaio feito na PUC

TABELA IV.11 - RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA

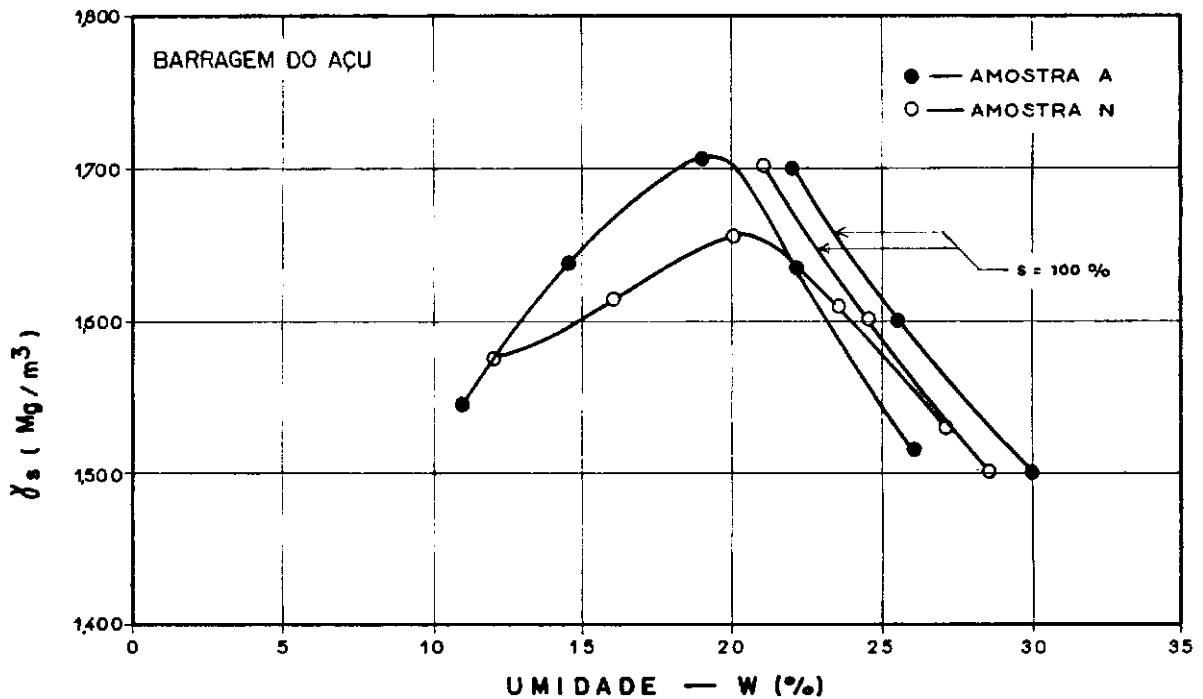
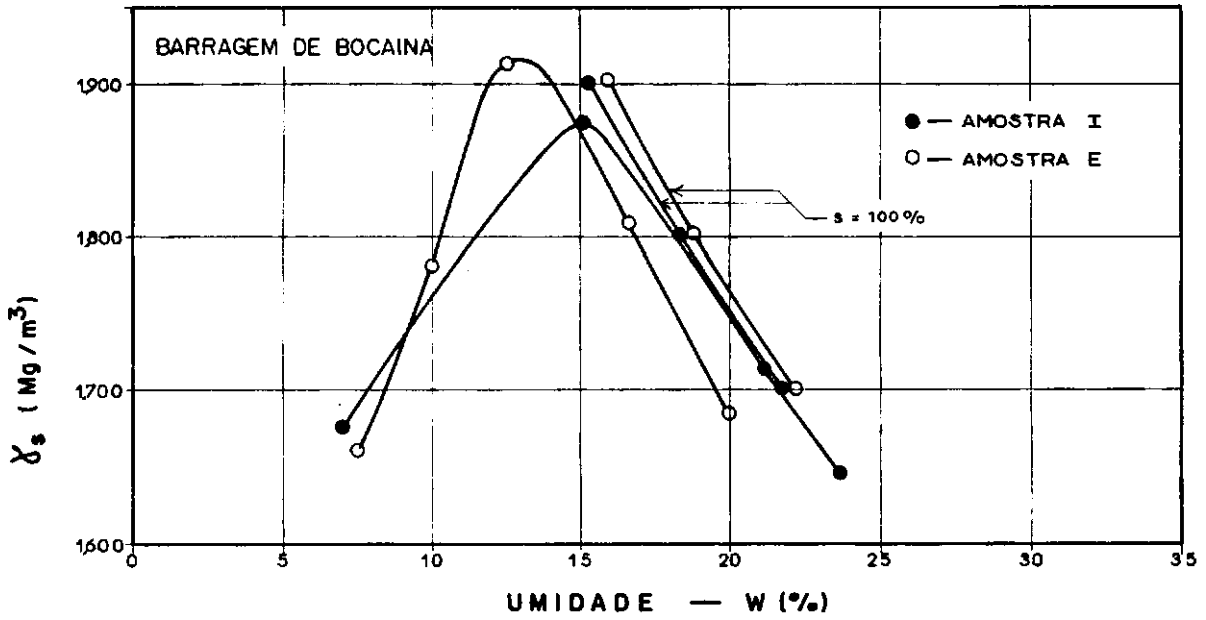


FIG. IV.1 — CURVAS DE COMPACTAÇÃO DAS AMOSTRAS DAS BARRAGENS DE BOCAINA E DO AÇU.

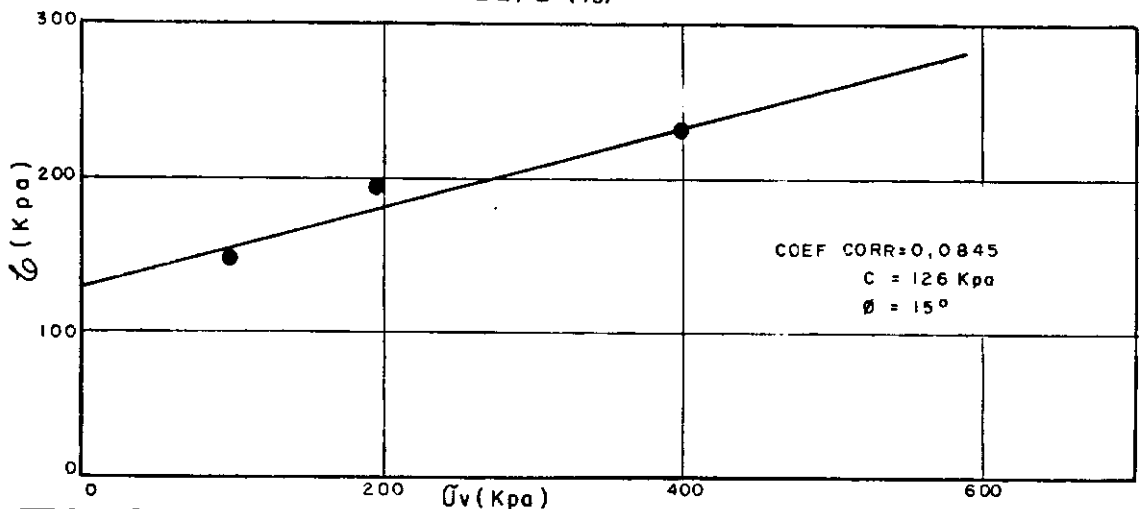
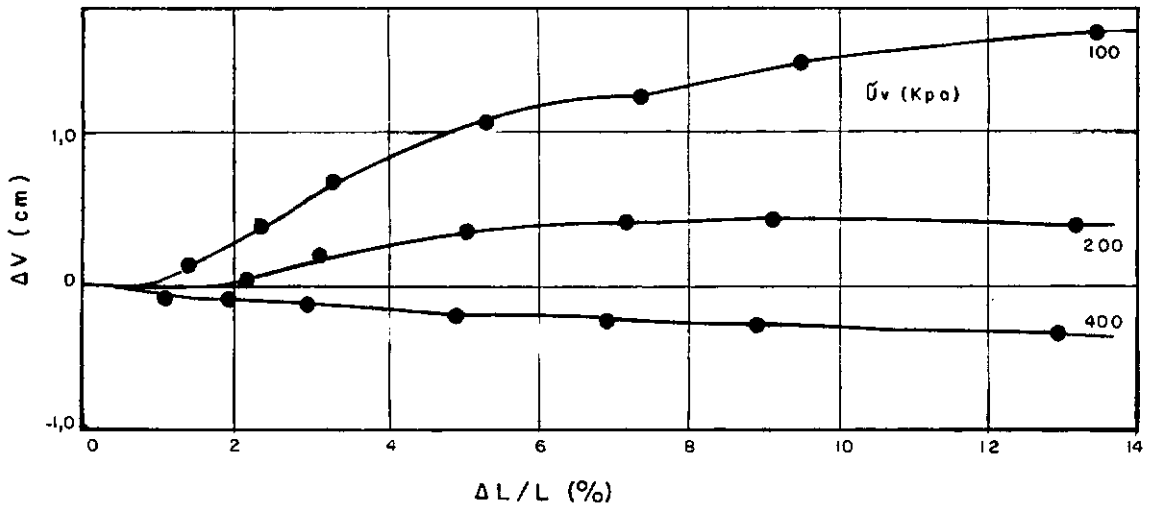
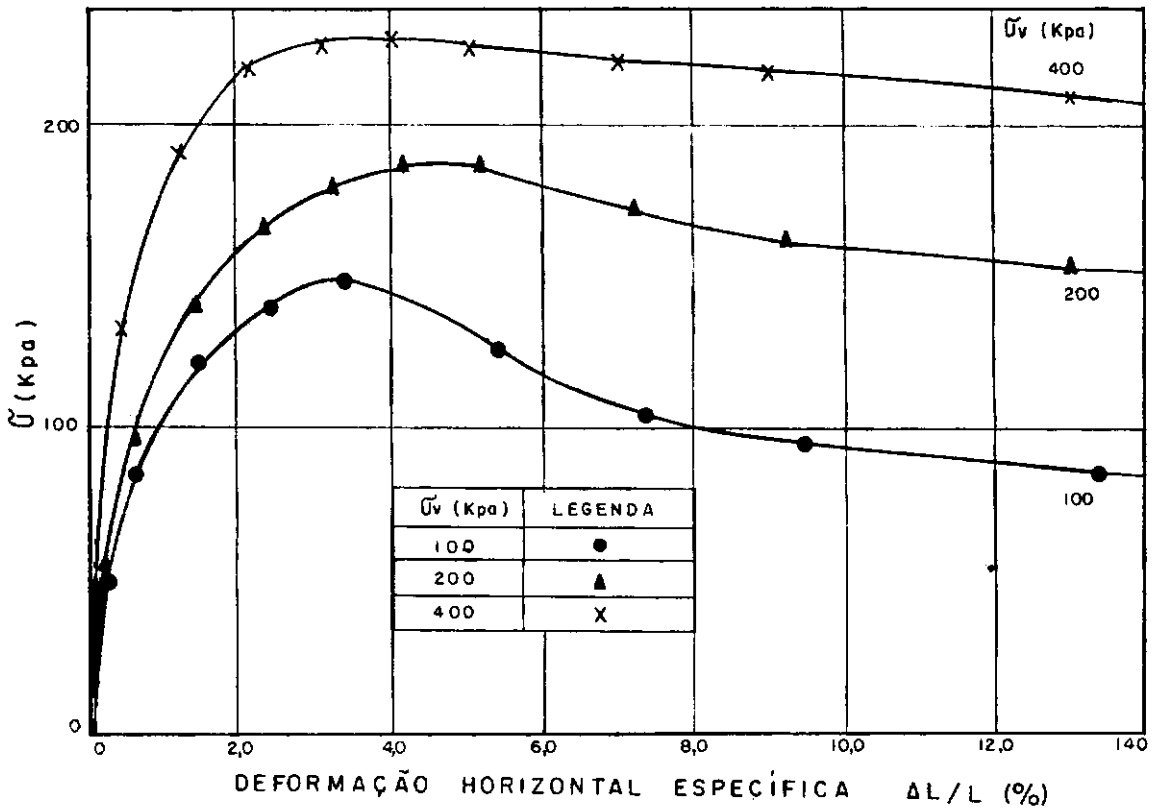


FIG. IV.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA DA BARRAGEM DE AÇU. Wet - 3 %.

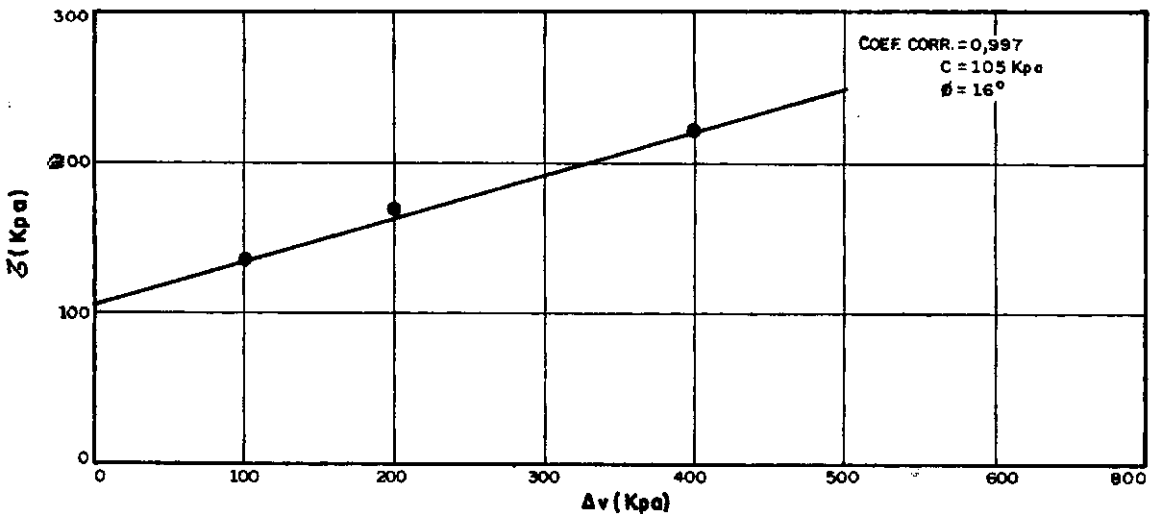
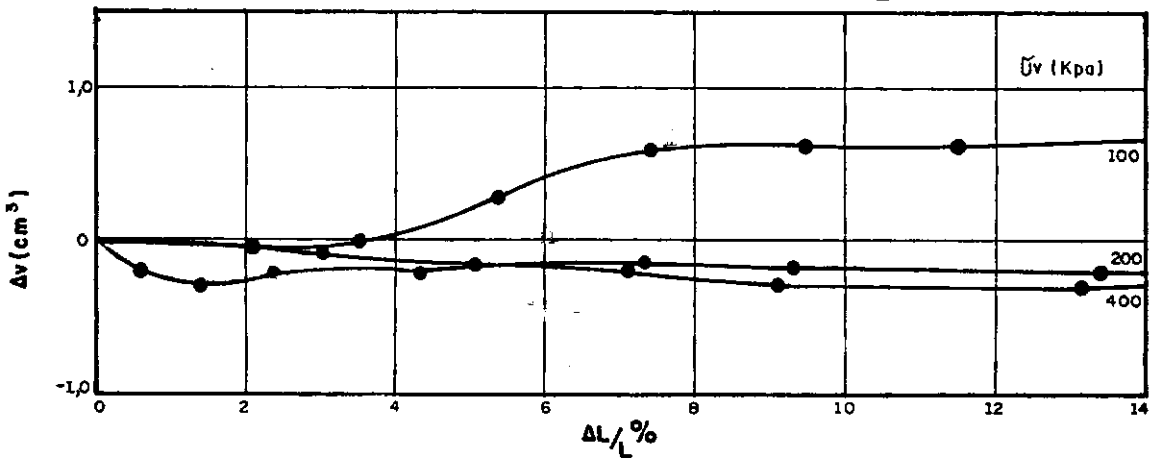
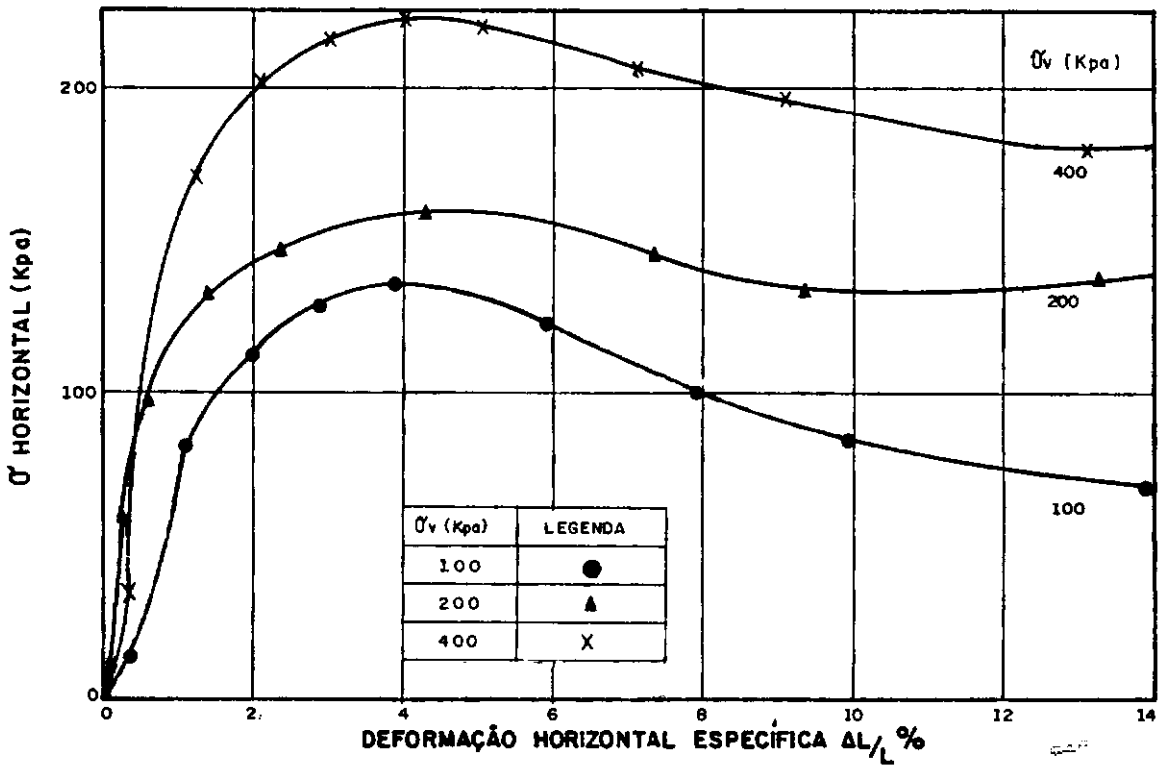


FIG-12a-RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA DA BARRAGEM DE AÇU. UMDADE ÓTIMA.

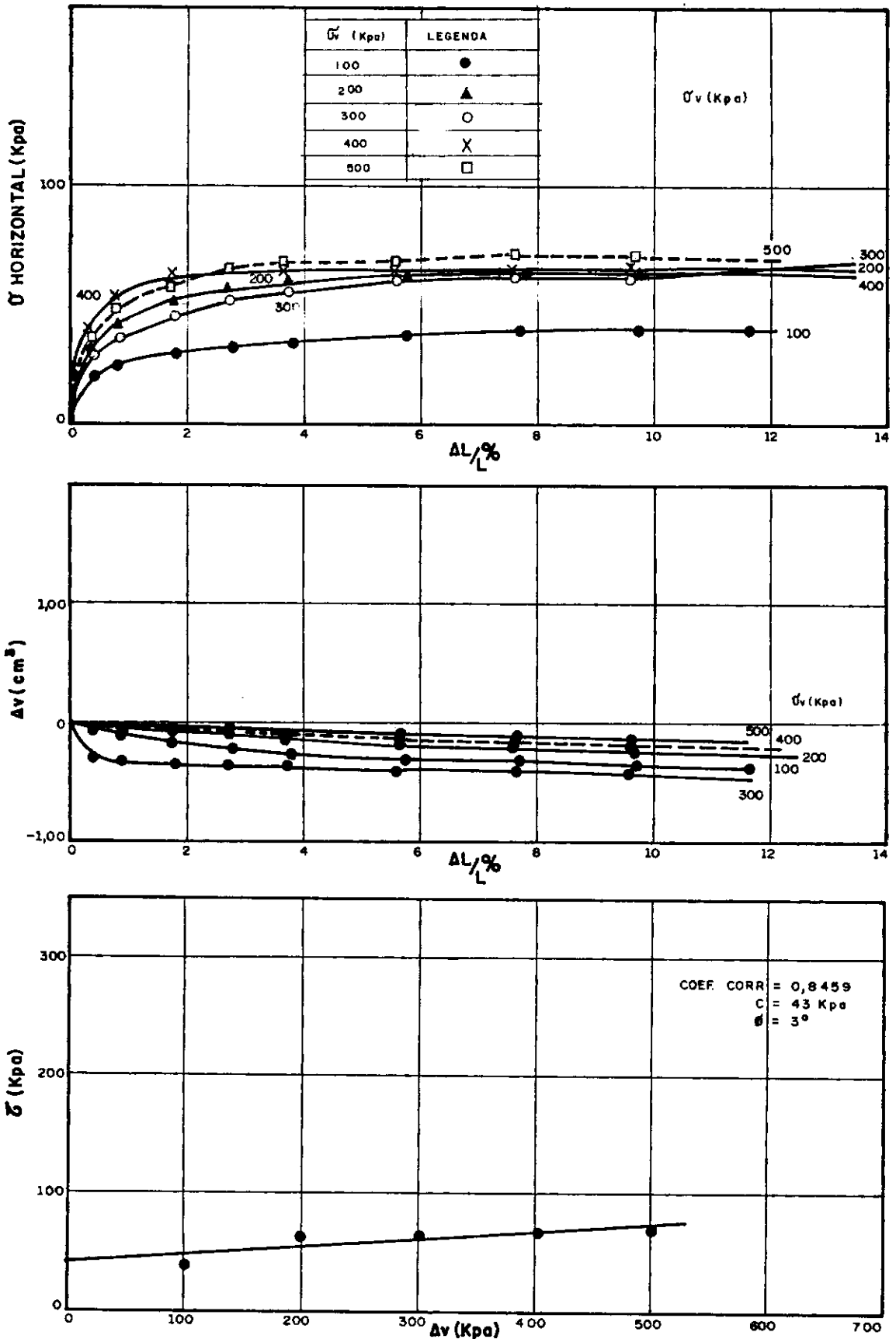


FIG. IV.2b - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA DA BARRAGEM DO AÇU.  
 UNIDADE ÓTIMA + 4 %



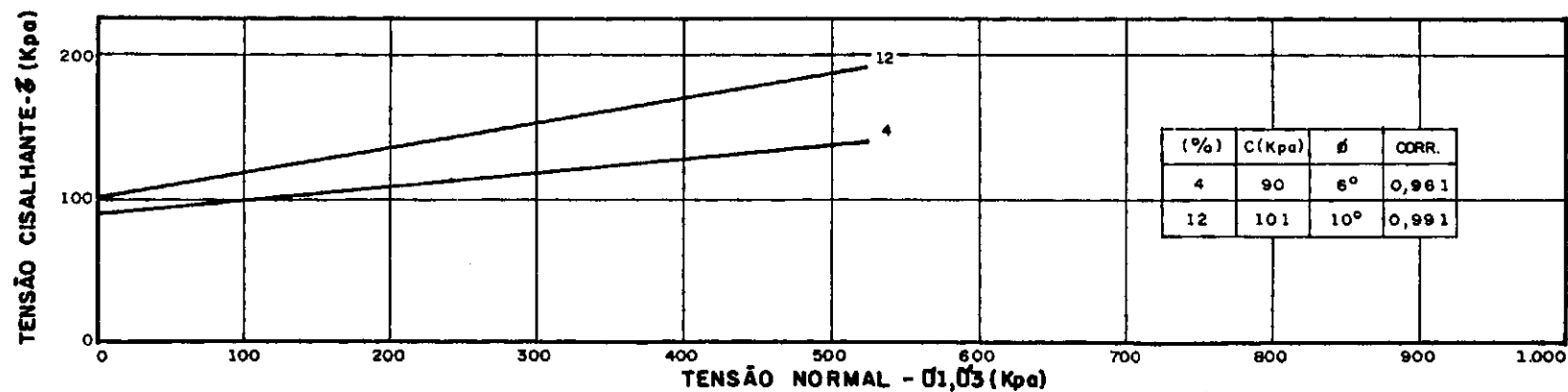
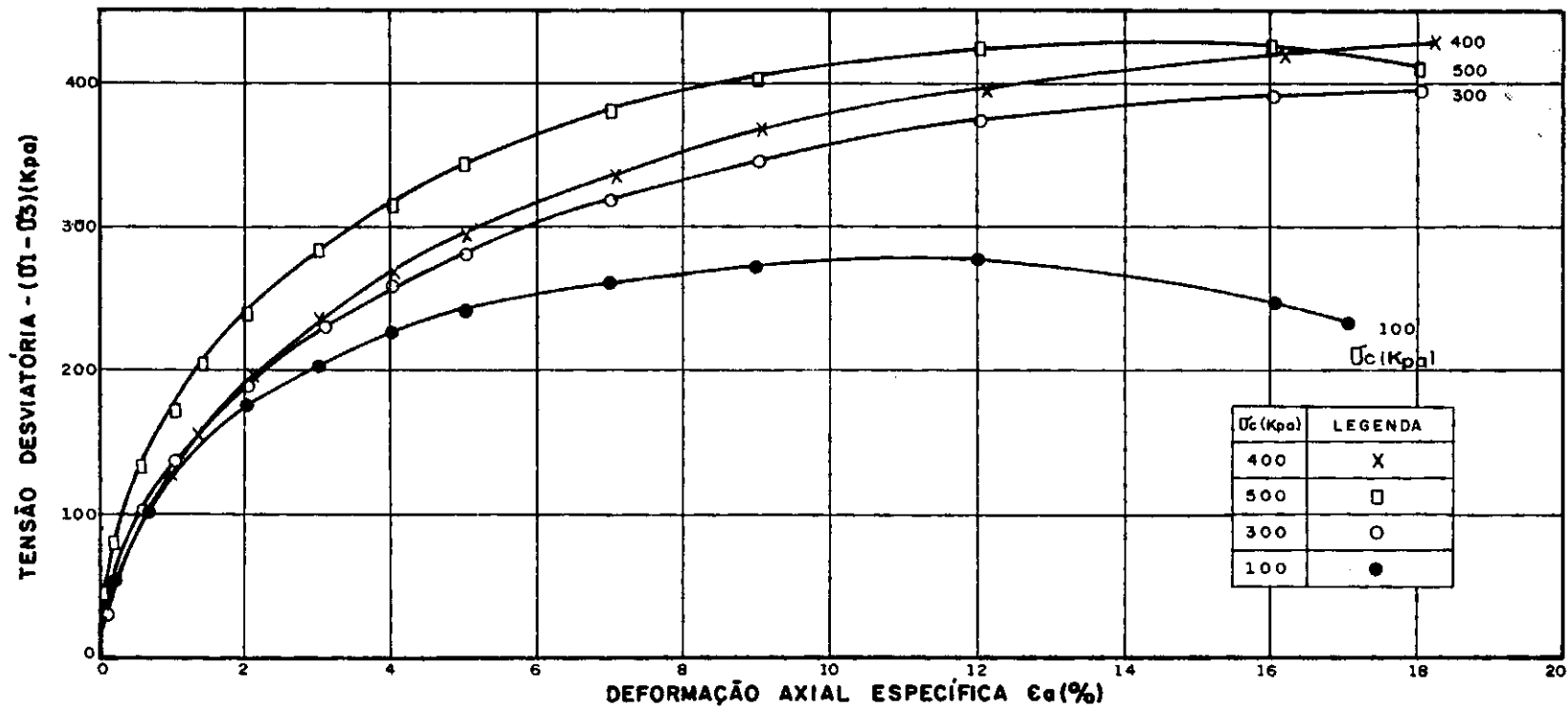


FIG. IV.3 - BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO UU -  $W_{ot} = 3\%$

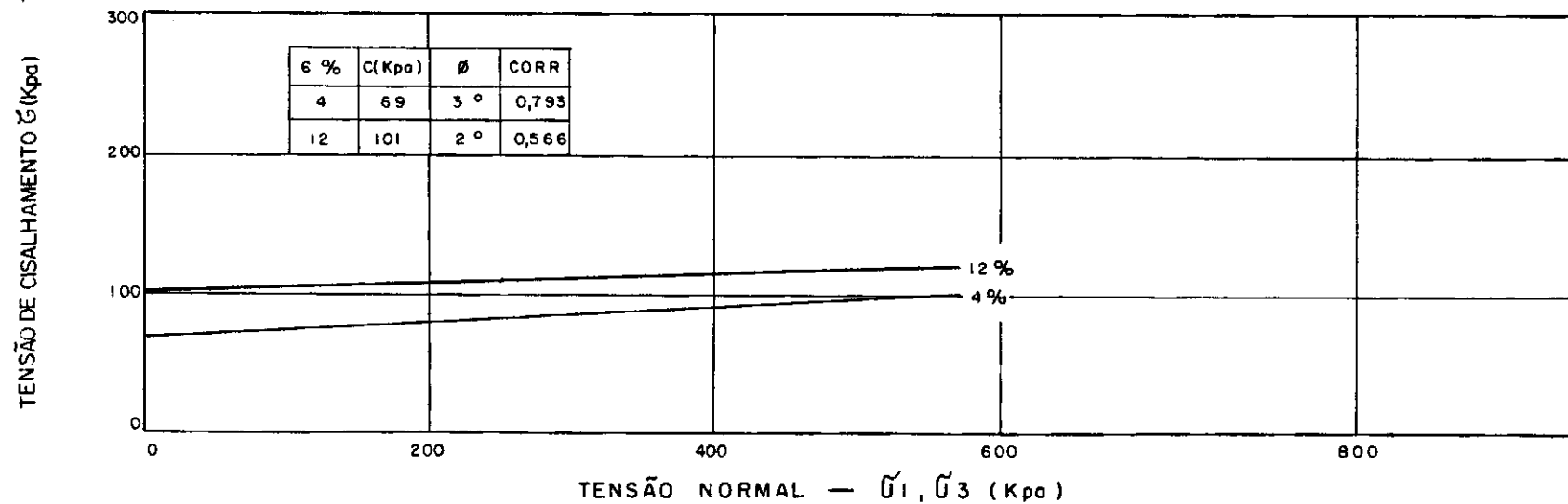
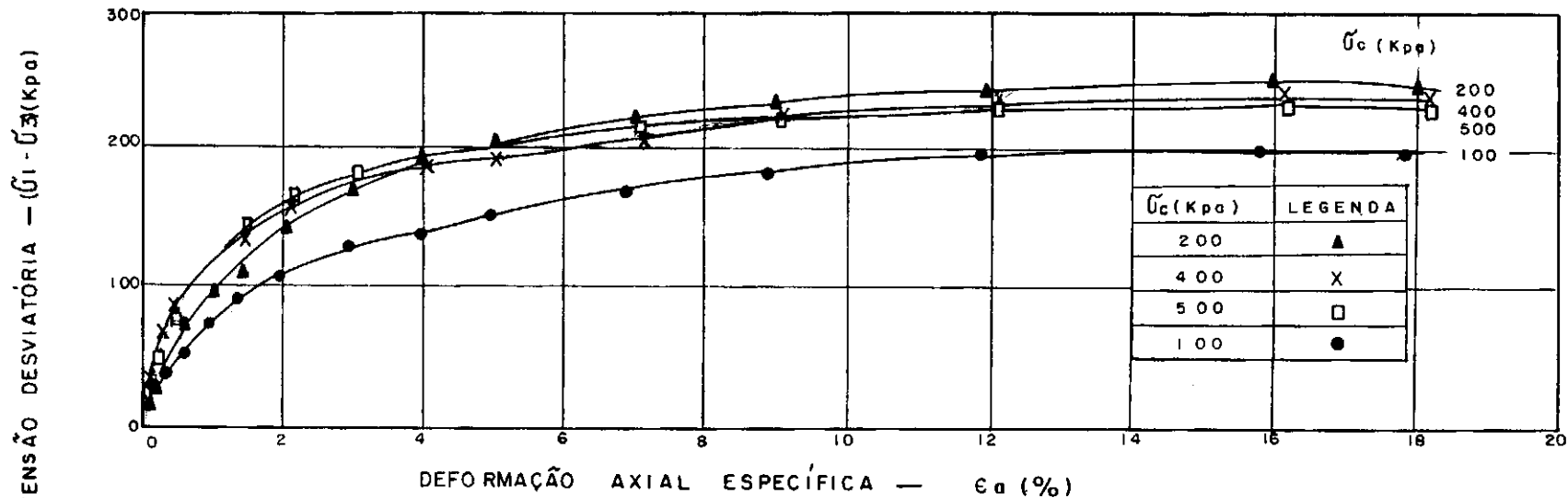


FIG. IV.3a — BARRAGEM DO AÇU — ENSAIO UU — Wot.

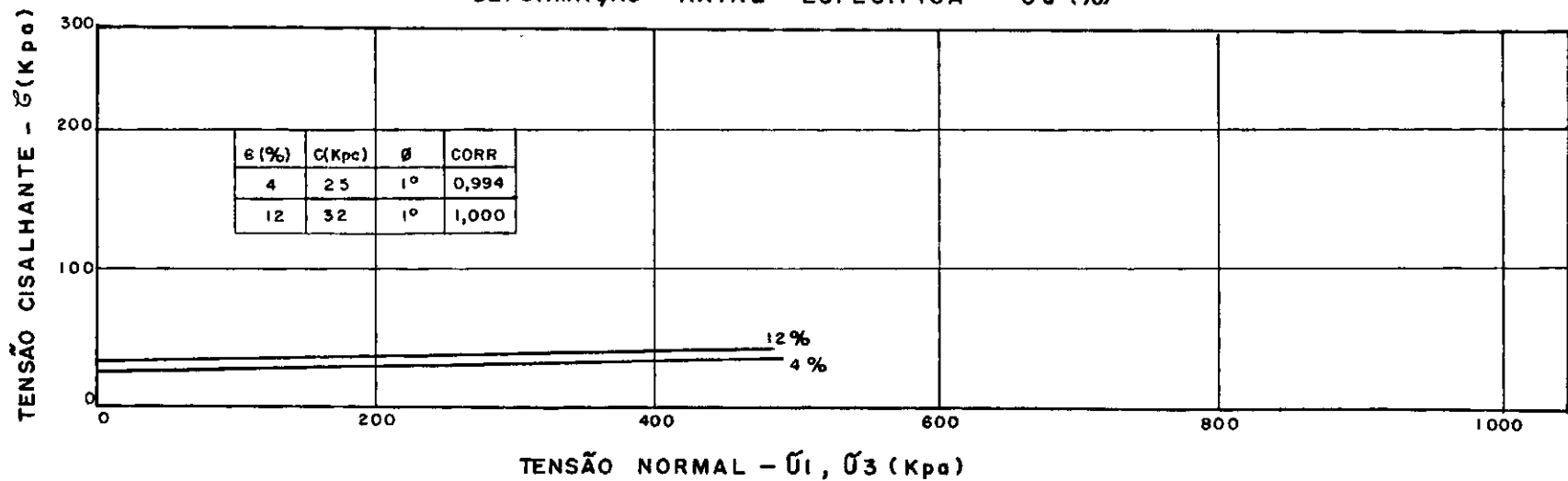
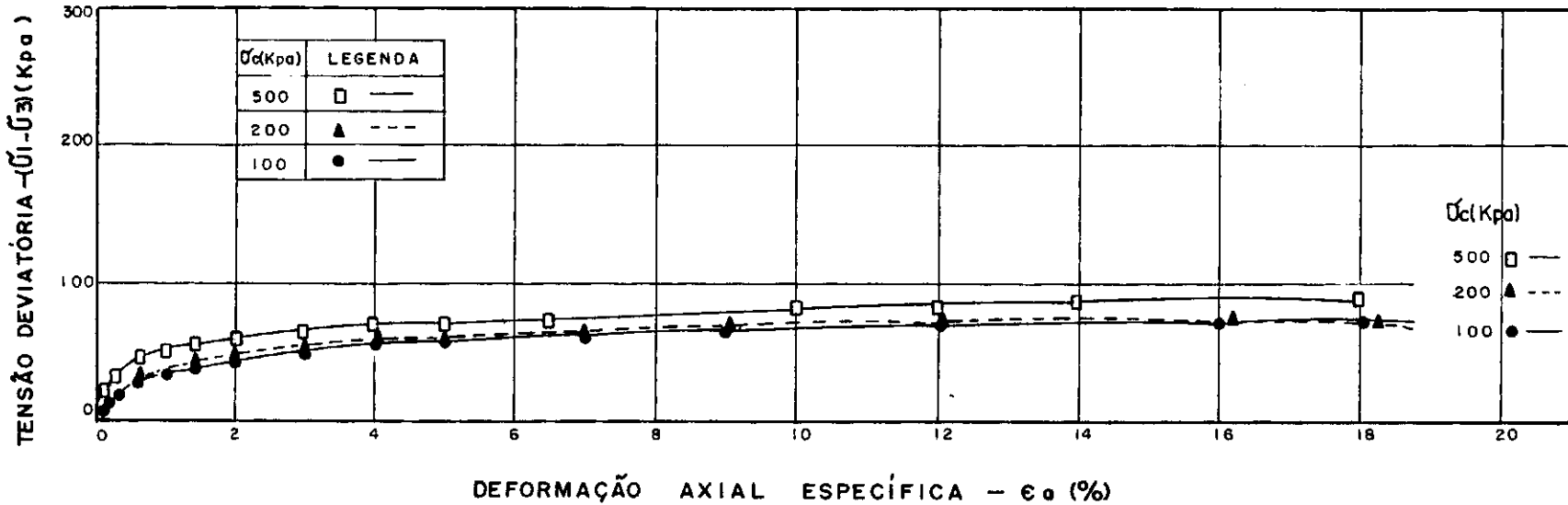
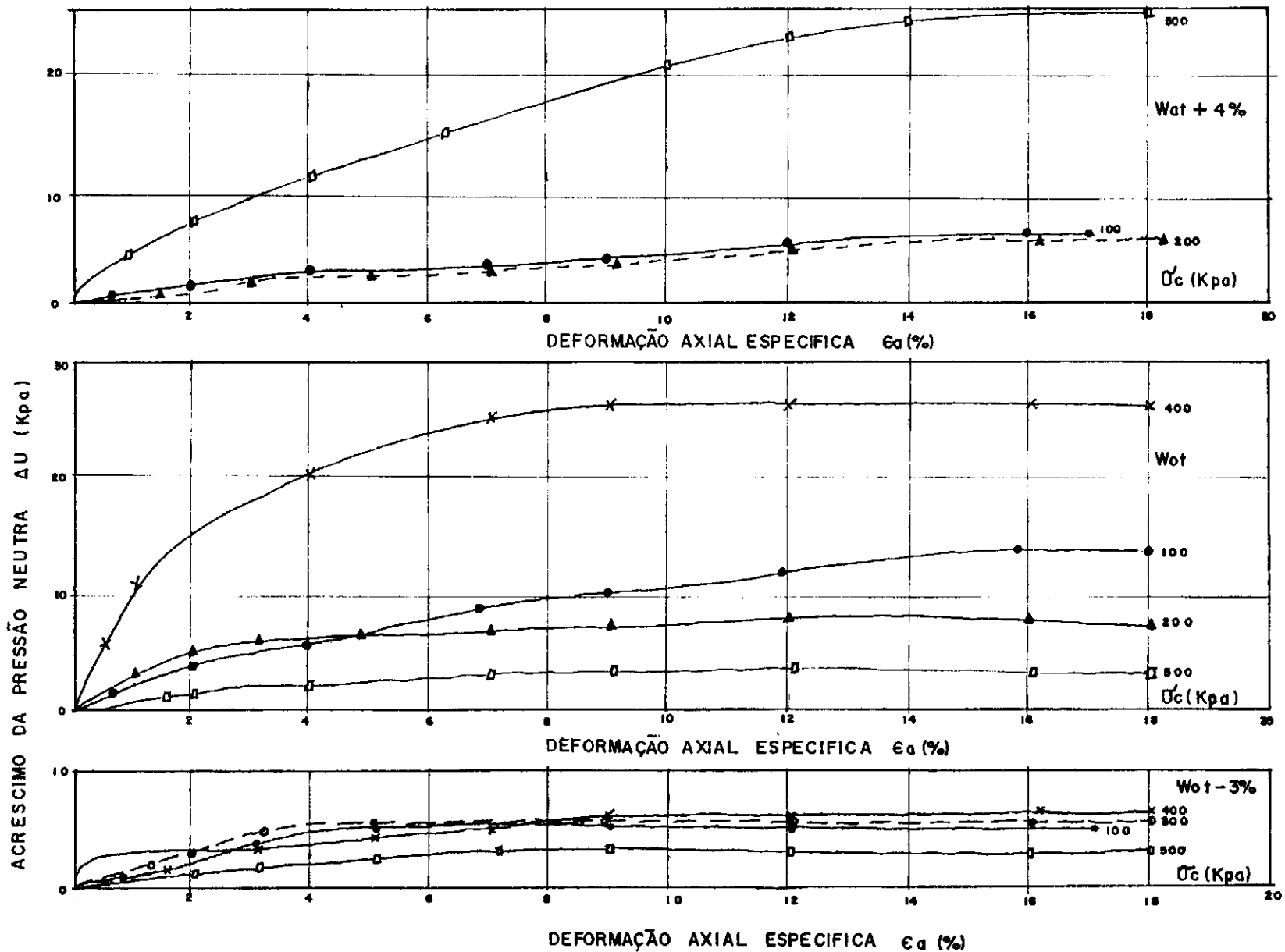


FIG.IV.3b — BARRAGEM DO AÇU — ENSAIO UU — Wot + 4%

FIG. IV - 3c - CURVAS PRESSÃO NEUTRA - DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS UU DA BARRAGEM DO AÇU



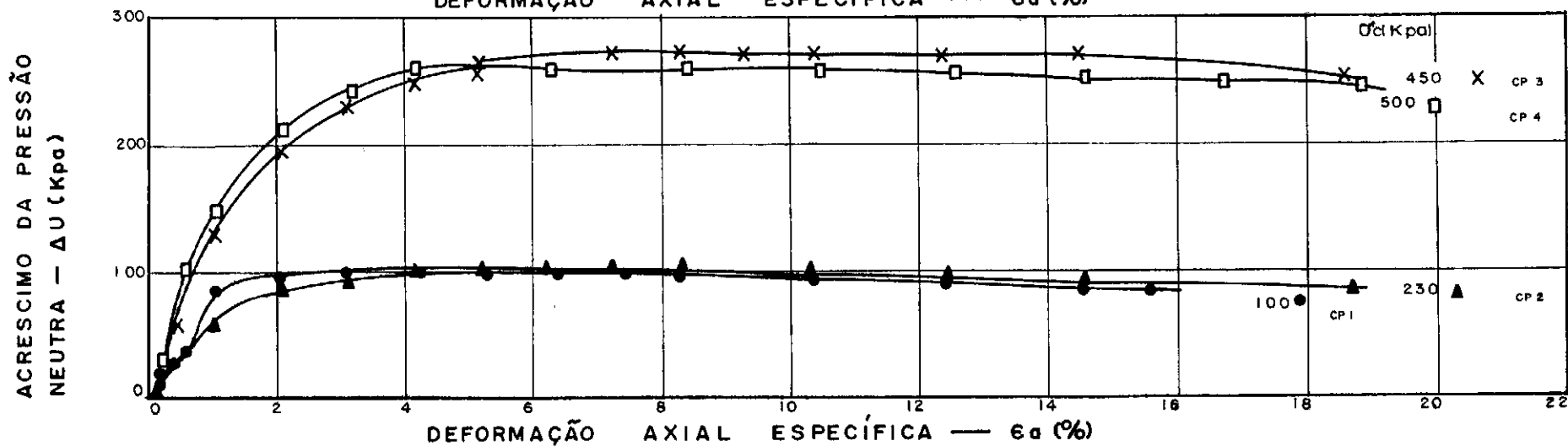
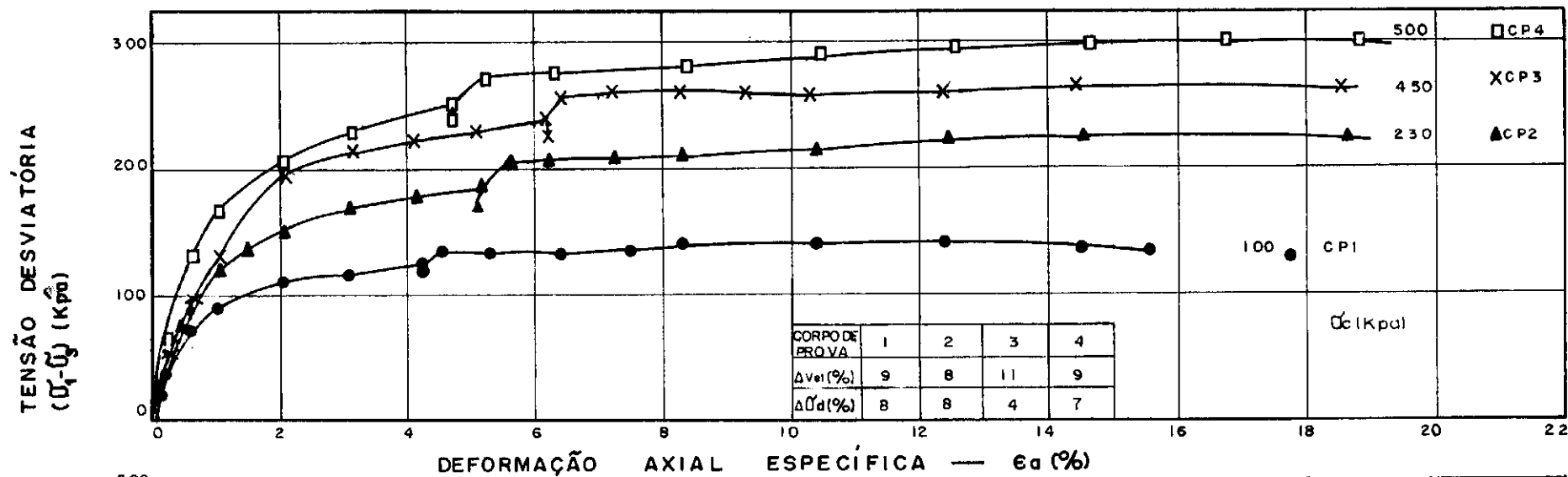
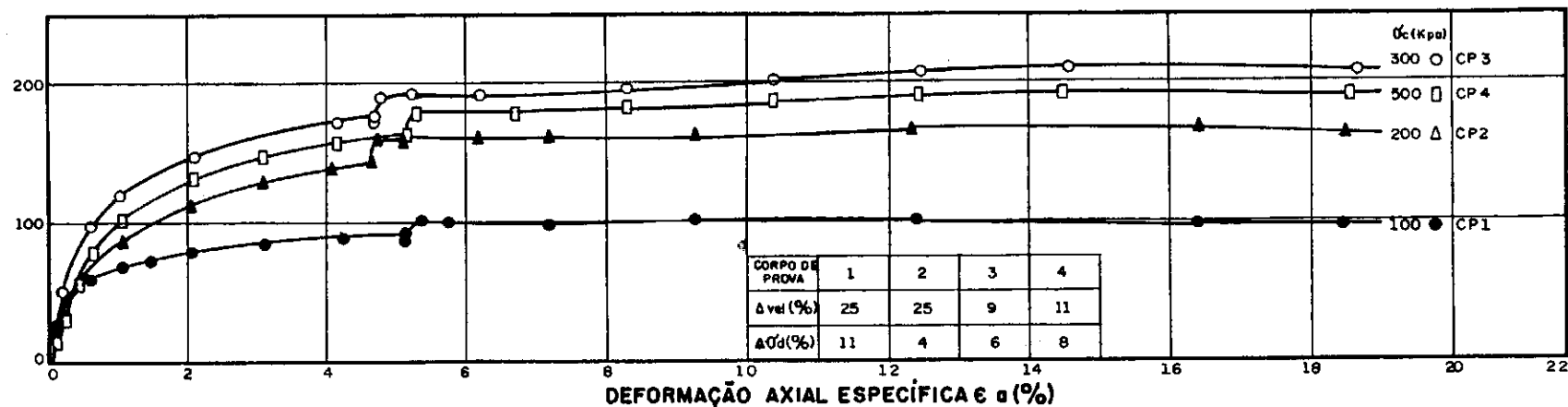


FIG. IV.4 — BARRAGEM DO AÇO — ENSAIO  $\bar{C}U$  — Wót.

TENSÃO DESVIATÓRIA  
( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) (Kpa)



ACRESCIMO DA PRESSÃO NEUTRA  
 $\Delta U$  (Kpa)

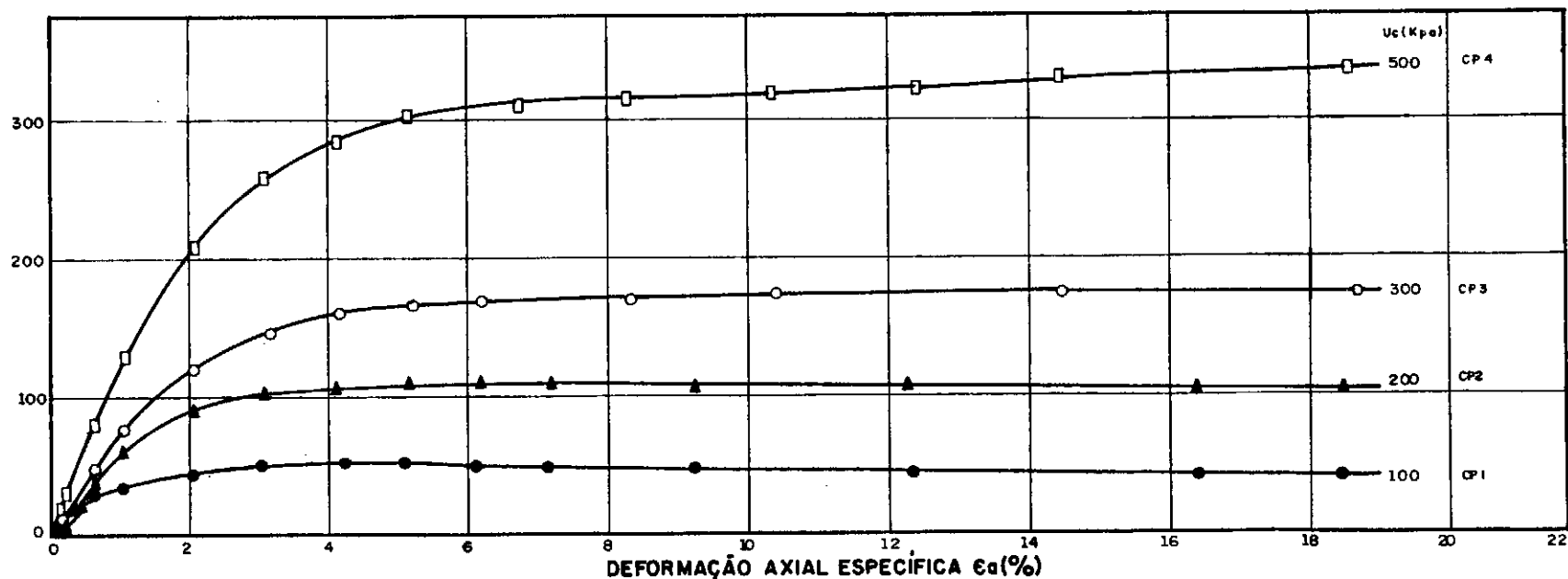


FIG. IV.4a - BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO  $\overline{CU}$  -  $W_{ot} + 4\%$

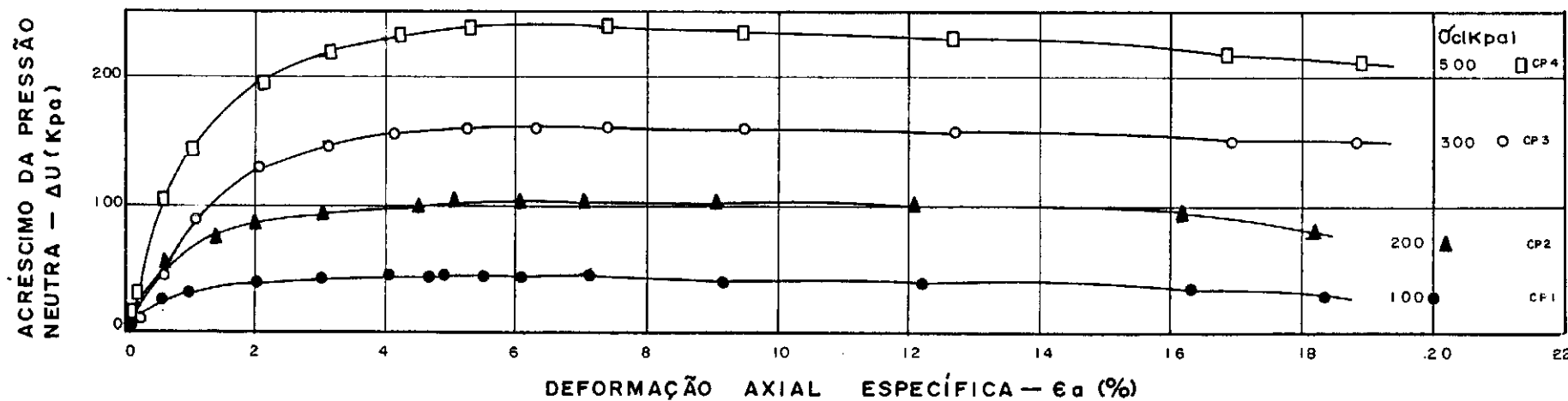
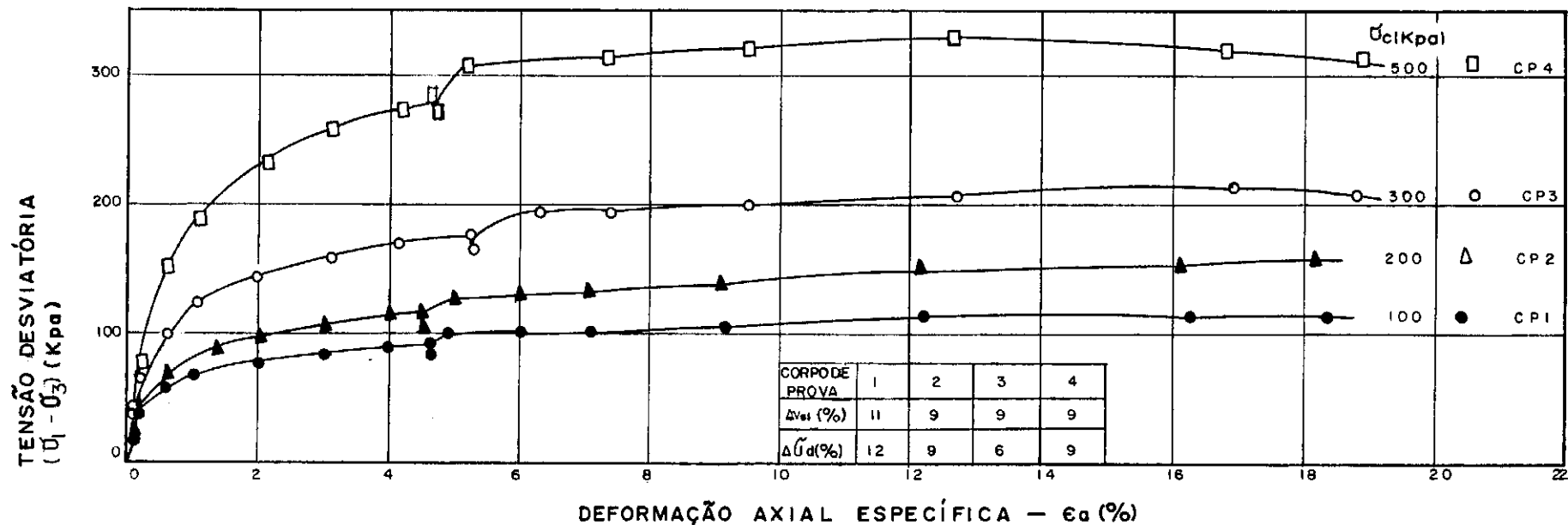


FIG. IV.4b — BARRAGEM DO AÇU — ENSAIO  $\bar{C}\bar{U}$  — Wet — 3 %

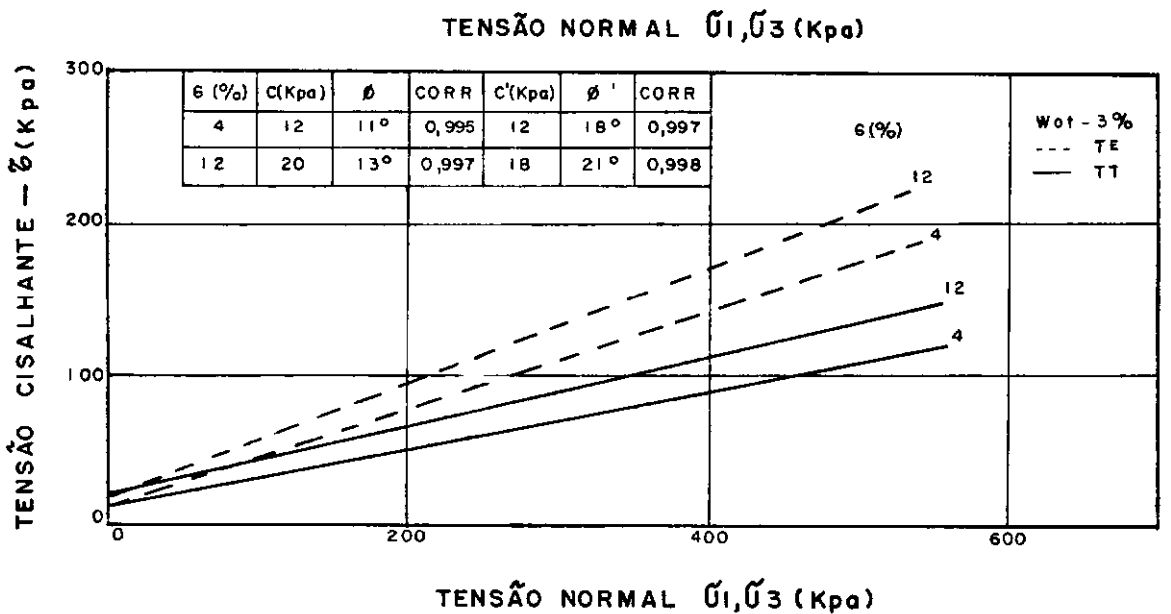
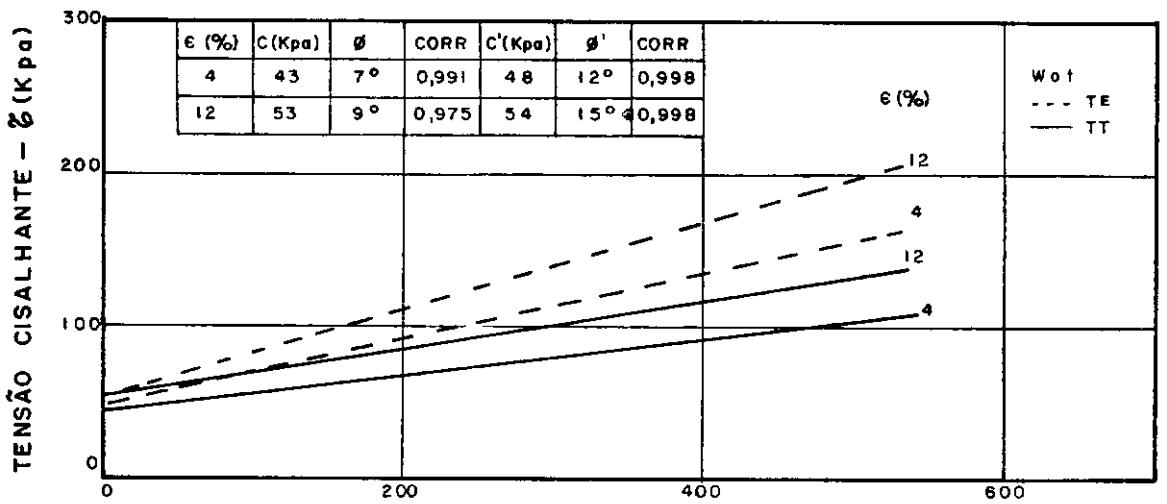
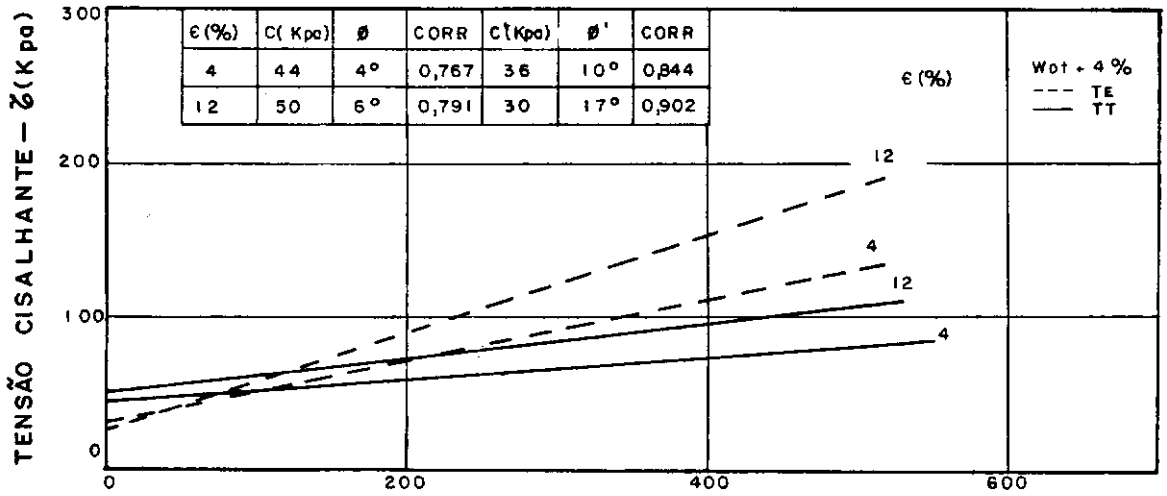


FIG. IV.4c — ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DO MATERIAL  
DA BARRAGEM DO AÇU — ENSAIO  $\bar{C}\bar{U}$



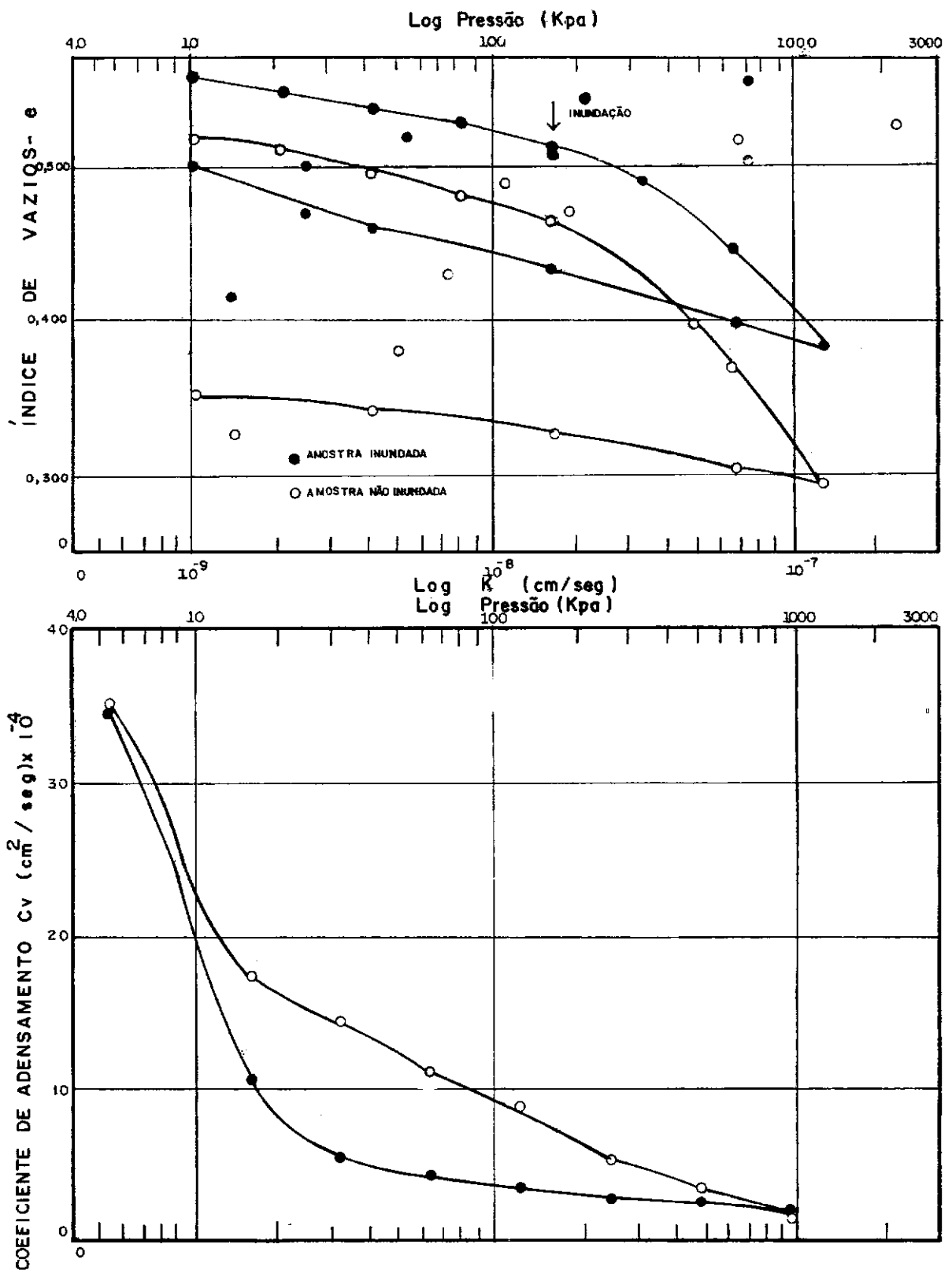


FIG. IV.5 — ENSAIO DE ADENSAMENTO — MATERIAL DA BAR — RAGEM DO AÇU. UMIDADE ÓTIMA.

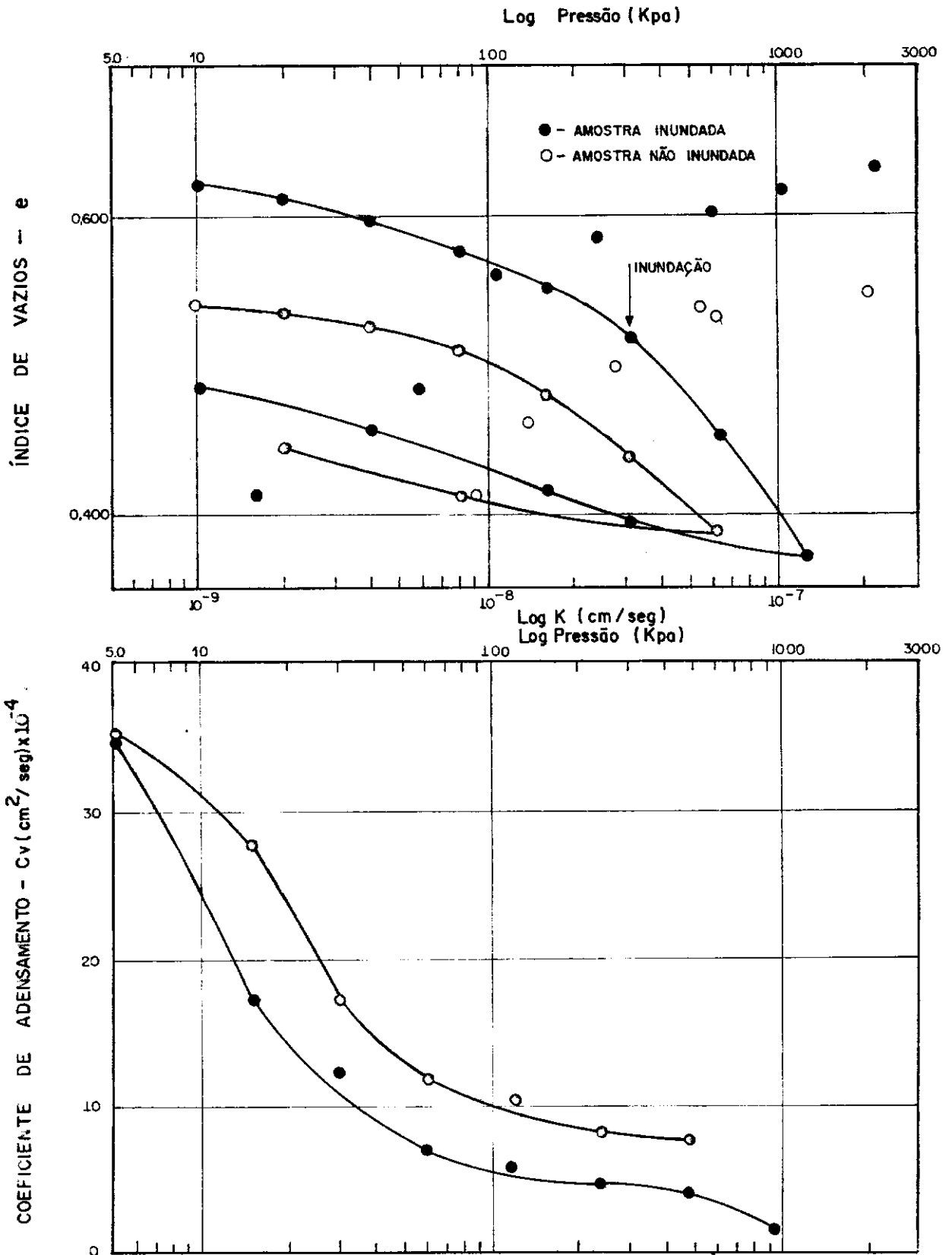


FIG. IV.5a — ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL DO MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU COMPACTADO NA UMIDADE ÓTIMA + 2%.

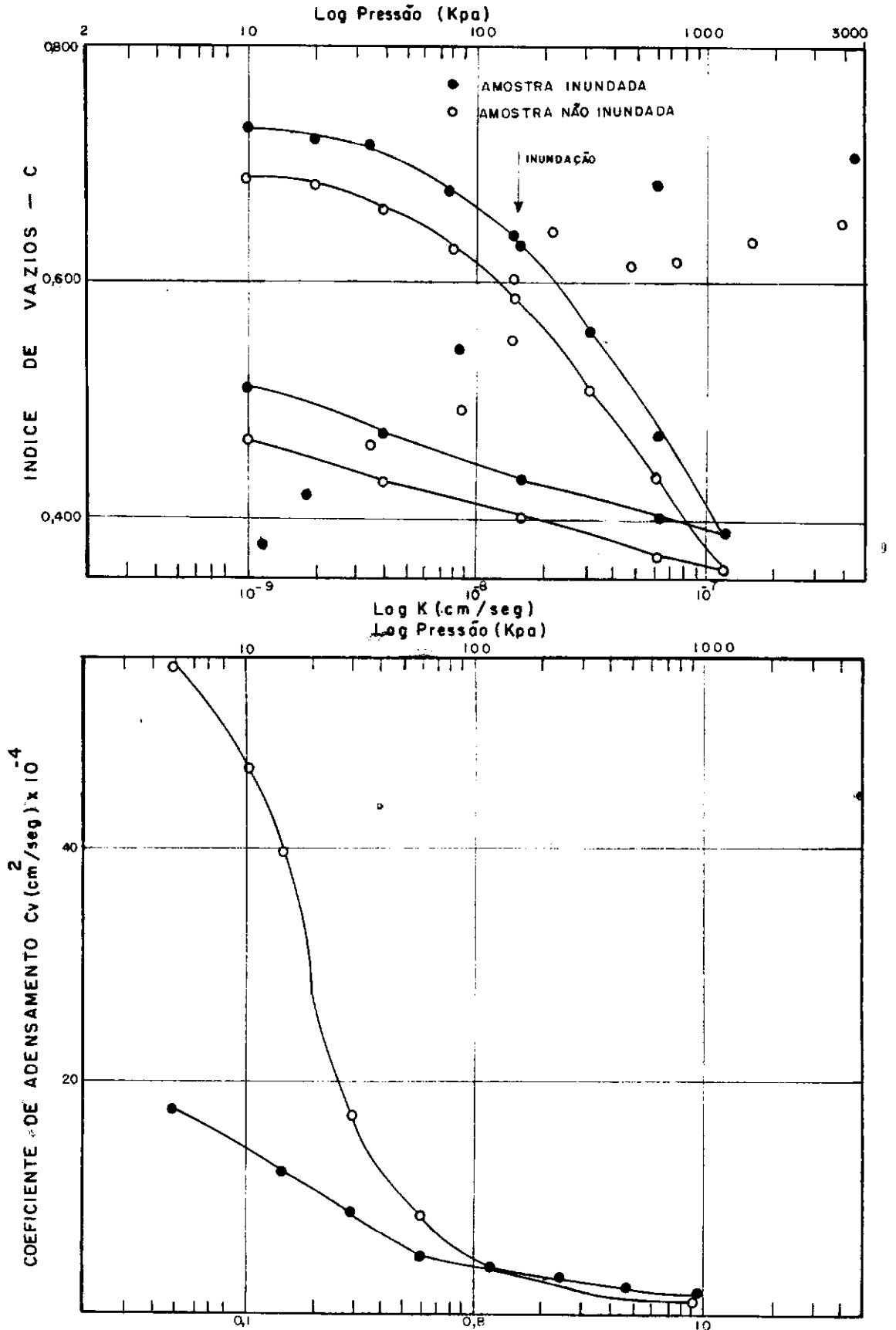


FIG. IV. 5B-ENSAIO DE ADENSAMENTO MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU - UMIDADE ÓTIMA + 5%

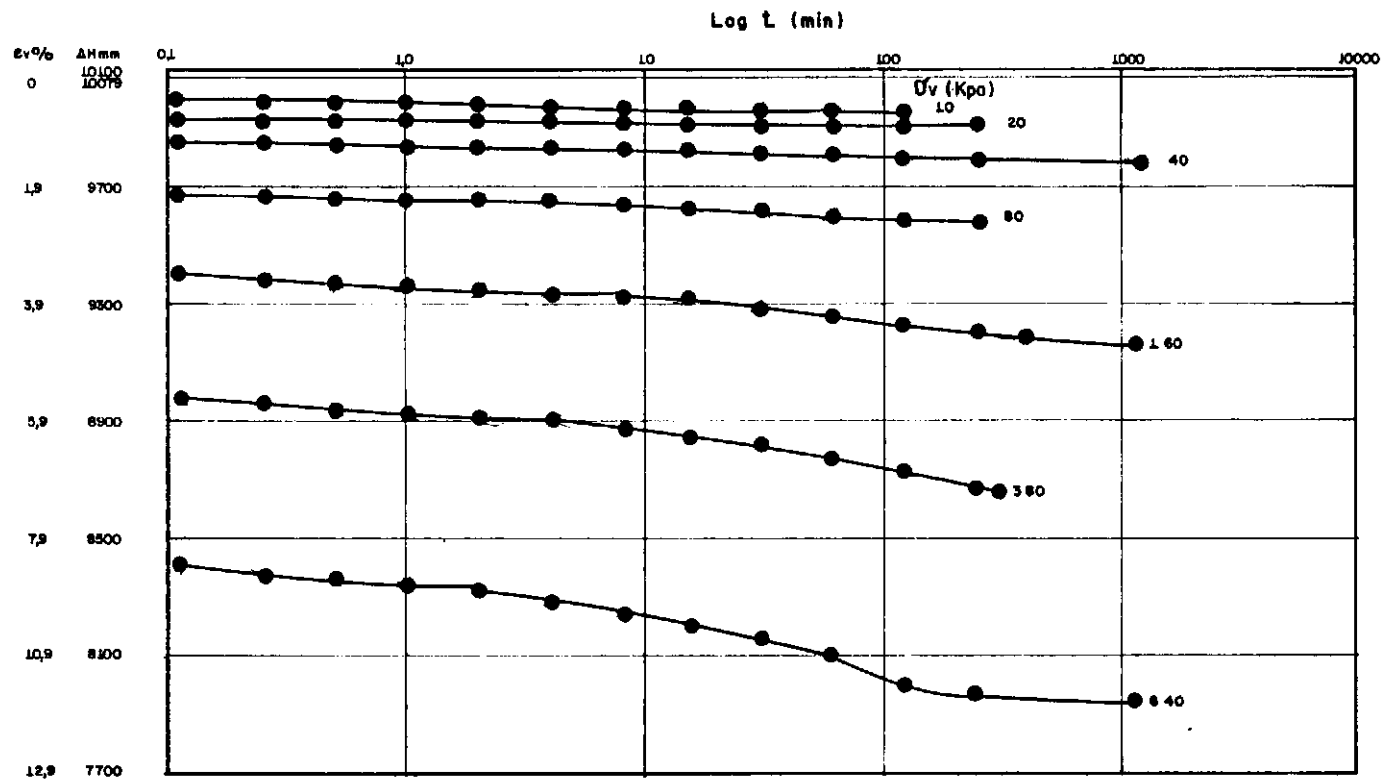


FIG.IV.5c — ENSAIO DE ADENSAMENTO - MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU - AMOSTRA COMPACTADA NA UMIDADE ÓTIMA SEM INUNDAÇÃO.

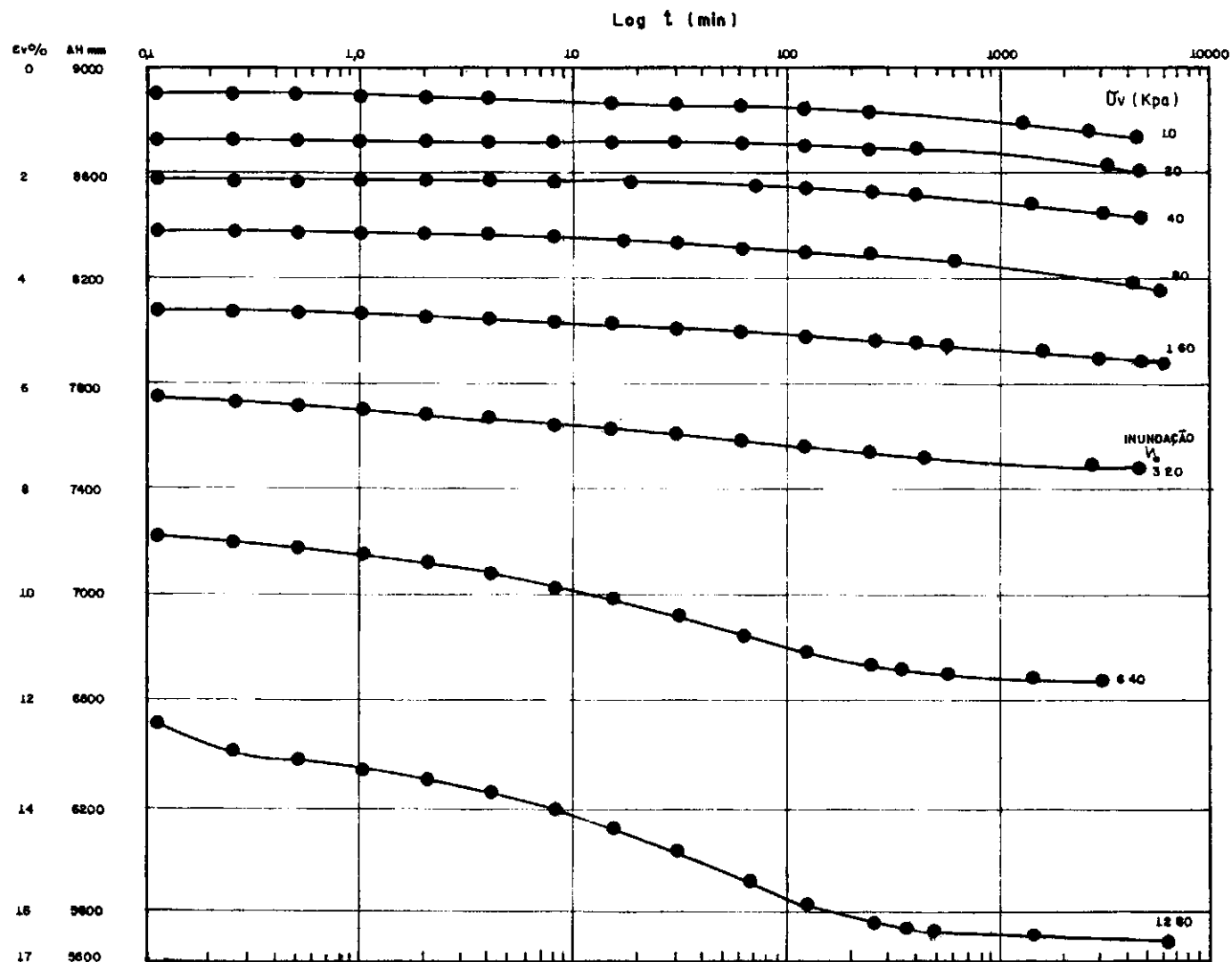


FIG.IV. 5d — ENSAIO DE ADENSAMENTO — MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU  
AMOSTRA COMPACTADA NA UMIDADE ÓTIMA INUNDADA.

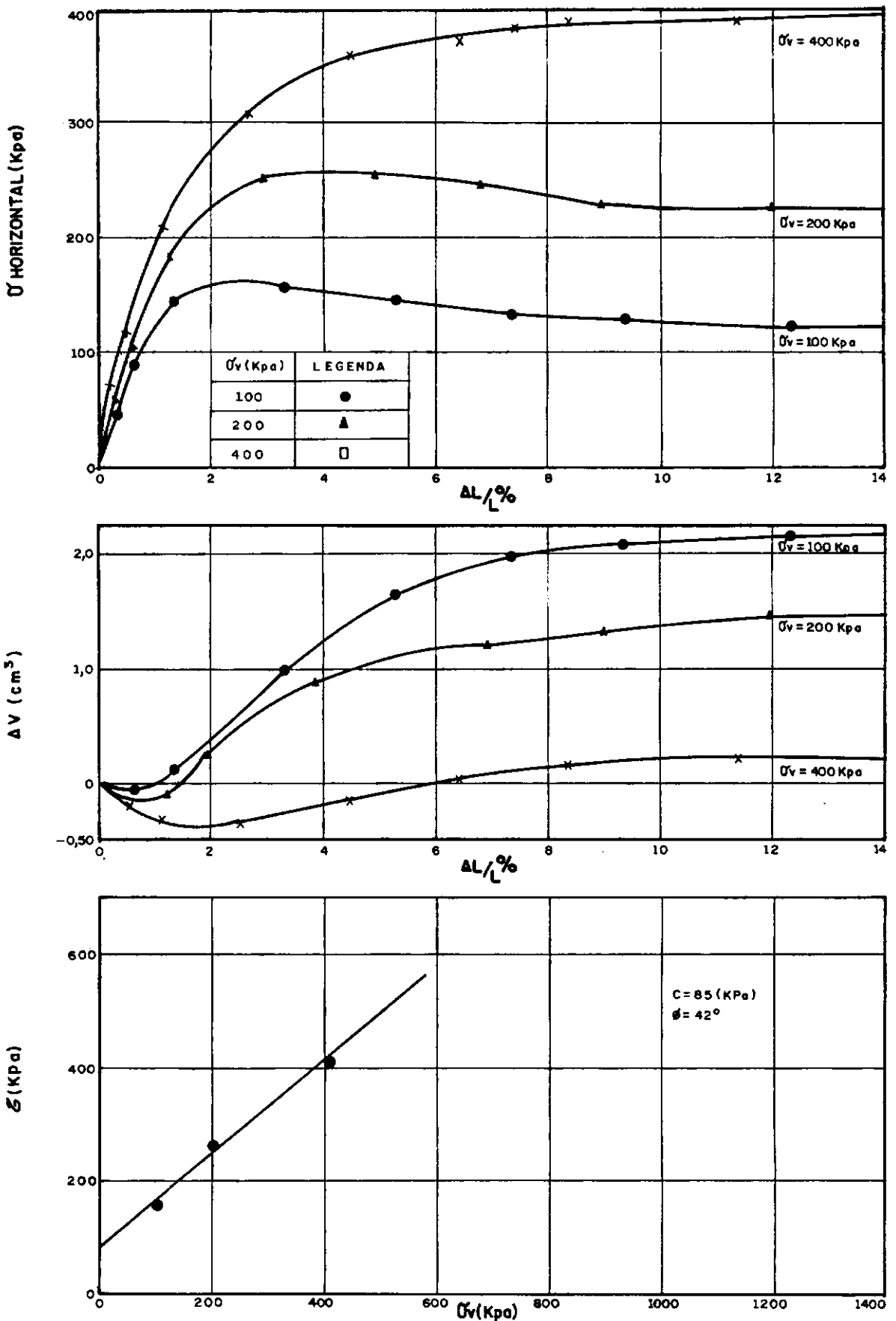


FIG. IV.6 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISCALHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA COMPACTADA DA BARRAGEM DE BOCAINA. UNIDADE ÓTIMA - 2%

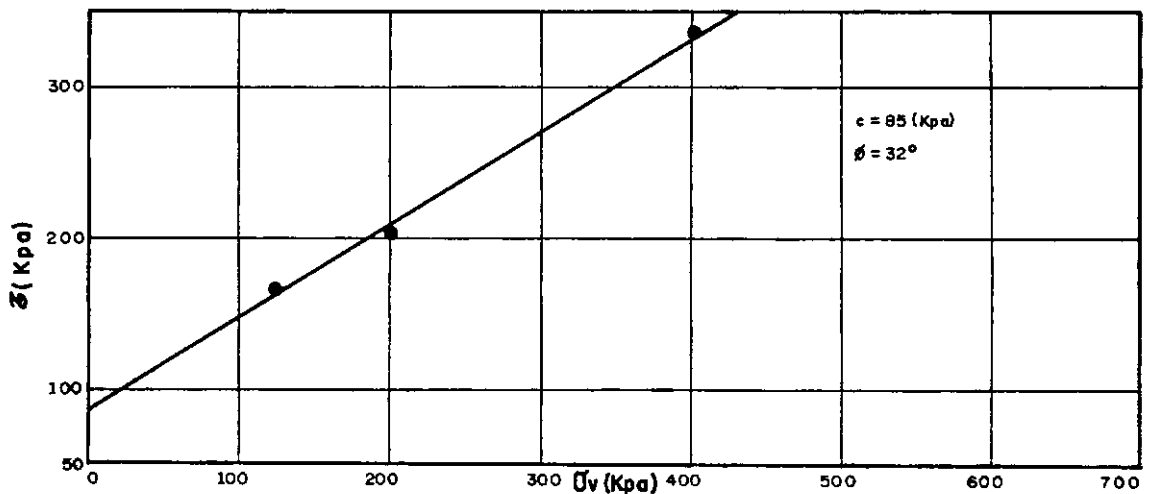
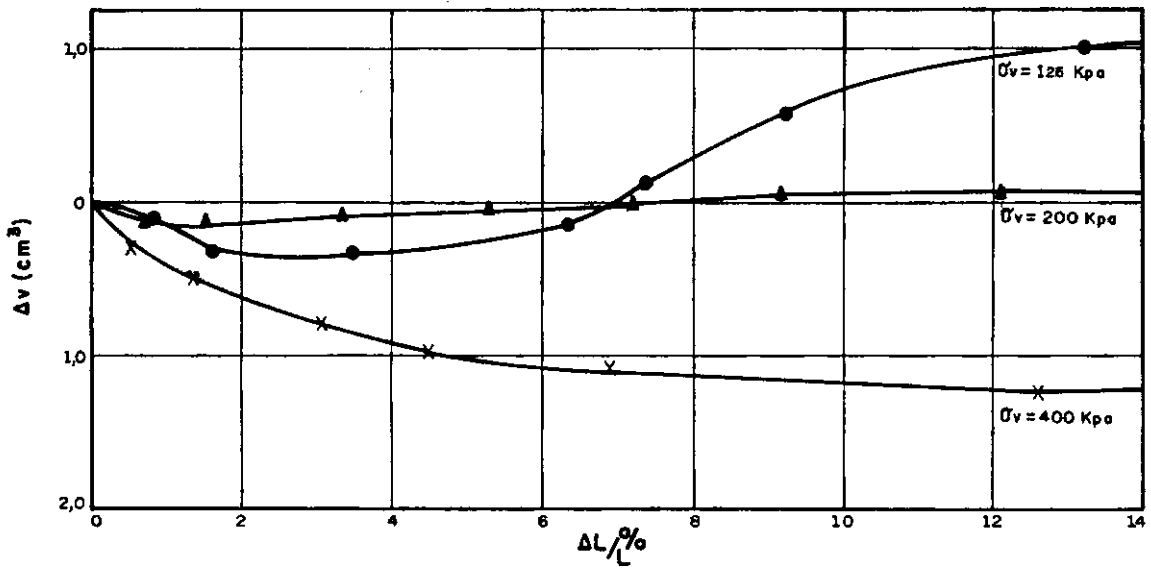
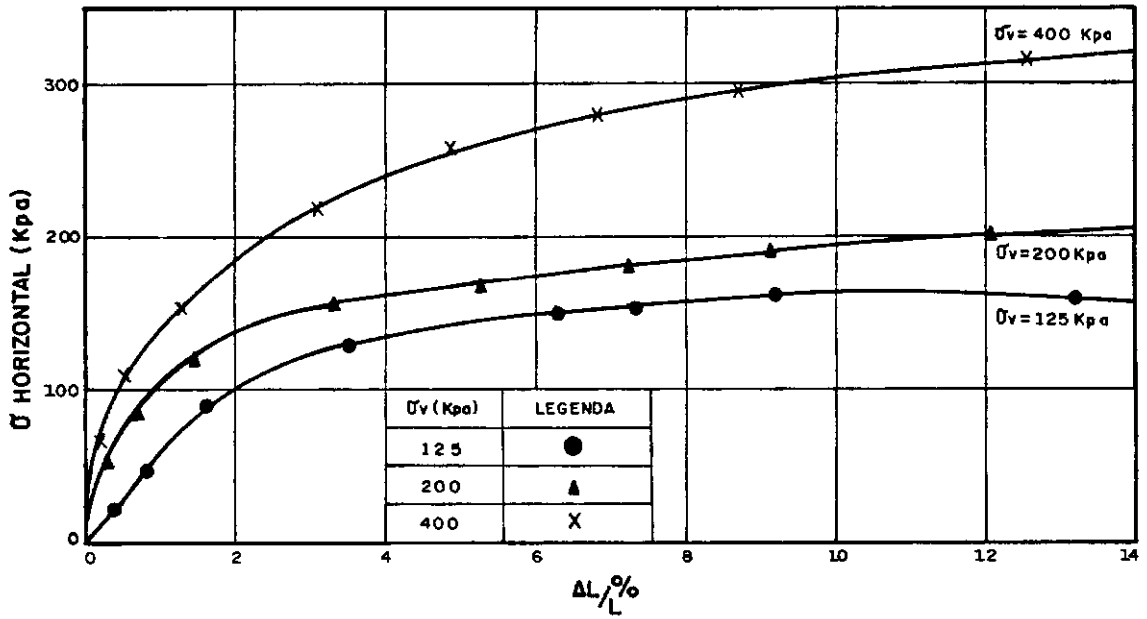


FIG. IV. 6a — RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA COMPACTADA DA BARRAGEM DE BOCAINA. UMIDADE ÓTIMA

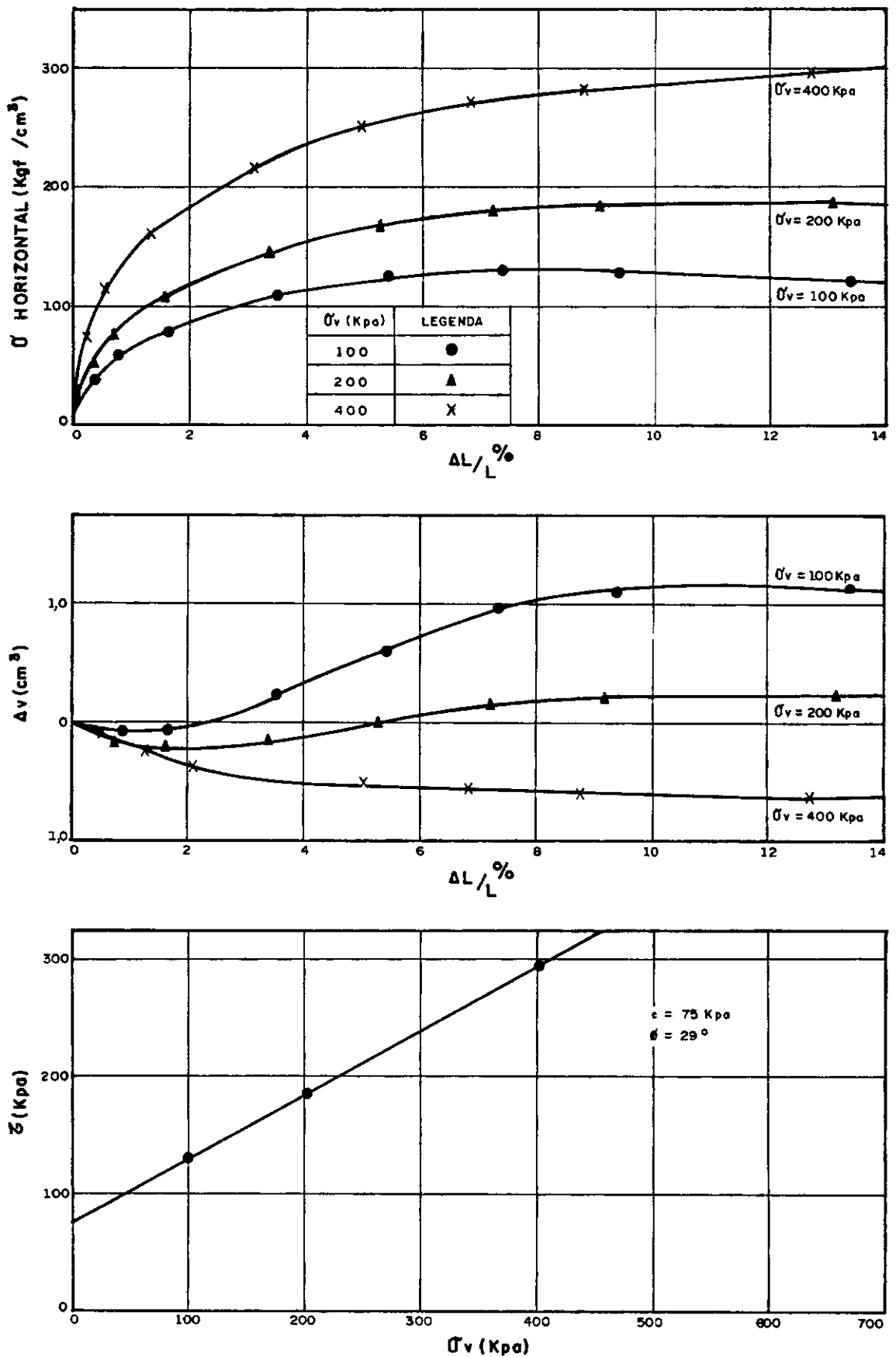


FIG. IV. 6b - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CISLHAMENTO DIRETO DA AMOSTRA COMPACTADA DA BARRAGEM DE BOCAÍNA. UMIDADE ÓTIMA + 2 %



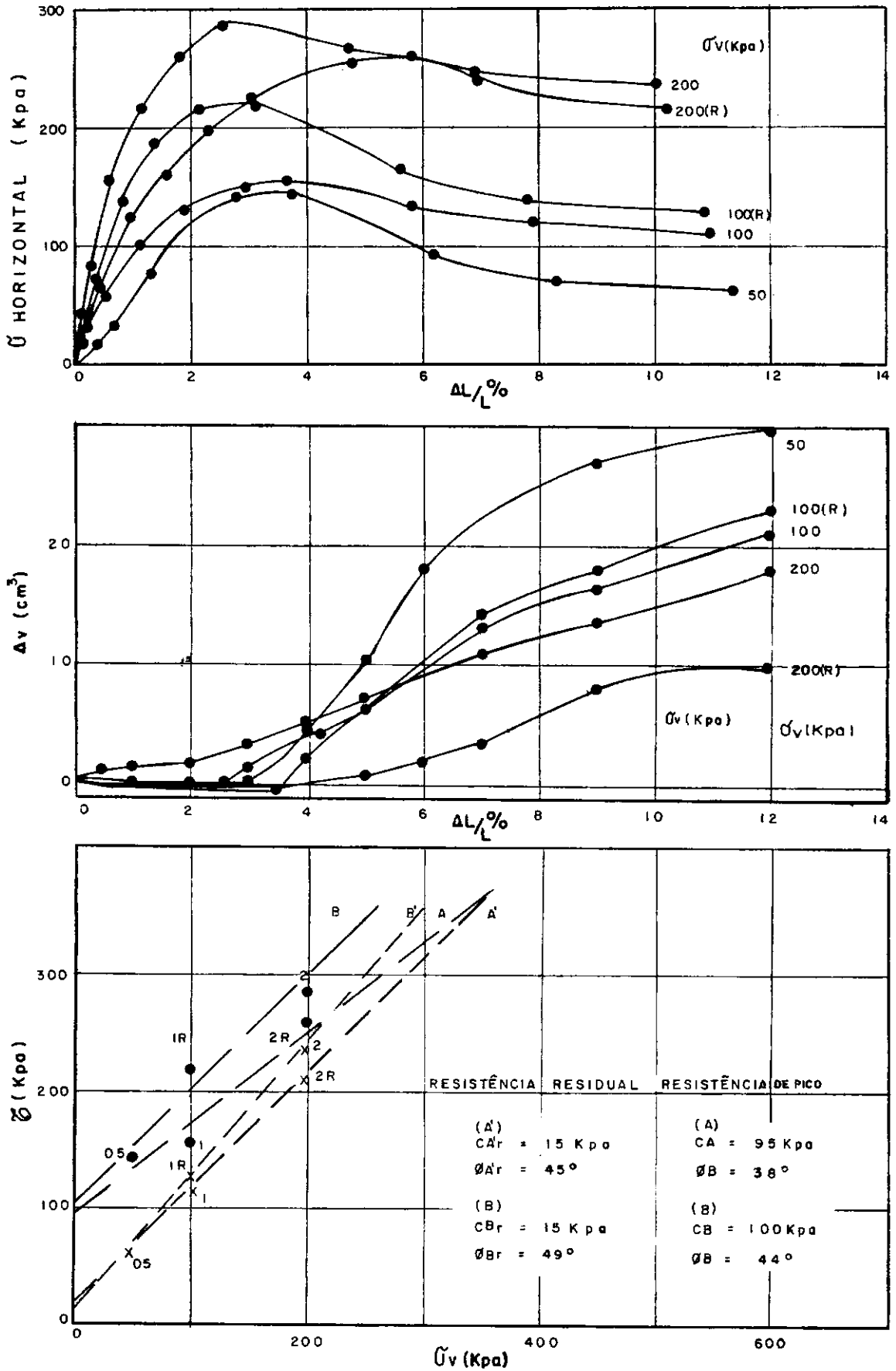
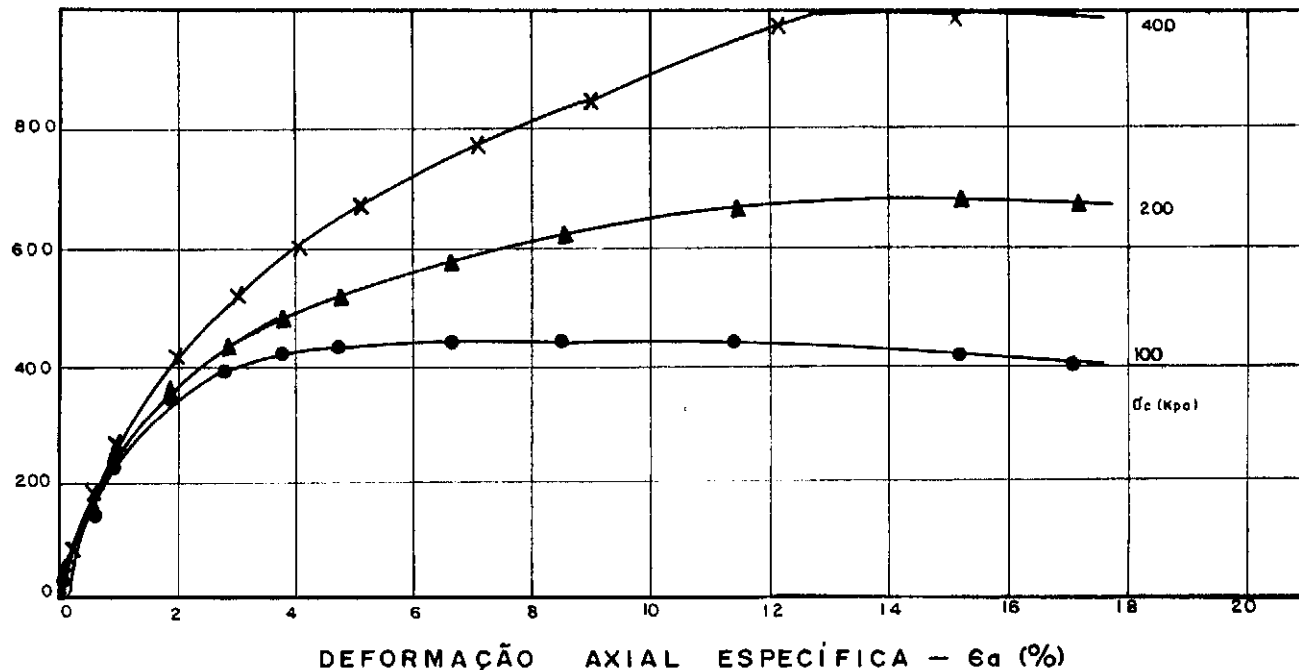


FIG-IV7- RESULTADO DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO DA AMOS - TRA INDEFORMADA DA BARRAGEM DE BOCAÍNA.

TENSÃO DESVIATÓRIA -  $\bar{\sigma}_1 - \bar{\sigma}_3$  (Kpa)



TENSÃO CISALHANTE -  $\bar{\sigma}$  (Kpa)

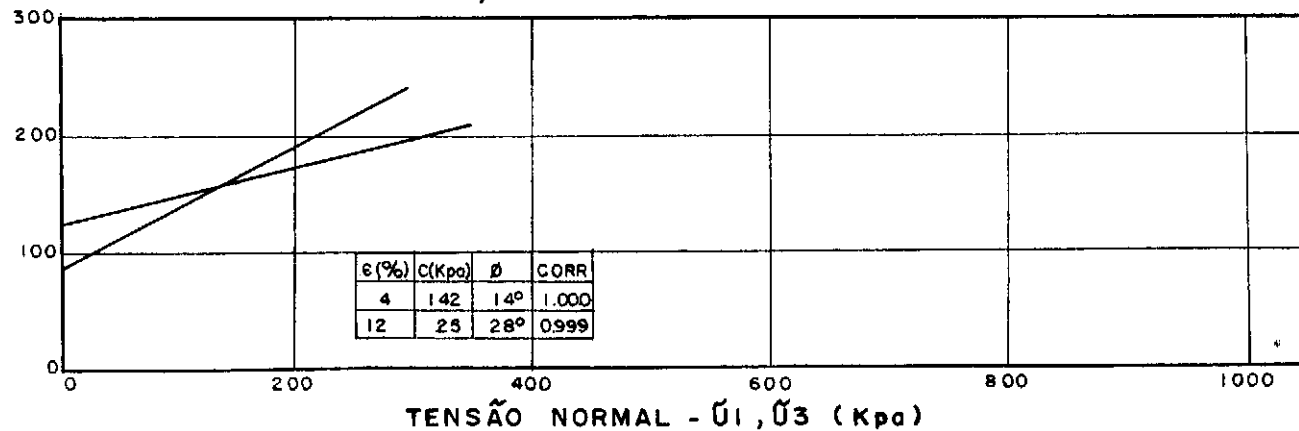


FIG. IV-8 - BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO UU - Wet - 2 %

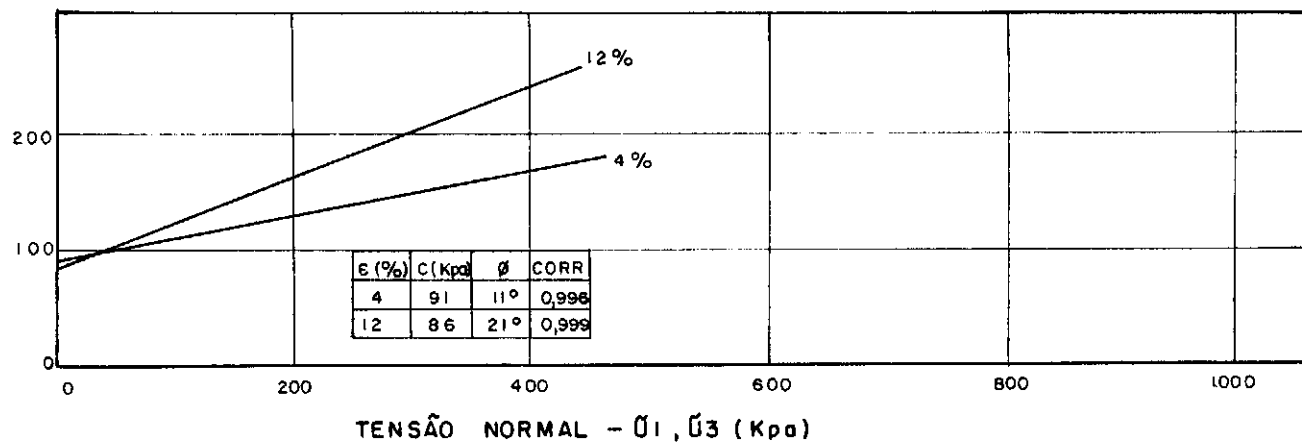
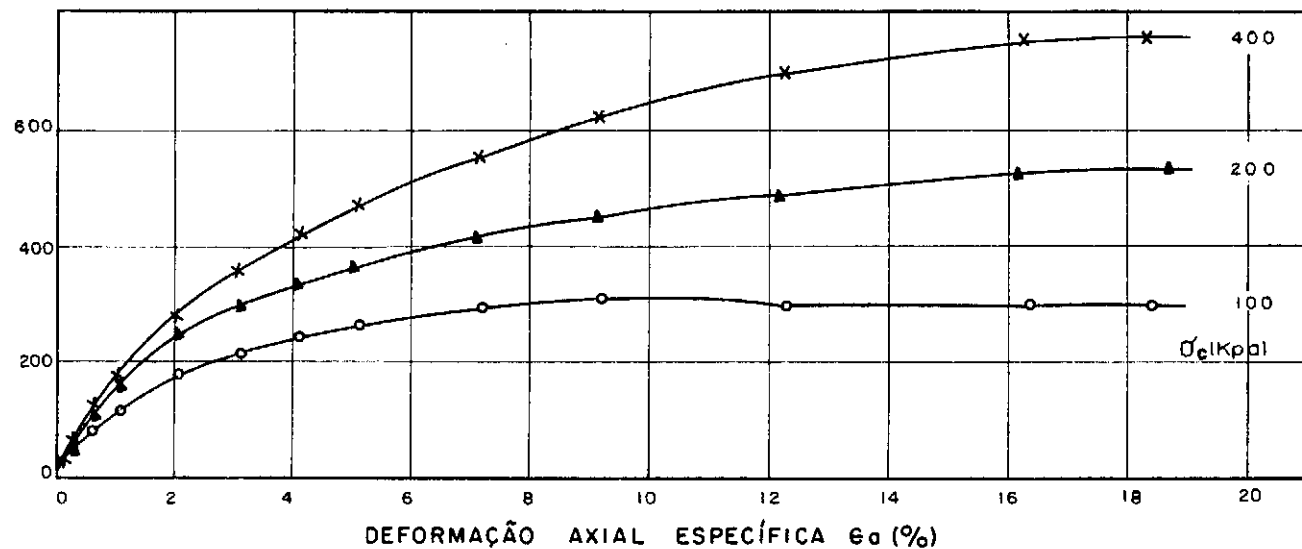


FIG. IV.8a - BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO UU - Wot

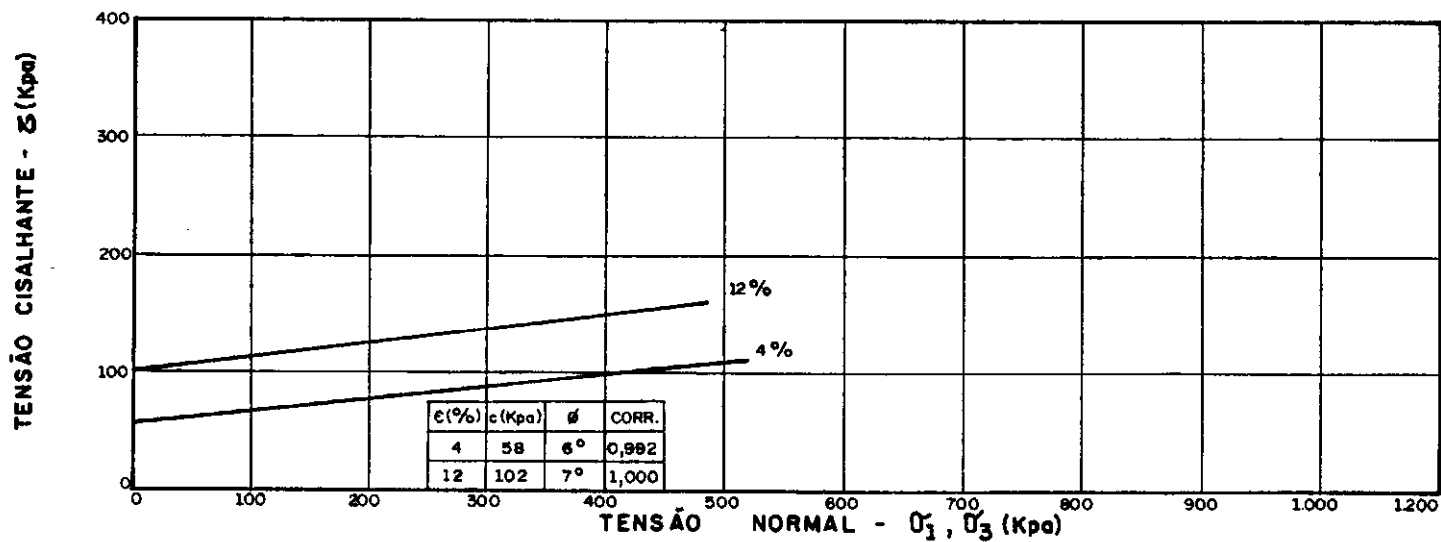
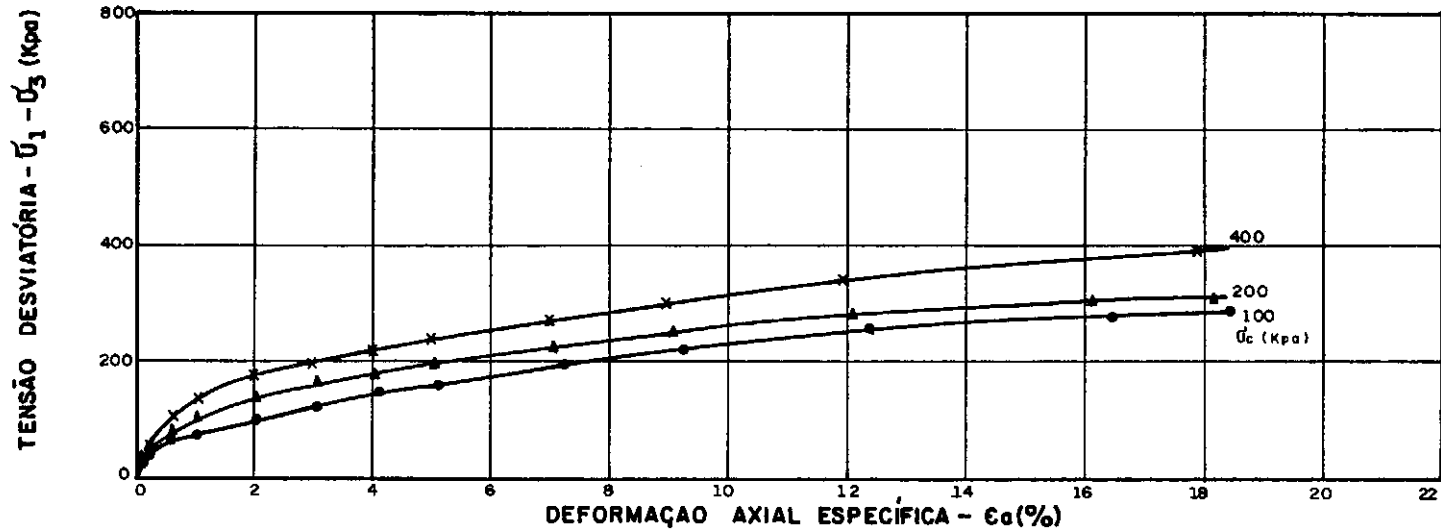


FIG. IV.8 b — BARRAGEM DE BOCAINA — ENSAIO UU —  $W_{ot} + 2\%$

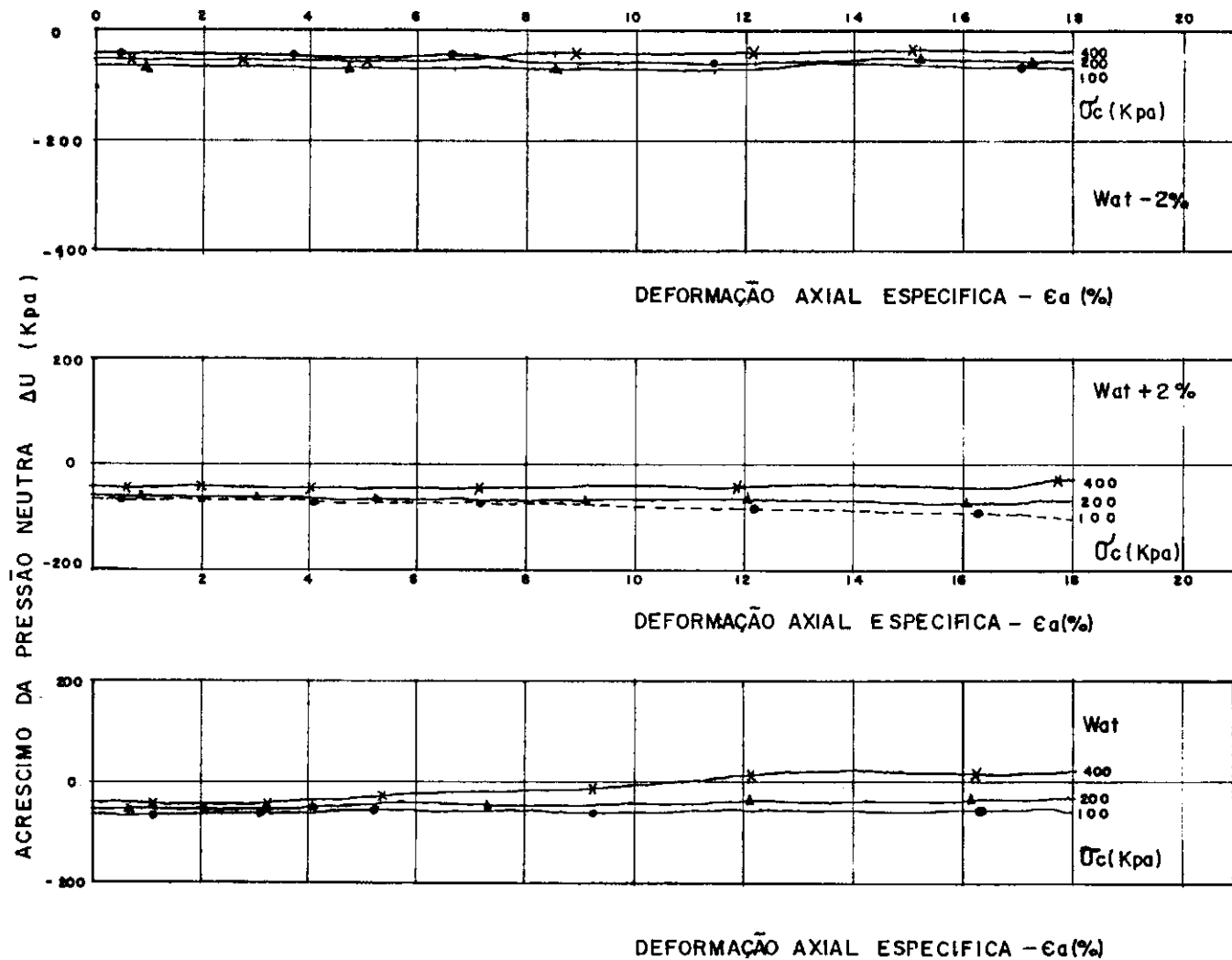


FIG. IV - 8c - CURVAS PRESSÃO NEUTRA - DEFORMAÇÃO DOS ENSAIOS UU DA BARRAGEM DE BOCAINA

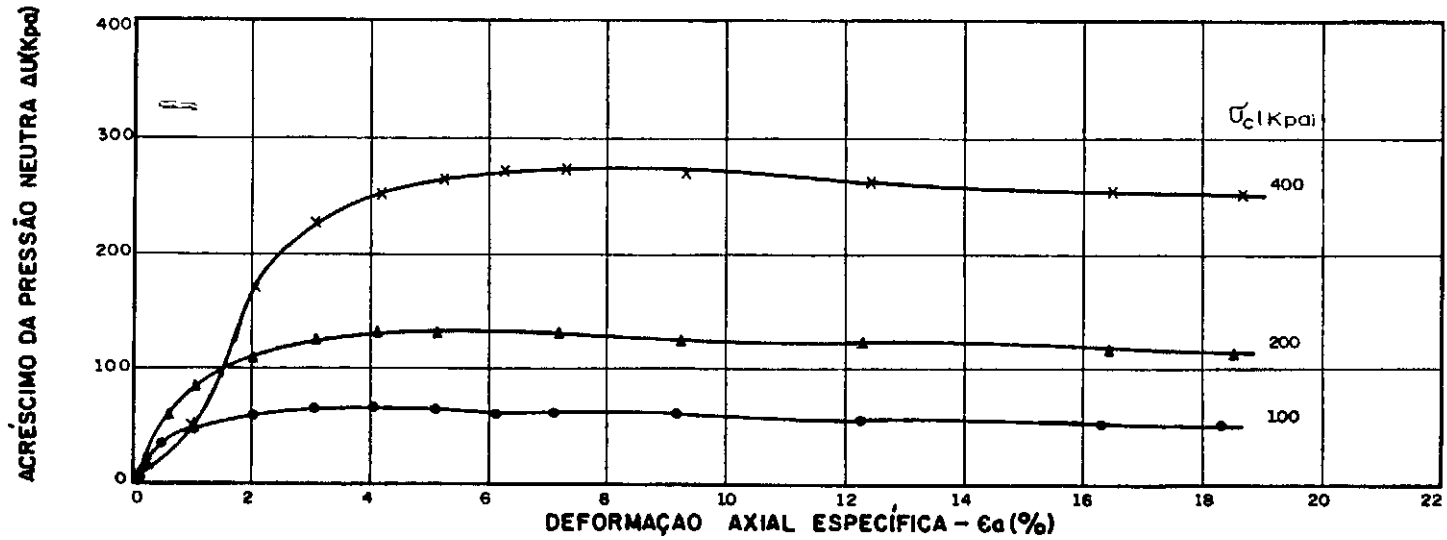
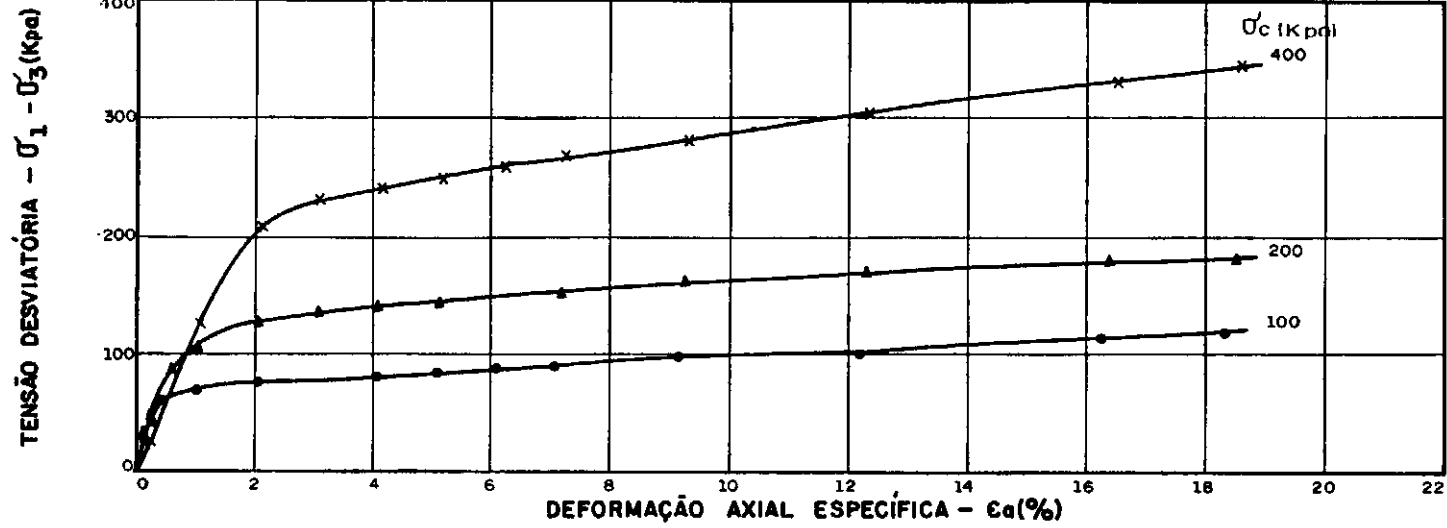


FIG. IV.9 — BARRAGEM DE BOCAINA — ENSAIO  $\overline{C\bar{U}}$  —  $W_{ot} - 2\%$

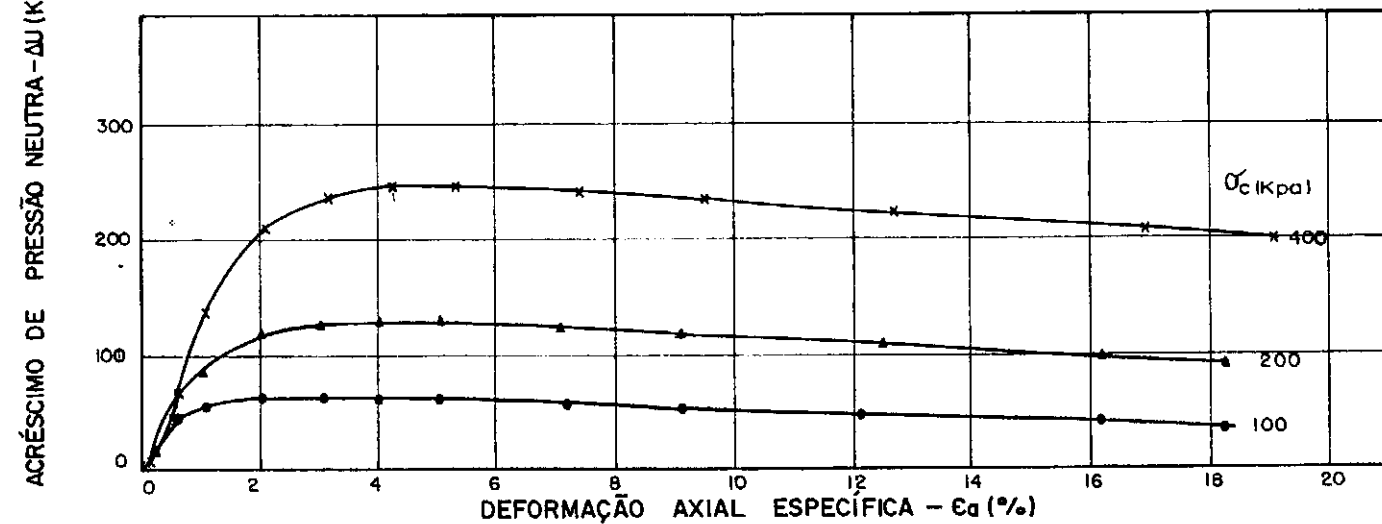
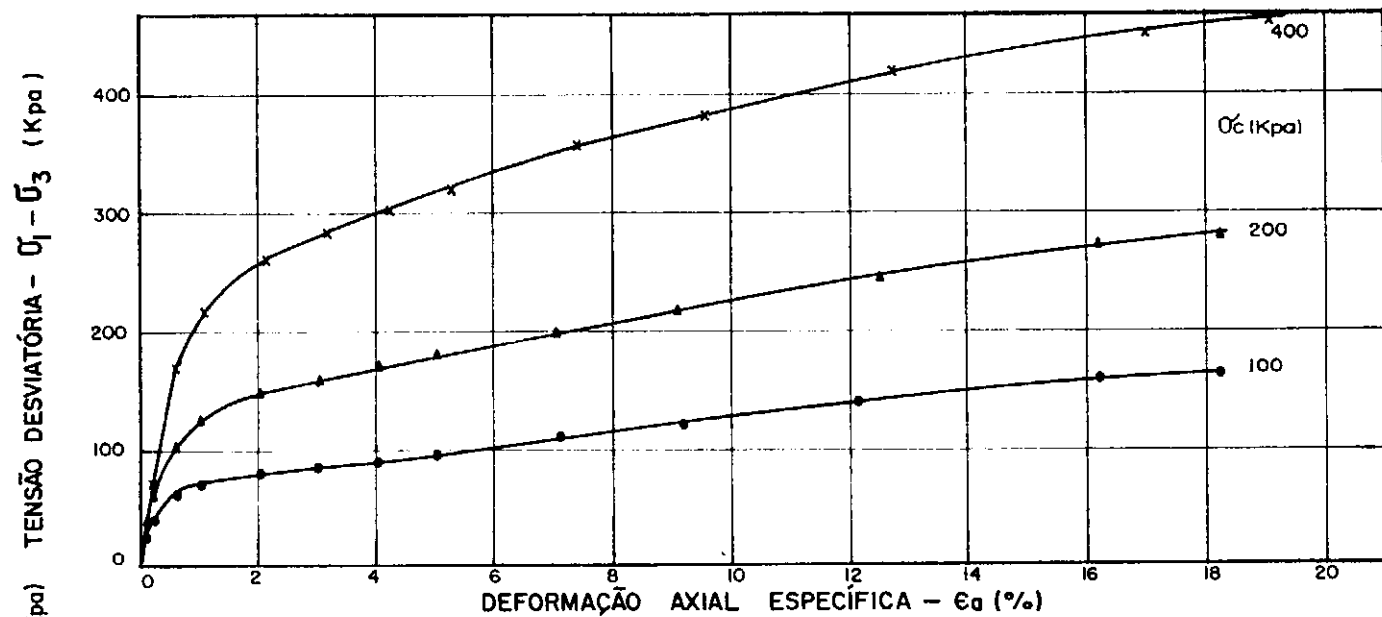


FIG. IV.9a - BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO  $\bar{c}u$  - UMIDADE ÓTIMA + 2%.

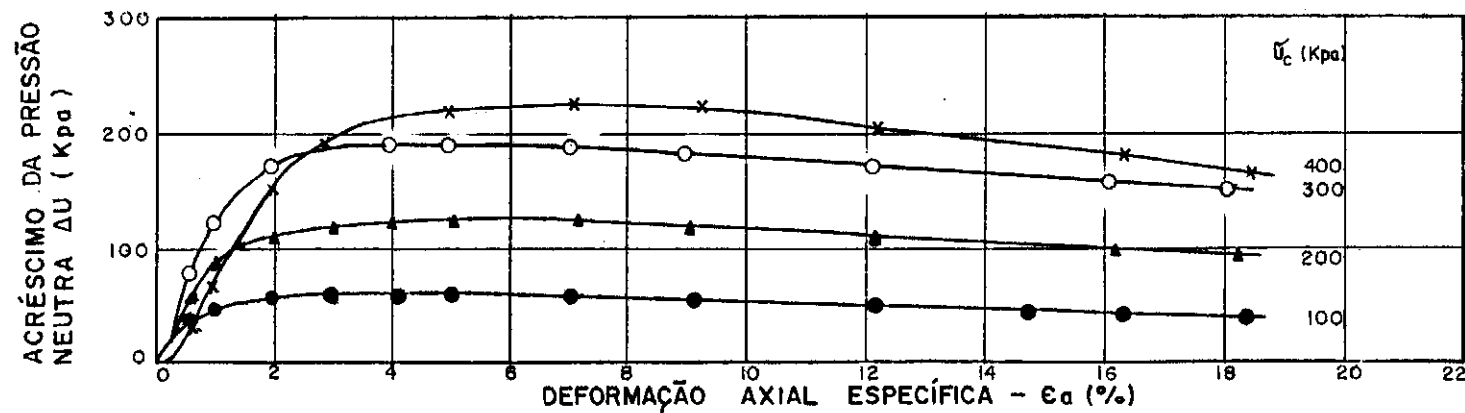
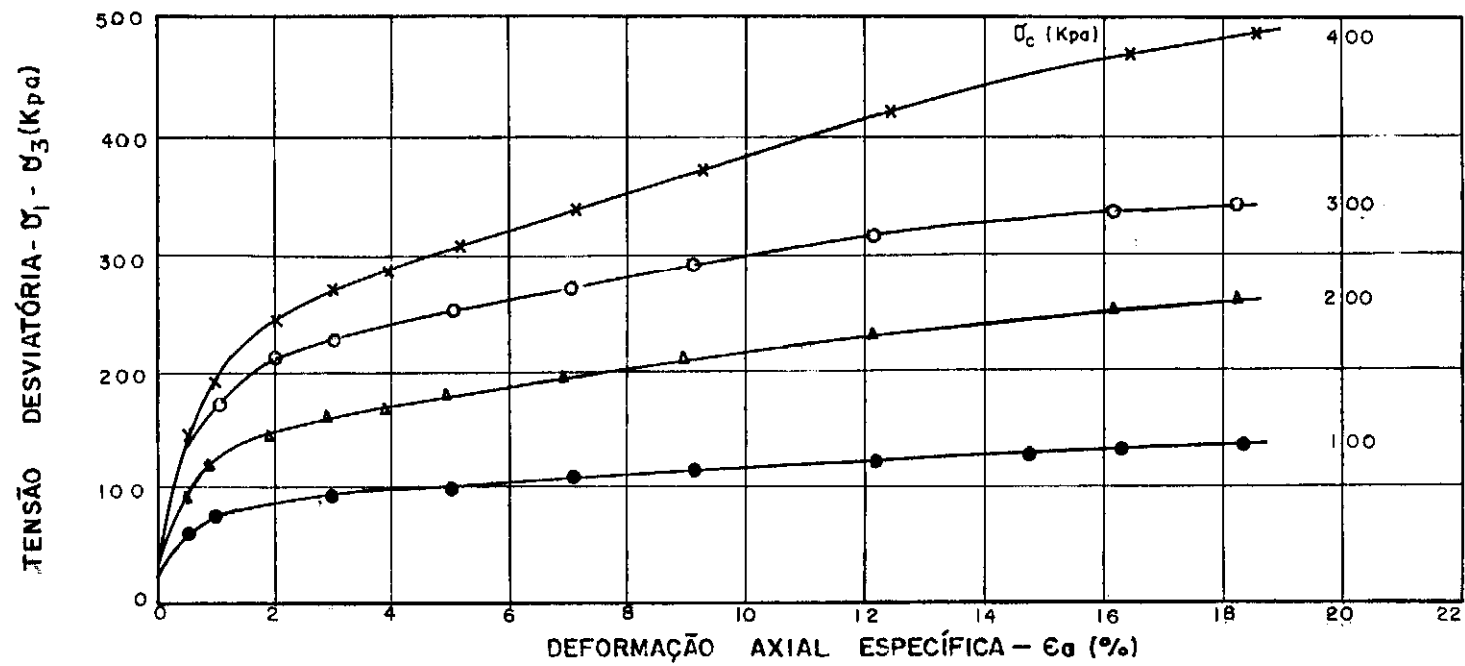


FIG. IV.9b - BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO  $\bar{c}u$  -  $W_{ot}$



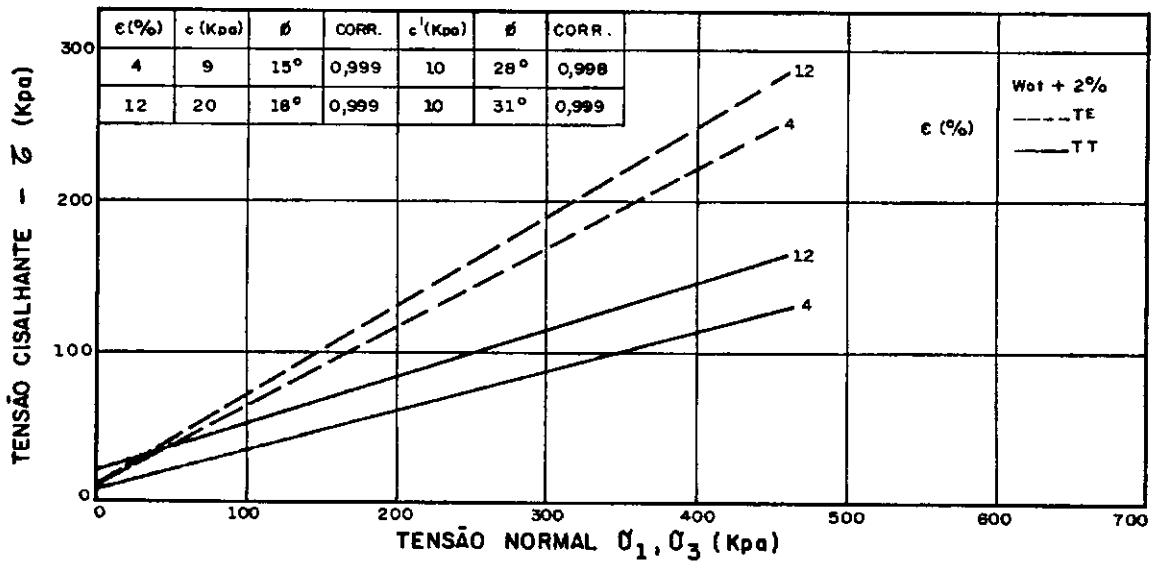
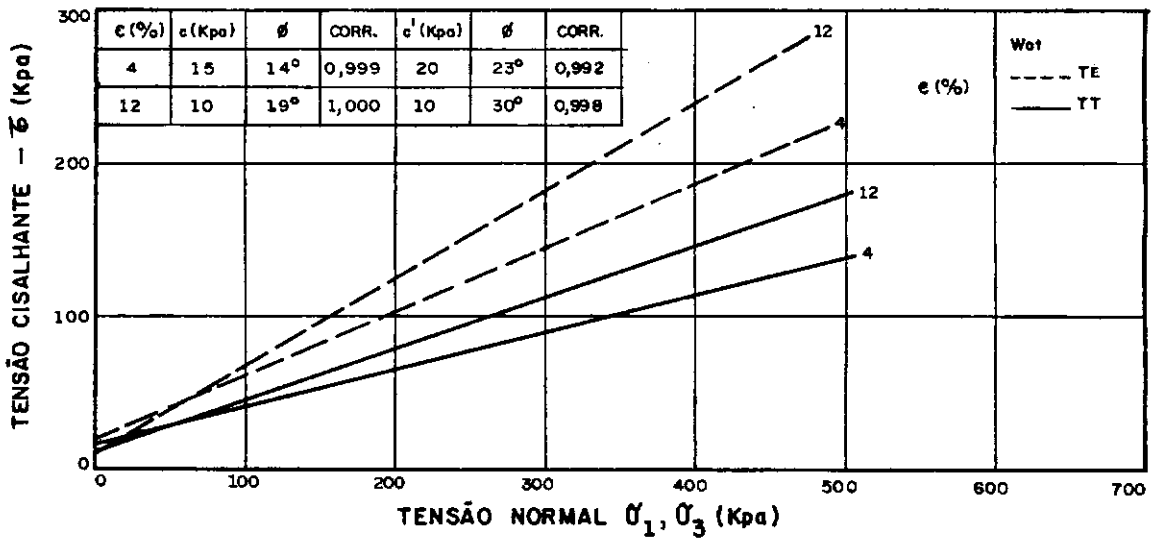
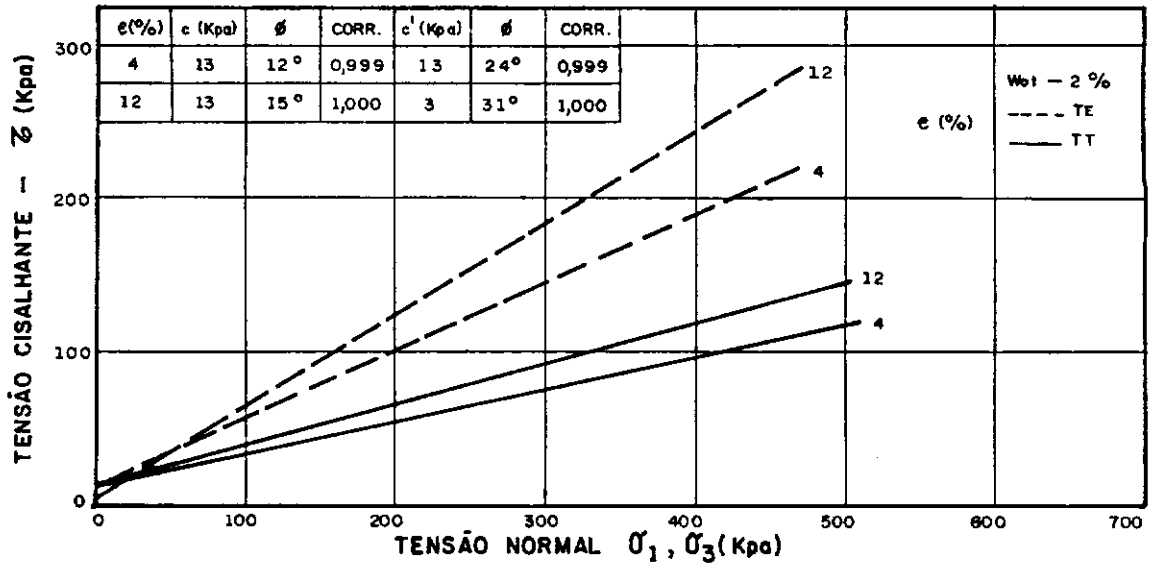


FIG.IV.9c ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA DO MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA — ENSAIO CŪ

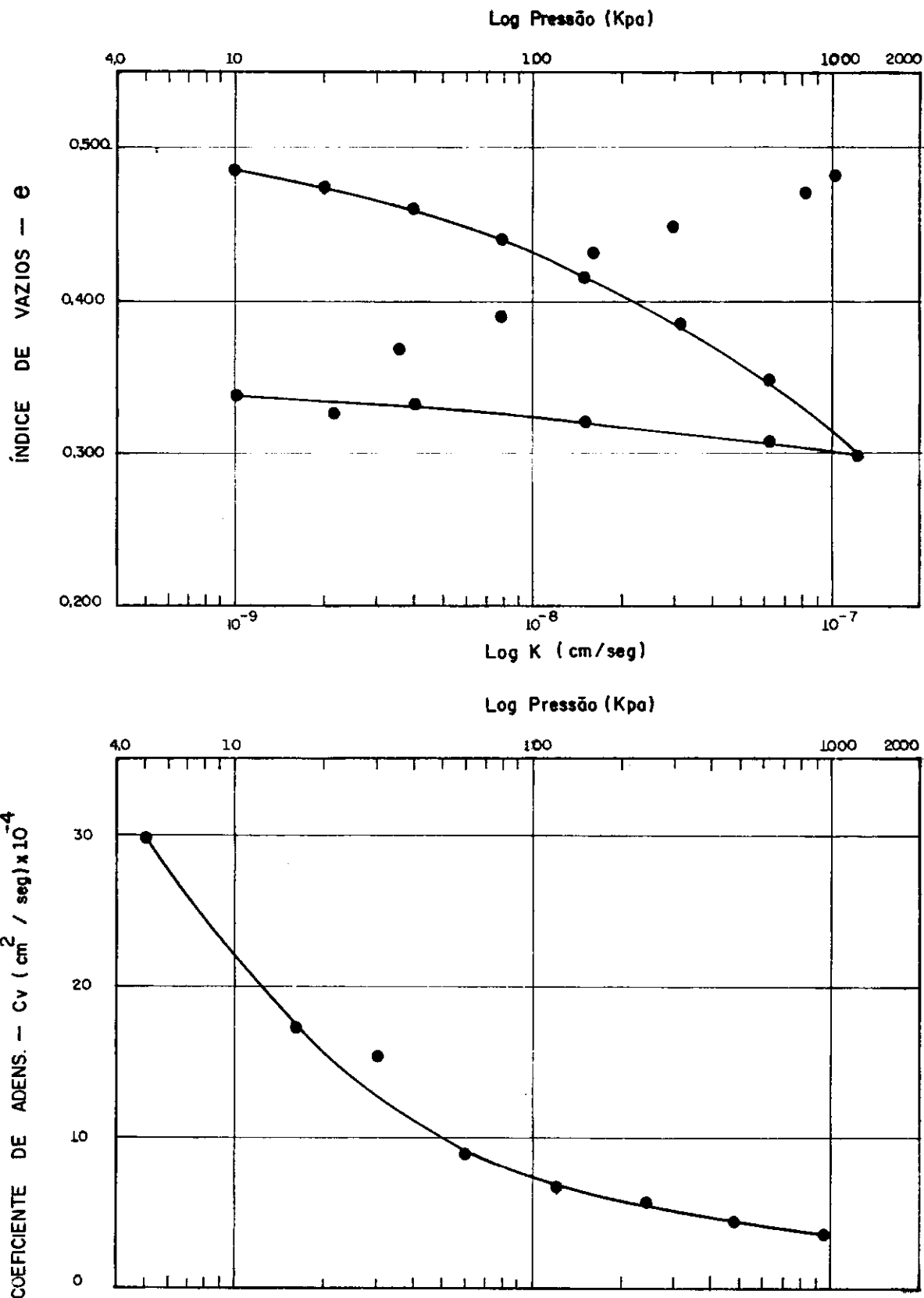


FIG IV.10 — CURVA DE ADENSAMENTO DA AMOSTRA COMPACTADA DA BARRAGEM DE BOCAINA NA UMIDADE ÓTIMA - 2%.

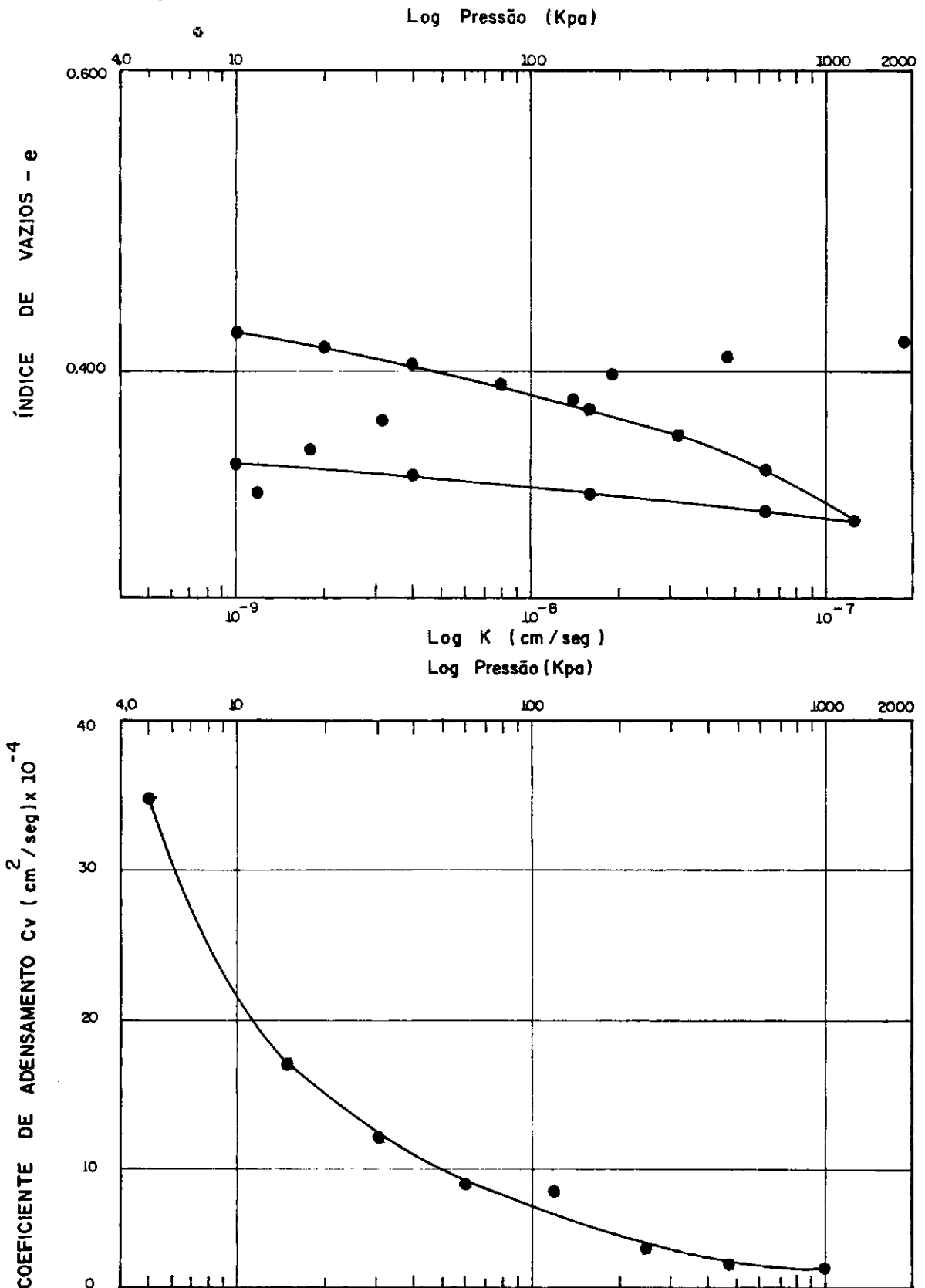
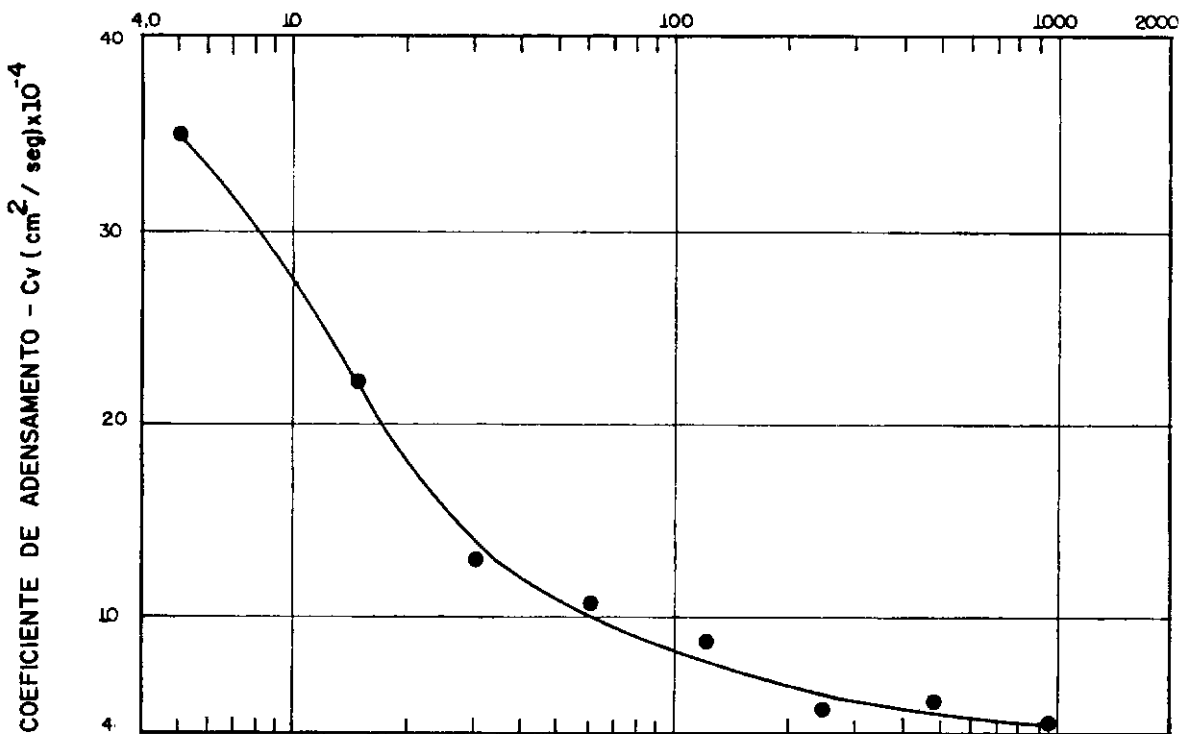
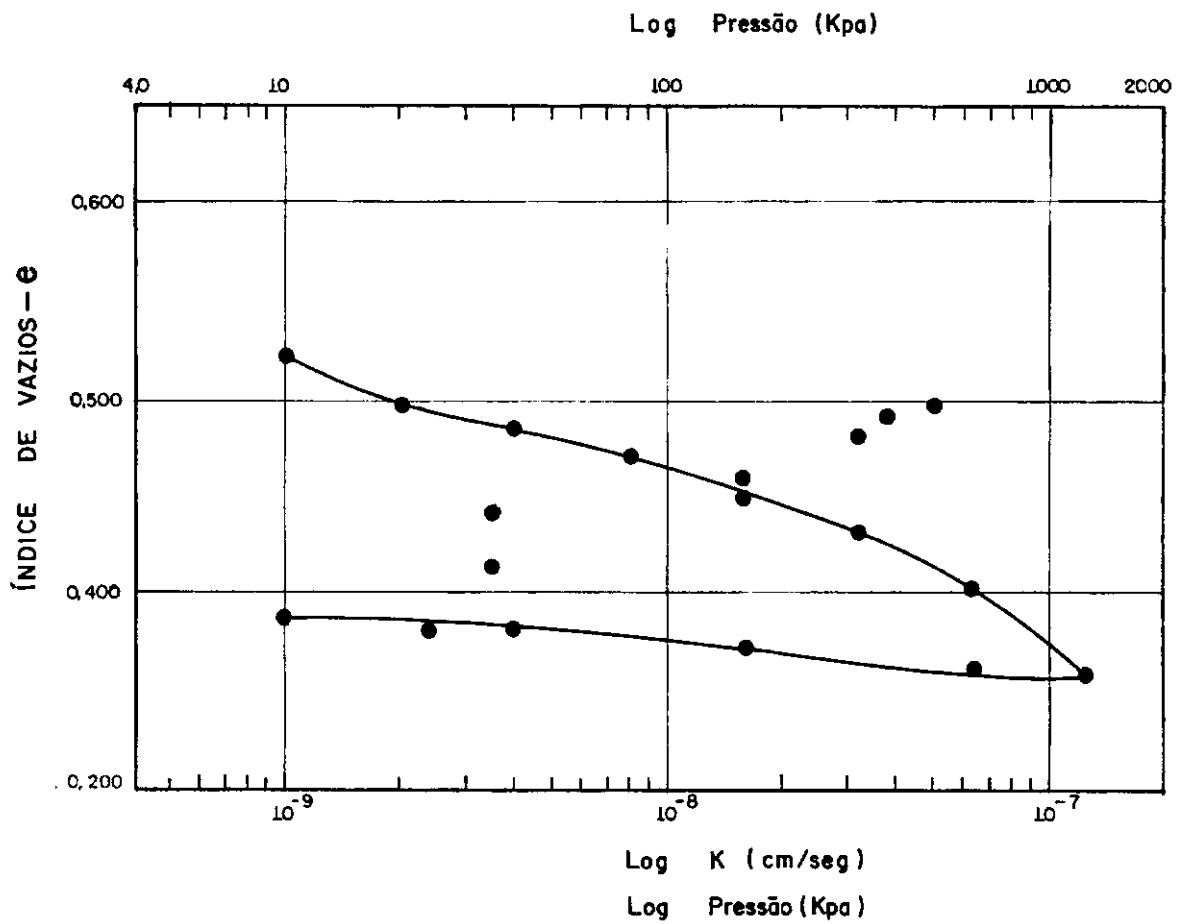


FIG. IV.10a — ENSAIO DE ADENSAMENTO VERTICAL DO MATERIAL DE BOCAINA COMPACTADO NA UMI-DADE ÓTIMA.



**FIG IV. 10b** — CURVAS DE ADENSAMENTO DA AMOSTRA COMPACTADA DA BARRAGEM DE BOCAINA NA UNIDADE ÓTIMA + 2%.

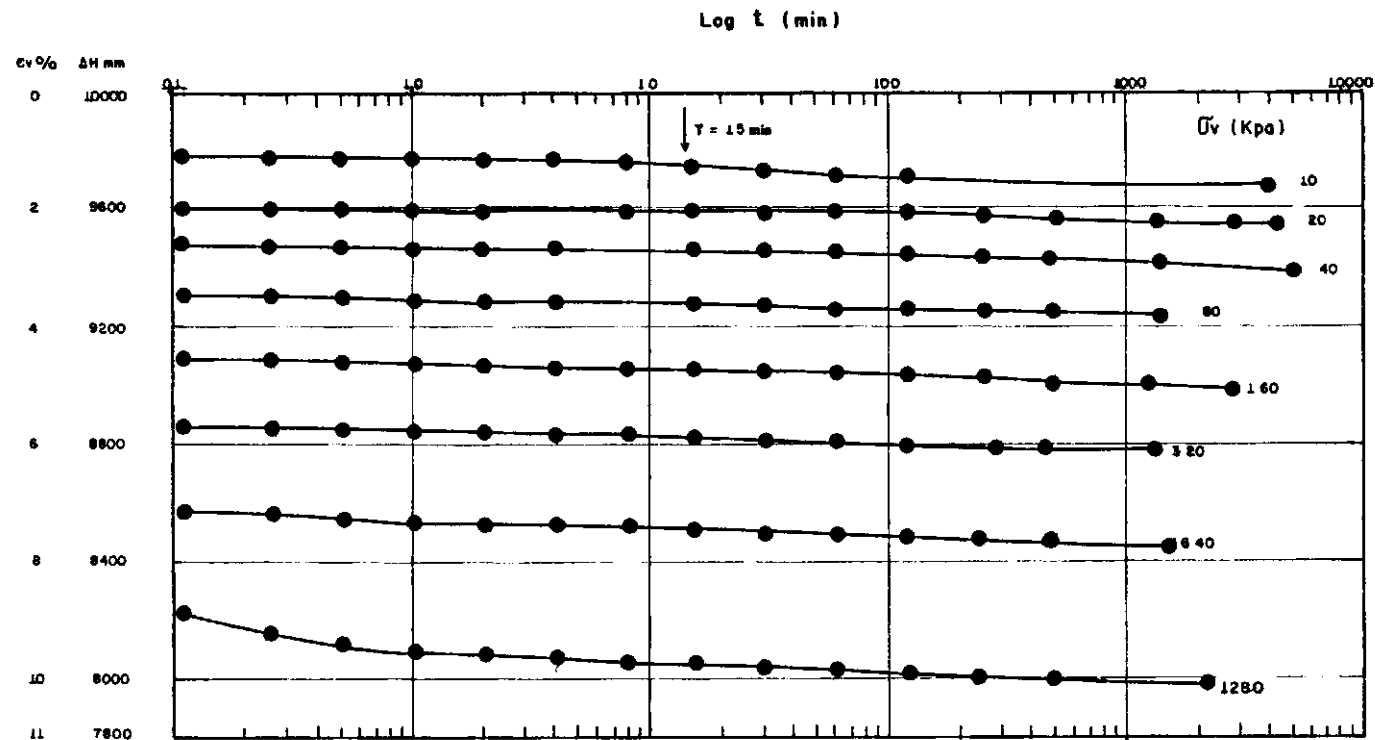


FIG. IV. 10c — ENSAIO DE ADENSAMENTO - MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA  
COMPACTADA NA UMIDADE ÓTIMA SEM INUNDAÇÃO.

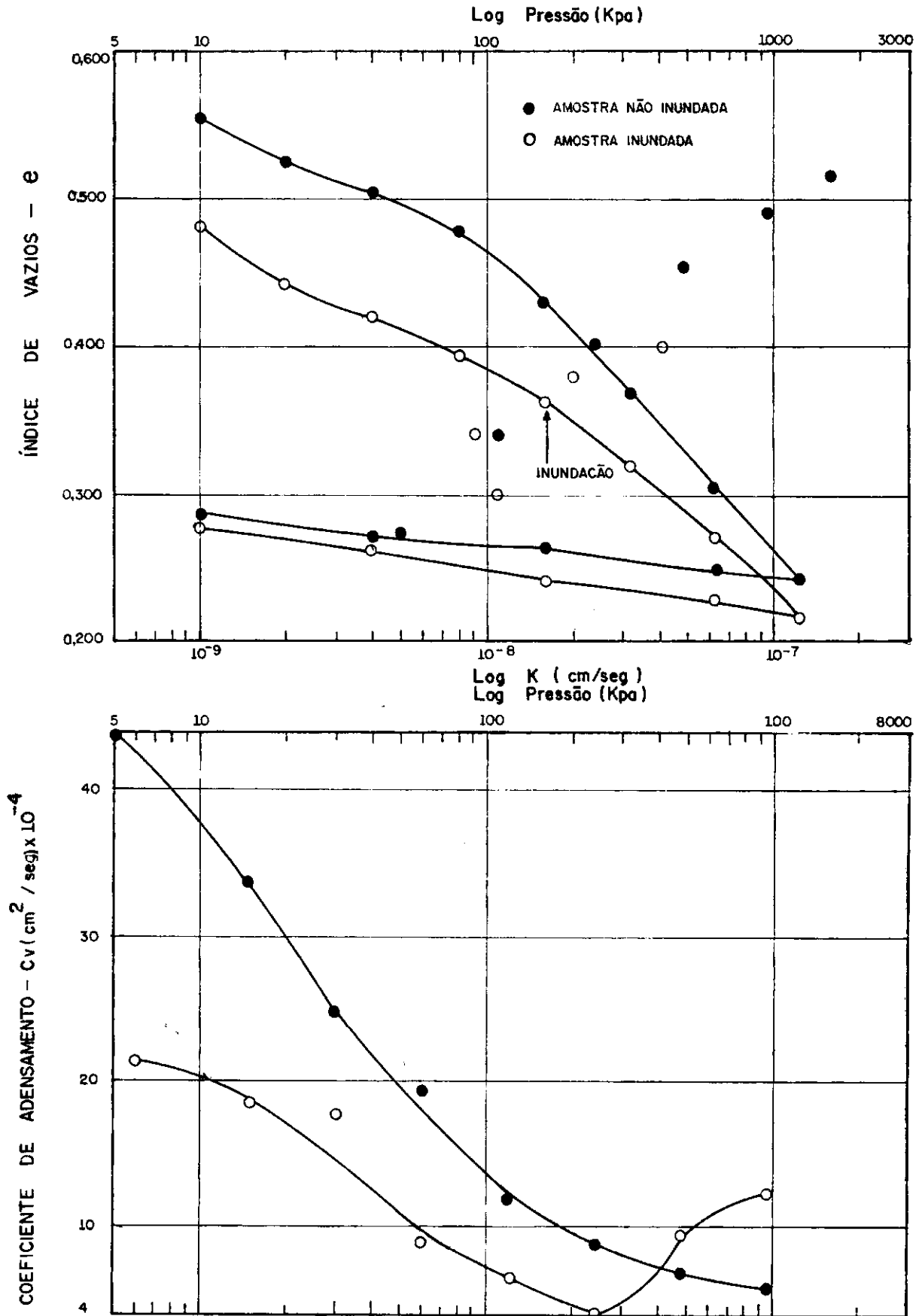


FIG. IV. 11 — CURVAS DE ADENSAMENTO DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DA BARRAGEM DE BOCAINA.

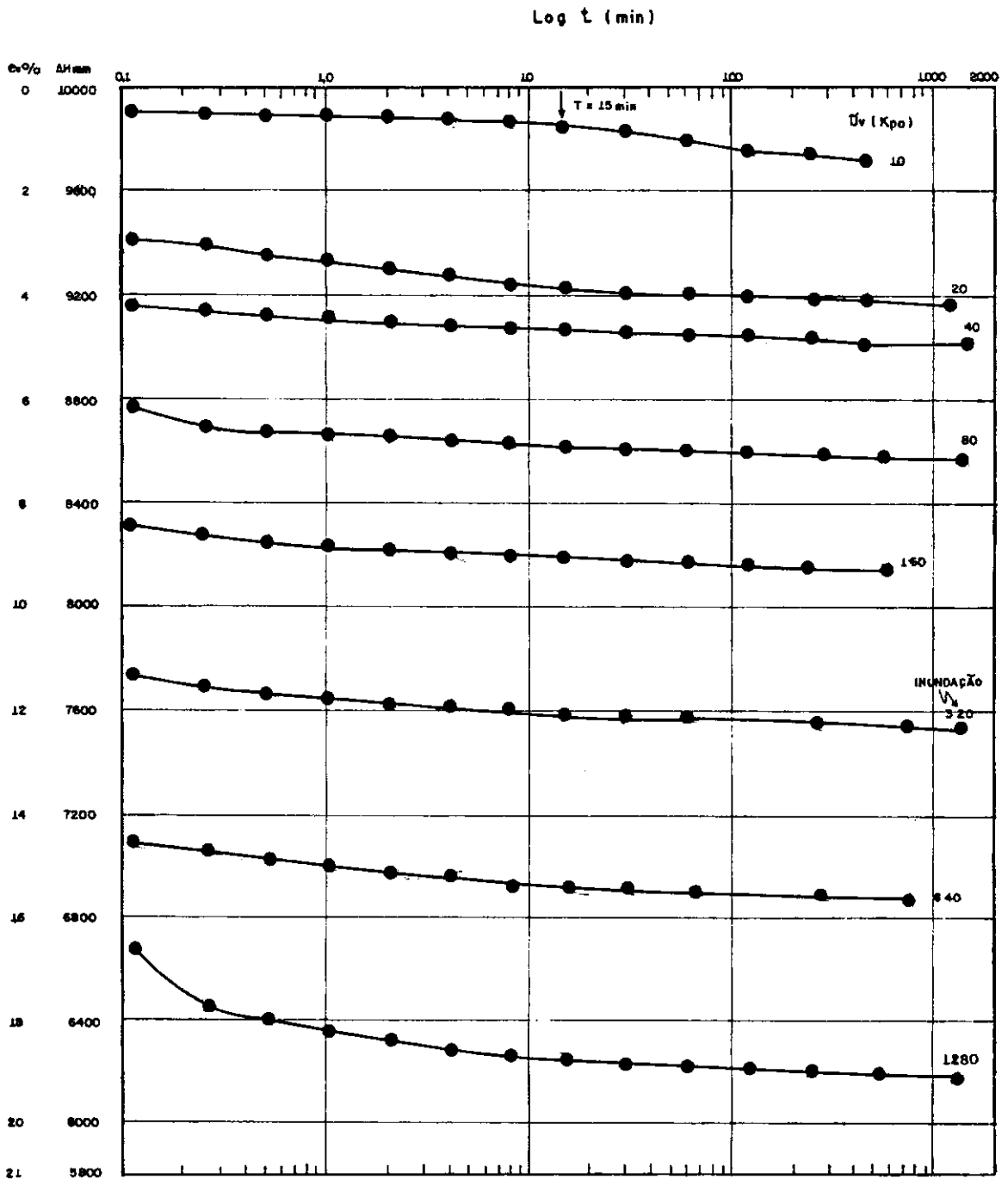


FIG. IV. 11a — ENSAIO DE ADENSAMENTO — MATERIAL DA BAR-  
RAGEM DE BOCAINA — AMOSTRA INDEFORMADA.

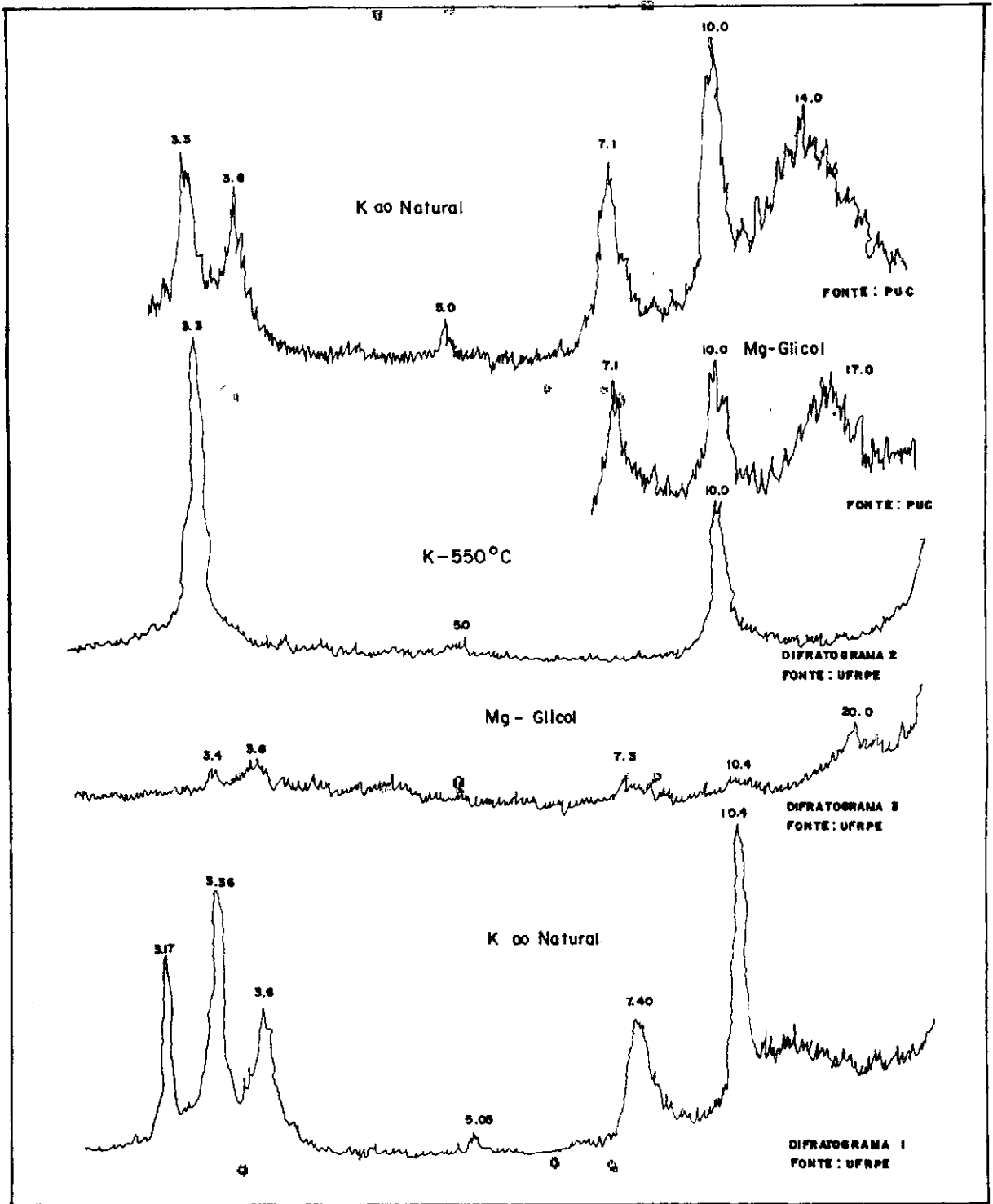


FIG. IV . 12 — RESULTADOS DA ANÁLISE MINERALÓGICA DAS AMOSTRAS DA BARRAGEM DO AÇU.



## CAPÍTULO V - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

## V.1. DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

Comparando-se as curvas granulométricas obtidas para os materiais das barragens do Açú, apresentadas nas figuras III.3 e III.13, com as curvas granulométricas típicas encontradas em Terzaghi e Peck (42) apresentados na figura V.1, pode-se dizer que:

- As curvas granulométricas obtidas para o material da barragem do Açú possuem formas variadas, podendo ser agrupadas em dois tipos básicos que são curvas tipo c com mais de 50% do material de granulação fina, granulometria esta que segundo Terzaghi é característica de solos maduros ou de solos de origem glacial ou fluvio-glacial. As curvas granulométricas do tipo c encontradas pertencem aos solos dos empréstimos 2, 3 e 4, que são solos aluvionares, o que em parte concorda com a descrição de Terzaghi. O outro grupo de curvas granulométricas pertence às amostras do empréstimo 1 e; são curvas do tipo b, com mais de 50% do material de granulação grosseira, características de solos residuais de formação geológica recente, o que está de acordo com a origem do solo deste empréstimo como apresentado no capítulo II.
- As curvas granulométricas obtidas para o material da barragem de Bocaina são todas descontínuas, notando-se nelas a ausência de areia fina a média. Estas curvas são do tipo d, que, segundo Terzaghi e Peck, são típicas de solos com granulometrias compostas, como as misturas de pedregulho e areia depositados por rios de corrente rápida, que levam em suspensão o excesso de sedimentos, ou como os solos formados por sedimentos transportados por dois agentes distintos,

ou, ainda, obtidos da mistura de duas camadas distintas de solos. Isto está de acordo com os dados geológicos obtidos da área, sendo este solo formado a partir da deposição de material de duas origens, a parte fina é de origem aluvionar e a parte grosseira é de origem residual.

## V.2. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

### V.2.1. Material da Barragem do Açú

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados sem inundação, e, através dos resultados obtidos, observa-se que, para umidades abaixo e próximas da umidade ótima e para baixas tensões verticais ( $\sigma_v = 200\text{KPa}$ ), há um acréscimo de volume da amostra, durante o cisalhamento, de até 1%, para  $\sigma_v = 100\text{ KPa}$ , e de até 0,4%, para  $\sigma_v = 200\text{KPa}$ ; isto tendo-se em conta uma de formação horizontal de até 25mm (5%).

Para as tensões verticais maiores que 200KPa, e para umidades acima da umidade ótima, há uma redução do volume da amostra, durante o cisalhamento, de até 8%.

As curvas tensão-deformação obtidas para a maioria dos corpos de prova apresentam uma diferença entre a resistência de pico e a resistência residual de até 65KPa para os corpos de prova com  $\sigma_v = 100\text{KPa}$ , 35 KPa para os corpos de prova com  $\sigma_v = 200\text{KPa}$  e 45 KPa para os corpos de prova com  $\sigma_v = 400\text{KPa}$ , considerando-se todas as umidades figuras IV.2, IV.2a e IV.2b.

As envoltórias de ruptura determinadas apresentam ângulos de atrito variando entre 3 e 16°, sendo o valor mais baixo obtido para as amostras compactadas com umidade acima da umidade ótima. Os valores do intercepto de coesão determinados para este material variam entre 43 e 126 KPa, observando-se que há uma diminuição dos mesmos com o aumento da umidade.

### V.2.2. Material da Barragem de Bocaina

Nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na amostra indeformada retirada do maciço, observa-se uma grande dispersão causada pela presença de pedregulhos com diâmetro entre 4,75mm e 25,40mm no interior dos corpos de prova, moldados na caixa com 101,6mm de lado.

Devido à dispersão encontrada, obteve-se dois pares de valores de ângulo de atrito e coesão em termos de tensões totais. Um par correspondente à resistência de pico onde os valores encontrados foram respectivamente, de 38° e 95KPa para os corpos de prova onde não se observaram pedregulhos na superfície de ruptura e de 44° e 100KPa para os corpos de prova que apresentaram pedregulhos na superfície de ruptura.

O outro par de valores de ângulo de atrito e coesão corresponde à resistência residual e os valores encontrados foram respectivamente, de 45° e 15KPa para as amostras que apresentaram pedregulhos na superfície de ruptura, e 49° e 15 KPa para as amostras onde não se observaram pedregulhos na superfície de ruptura figura IV.7.

Em todos os ensaios de cisalhamento direto executados na amostra compactada em laboratório utilizando-se a caixa de cisalhamento de 50,8mm de lado e sem inundação, observa-se que há um aumento de volume do corpo de prova, durante o ensaio, da ordem de 2%, para  $\sigma_v = 100\text{KPa}$ , e de até 1,2% para  $\sigma_v = 200\text{ KPa}$ ; isto para a amostra compactada no ramo seco da curva de compactação e para deformações horizontais de 3,56mm (7%).

Observando-se as curvas tensão-deformação, nota-se que há um aumento da tensão horizontal da ordem de até 30% se forem comparados valores a 2,54mm e a 7,62mm de deformação horizontal, exceto para os corpos de prova moldados abaixo da umidade ótima e rompidos com tensões verticais de 100 e 200 KPa, onde observa-se um pico de resistência nítido e onde a diferen

ça máxima entre a resistência de pico e a resistência residual foi de 35KPa para  $\sigma_v = 200\text{KPa}$ .

Nestes ensaios, a resistência obtida foi elevada, com ângulos de atrito variando entre 29 e 42°, crescendo com a redução da umidade de compactação, e o intercepto de coesão variando pouco com a redução da umidade, ficando entre 75 e 85KPa (figuras IV.6, IV.6a e IV.6b).

Os altos valores de resistência obtidos para os dois materiais ensaiados podem estar ligados ao efeito da sucção, uma vez que os corpos de prova não estavam saturados e, para a maioria deles, houve expansão durante a ruptura.

Comparando-se os resultados obtidos com aqueles fornecidos pelo LSI para o ensaio de cisalhamento direto realizado no material do empréstimo 15 compactado na umidade ótima ( $C = 35\text{KPa}$  e  $\phi = 39^\circ$ ), observa-se que os mesmos estão bastante próximos e em todos eles há a predominância da resistência por atrito, o que está coerente com a granulometria do material.

Comparando-se ainda os parâmetros de resistência dos dois materiais ensaiados (o material da Barragem do Açú e o da Barragem de Bocaina), obtidos através do ensaio de cisalhamento direto, observa-se que os mesmos são bastante diferentes. A resistência do material da Barragem do Açú determinada neste ensaio é menor do que a do material da Barragem de Bocaina, sendo o ângulo de atrito do material da Barragem do Açú mais sensível à variação de umidade de compactação que o material da Barragem de Bocaina.

Analisando os parâmetros de resistência obtidos através do cisalhamento direto para diversos materiais utilizados em Barragens de terra, apresentados na tabela II.1, pode-se dizer que os parâmetros obtidos através destes ensaios, principalmente a coesão, são superiores aos determinados através dos ensaios triaxiais (UU e  $\overline{\text{CU}}$ ). Devido aos vários parâmetros en

volvidos nestes dois tipos de ensaios, quer sejam velocidade, forma do corpo de prova, plano de ruptura, controle da drenagem, etc; e contando-se ainda com o efeito da sucção e a não saturação dos corpos de prova, como já se ressaltou anteriormente, fica difícil relacionar as causas da obtenção de parâmetros de resistência mais altos no ensaio de cisalhamento direto.

Ladd (25) não aconselha o uso dos ensaios de cisalhamento direto do tipo CU, pois, segundo ele, não se pode evitar a drenagem simplesmente executando o ensaio com velocidade alta e mantendo o carregamento vertical constante. As amostras ensaiadas desta forma apresentam uma resistência diferente da real como ilustrado na figura V.2.

As amostras pré-adensadas apresentam resistência menor que a esperada, enquanto que as amostras normalmente adensadas apresentam resistência superior à esperada e algumas vezes podem, ainda, apresentar envoltórias com intercepto de coesão negativo.

Parece pois sensato evitar-se o uso dos dados de resistência do ensaio de cisalhamento direto tipo "CU" não saturado quando se dispõe dos dados do ensaio triaxial saturado tipo CU.

### V.3. ENSAIO UU

#### V.3.1. Material da Barragem do Açu

Nos ensaios UU realizados com o material da Barragem do Açu, observa-se que as curvas tensão-deformação não apresentam estabilização ou queda de tensão desviatória para valores crescentes de deformação exceto para o corpo de prova com  $\sigma_c = 100\text{KPa}$  compactada abaixo da umidade ótima.

As envoltórias de ruptura determinadas em termos de tensões totais para as deformações axiais específicas de 4 e

12% apresentam ângulos de atrito variando entre 1 e 10°, cujos valores diminuem com o aumento da umidade de compactação. Os ângulos de atrito obtidos para deformação de 12% são maiores que os obtidos para a deformação de 4%. Para a amostra compactada acima da umidade ótima, os ângulos de atrito obtidos para as duas deformações são iguais. A coesão varia entre 25 e 101 kPa e diminui com o aumento da umidade. Para a deformação de 12%, os valores obtidos foram maiores que para a deformação de 4% o que era esperado já que as tensões desviatórias tendem aumentar com o aumento da deformação, sem haver estabilização ou queda das mesmas, (figuras IV.3, VI.3a e IV3b).

Neste ensaio foram desprezadas as medidas de pressão neutra efetuadas, pois os valores encontrados foram muito baixos, como pode ser visto na figura IV.3c. Os valores incoerentes de pressão neutra obtidos podem ser explicados por uma saturação ineficiente da pedra porosa de alto valor de entrada de ar, aliada à velocidade de deformação utilizada, cerca de 100 vezes maior que a utilizada nos ensaios  $\overline{CU}$ , o que não permitiu uma perfeita equalização da pressão neutra no corpo de prova, sendo, pois, certamente incorretos os valores medidos da pressão neutra, o que levaria a valores incorretos de resistência em termos de tensões efetivas. Comparando-se os parâmetros de resistência em termos de tensões totais obtidos com os fornecidos pelo DNOCS, verifica-se que o material ensaiado apresentou parâmetros de resistência inferiores àqueles fornecidos pelo DNOCS, ficando próximos aos parâmetros encontrados para a amostra P 16/6- A 2 do empréstimo  $E_4$ , que é o que apresenta maiores valores de umidade ótima e valores de  $\gamma_{smax}$ ,  $LL$  e  $LP$  mais próximos dos obtidos para a amostra ensaiada neste trabalho. (figuras III.4 e III.5).

#### V.3.2. Material da Barragem de Bocaina

Nos resultados dos ensaios UU feitos com o material da Barragem de Bocaina, percebe-se mais claramente a tendência ao

aumento da tensão desviatória com o aumento da deformação axial específica, mesmo para umidades acima da umidade ótima, sendo o valor máximo de acréscimo observado na tensão desviatória de 42% para  $\sigma_c = 400\text{KPa}$  entre as deformações axiais específicas de 5 e 15% e umidade abaixo da umidade ótima, não se observando tensões desviatórias residuais inferiores às tensões desviatórias máximas em nenhum dos ensaios realizados (figuras IV.8, IV.8a e IV.8b.).

Os valores dos ângulos de atrito obtidos, também para as deformações axiais específicas de 4 e 12%, são sensivelmente afetados pela umidade, variando entre 6 e 28° com o maior valor correspondente à umidade abaixo da umidade ótima e à deformação axial específica de 12%. Os valores do intercepto de coesão obtidos variam entre 58 e 142KPa, sendo que, para a deformação axial de 12%, a variação da coesão com a umidade é menor (figuras IV.8 ). Aqui também não foram considerados os valores medidos de pressão neutra, pelo mesmo motivo já citado para o material da Barragem do Açú ( figura IV.8 c ).

Comparando-se os parâmetros de resistência em termos de tensões totais obtidos para a umidade ótima com os fornecidos pelo LSI, observa-se que há uma grande dispersão de resultados, estando os parâmetros do solo ensaiado mais próximos dos parâmetros do material do empréstimo 15, sendo este o que tem parâmetros de plasticidade e compactação mais próximos aos do material ensaiado.

#### V.4. ENSAIO $\overline{\text{CU}}$

##### V.4.1. Material da Barragem do Açú

O comportamento tensão-deformação observado nestes ensaios foi semelhante ao comportamento observado nos ensaios UU, não se verificando também aqui valores constantes ou decrescen

tes de tensão desviatória com o aumento da deformação. Durante a ruptura de cada amostra, o que admitiu-se ocorrer em torno dos 4,5% de deformação axial específica, elevou-se a velocidade do ensaio de aproximadamente 10 vezes e até 25 vezes (em dois corpos de prova moldados com umidade acima da umidade ótima) e a variação máxima da tensão desviatória observada em todos os casos foi de 11% (figuras IV.4, IV.4a e IV.4b.)

O acréscimo das pressões neutras medido entre 4 e 12% de deformação, num mesmo corpo de prova, quase não variou e os valores obtidos foram elevados ( $\Delta_{umax} = 324$  KPa para o corpo de prova com 500 KPa de tensão confinante, moldado com umidade acima da umidade ótima, na deformação axial específica de 12%).

As envoltórias de resistência obtidas em termos de tensões totais para as deformações axiais específicas de 4 e 12%, descontando o efeito da velocidade aos 12% de deformação axial específica, apresentaram ângulo de atrito variando entre 4 e 13%, sendo o menor valor correspondente à maior umidade de compactação. Para a deformação de 12%, os valores do ângulo de atrito são ligeiramente maiores que os obtidos para a deformação de 4%.

Os valores do intercepto de coesão obtidos nas duas deformações variam entre 12 e 53 KPa, sendo os valores mais baixos correspondentes à menor umidade de compactação.

Em termos de tensões efetivas, os ângulos de atrito de terminados, também para as deformações de 4 e 12%, variam entre 10 e 21°, sem haver uma relação clara entre a variação do ângulo de atrito e a umidade de moldagem dos corpos de prova. Os valores de intercepto de coesão obtidos variam entre 12 e 54 KPa (figura IV.4c.)

Comparando-se os dados obtidos com os fornecidos pelo DNOCS para este ensaio, observa-se que os parâmetros de resistência obtidos são mais próximos dos encontrados para as amostras do empréstimo E4, que são as que possuem granulometrias e



umidades ótimas próximas às da amostra ensaiada.

#### V.4.2. Material da Barragem de Bocaina

O comportamento tensão-deformação observado para o material da Barragem de Bocaina no ensaio CU foi semelhante ao comportamento observado para este mesmo material no ensaio UU, ou seja, não há uma máxima tensão desviatória, já que a mesma aumenta durante toda a ruptura, mesmo após 15% de deformação axial específica.

Os parâmetros de resistência em termos de tensões totais, obtidos como no caso do material da Barragem do Açu para as deformações axiais específicas de 4 e 12%, indicam valores de intercepto de coesão baixos, variando entre 12 e 19 KPa, sem sofrerem grande influência da umidade de compactação e sendo os menores valores correspondentes à deformação axial específica de 4%.

Em termos de tensões efetivas, também considerando-se as deformações axiais específicas de 4 e 12%, observam-se valores de intercepto de coesão baixos, variando entre 3 e 20 KPa, sem grande influência da umidade de compactação. Os valores do ângulo de atrito obtidos variam entre 23 e 31°, permanecendo quase constante com a umidade e sendo os valores correspondentes à deformação axial específica de 12% maiores que os correspondentes à deformação axial específica de 4%.

Mellios e Monteiro (33) apresentaram alguns parâmetros geotécnicos dos cascalhos argilosos das Barragens de Ilha Solteira e São Simão, os quais estão mostrados na tabela V.1 e na figura V.3. Analisadas as curvas granulométricas e os parâmetros de resistência obtidos por Mellios e Monteiro (33), observa-se que há uma certa semelhança entre estes materiais e o material da Barragem de Bocaina, notando-se também nestes materiais uma granulometria descontínua, com pequena porcentagem de areia e parâmetros de resistência elevados.

Cruz (10) apresentou dados de resistência e trabalhabilidade de alguns solos lateríticos e saprolíticos compactados, bem como as possíveis curvas típicas de tensão-deformação, pressão neutra-deformação e trajetórias de tensões efetivas dos solos compactados. Analisando os dados por ele apresentados, pode-se dizer que as trajetórias de tensões efetivas obtidas no ensaio  $\overline{CU}$  para os dois materiais estudados particularmente as do material da Barragem de Bocaina, apresentadas nas figuras V.4 e V.5, assemelham-se à trajetória tipo IV apresentada por Cruz conforme a figura V.6. A trajetória tipo IV em forma de "S", segundo Cruz, só ocorre para ensaios não drenados e é característica de solos compactados onde a mobilização da resistência é lenta, alcançando o máximo de obliquidade de tensão para a faixa de 3 a 6% de deformação específica. A máxima tensão desviatória só ocorre para deformações mais elevadas, na faixa dos 12 a 20%, com uma tendência a deformações crescentes. O desenvolvimento da pressão neutra é relativamente rápido no início do ensaio, alcançando o valor máximo próximo ao ponto de máxima obliquidade, decrescendo em seguida até se alcançar a máxima tensão desviatória. A diferença entre o comportamento dos dois materiais estudados e o comportamento descrito por Cruz está em que, para os materiais estudados, a pressão neutra não decresce, permanecendo praticamente constante até o final do ensaio como se pode ver nas figuras IV.4, IV.4a, IV.4b, IV.9, IV.9a e IV.9b.

O comportamento acima, segundo Cruz, é típico dos ensaios  $R_{sat}$ , para qualquer tipo de solo, quando se utiliza níveis elevados de tensões de câmara (maiores que 400 KPa e menores que 600 KPa).

Como comentado anteriormente, os parâmetros de resistência obtidos para os dois materiais são bastante diversos, sendo o material da Barragem de Bocaina o que possui melhores características de resistência. Comparando-se os dados de resistência, granulometria e características de plasticidade, ob

tidos para estes dois materiais, com alguns dados de materiais empregados em outras Barragens do Nordeste, apresentados nas figuras II.3a, II.3b, II.4a e II.4b e tabela II.1, pode-se dizer que a granulometria do material da Barragem de Bocaina assemelha-se à granulometria do material da Barragem do Pontal, notando-se no entanto que este último não apresenta a marcante descontinuidade observada para o material da Barragem de Bocaina, embora tenha uma pequena percentagem de areia média (2 a 8%) e uma considerável percentagem de pedregulhos (até 30%). Também com relação às características de resistência e plasticidade, os dois materiais possuem parâmetros bem próximos para os mesmos tipos de ensaios, observando-se em ambos uma resistência elevada.

O material da Barragem do Açú, considerando-se apenas os empréstimos  $E_2$  e  $E_4$  e as amostras ensaiadas neste trabalho que possuem a mesma origem geológica (aluvionar), apresentam curvas geonulométricas diversas daquelas apresentadas para os materiais das demais Barragens. Com relação às características de resistência, considerando-se os parâmetros das amostras do empréstimo  $E_4$ , que são os que mais se aproximam dos obtidos para a amostra ensaiada neste trabalho, pode-se dizer que estes parâmetros indicam uma resistência baixa, que no caso do material estudado pode estar ligado à alta porcentagem de sódio detectada neste material, conforme se discutiu na análise química dos solos estudados (cap. IV).

Nos resultados dos ensaios de cisalhamento rotacional feitos sobre a amostra do núcleo da Barragem do Açú e fornecidos pelo DNOCS, pode-se observar que, no intervalo de tensões normais de 80 a 500 KPa, obtiveram-se uma coesão residual nula e um ângulo de atrito residual de  $7,5^\circ$ , salientando-se que nestes ensaios se fez previamente o adensamento da amostra e procedeu-se à ruptura com velocidade  $0,009^\circ/\text{min}$  ( $0,64\text{mm/h}$ ) até 3,3cm de deformação, sendo, pois, a resistência determinada em termos de tensões efetivas. Este resultado é mostrado na figura III.7.b.

## V.5. CRITÉRIO DE RUPTURA

Existem vários critérios de ruptura que podem ser utilizados para medir a resistência ao cisalhamento dos solos: através da razão máxima de tensões principais  $(\sigma_1 / \sigma_3)_{\text{máx}}$ , através da tensão desviatória máxima  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{máx}}$ , fixando-se a deformação de ruptura e tomando-se o valor da tensão desviatória correspondente; ou ainda, segundo Seed e Chan (40), através da razão máxima de tensões principais efetivas  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\text{máx}}$ , já que as tensões efetivas exercem grande influência na resistência dos solos.

Uma vez que, durante a ruptura dos corpos de prova nos ensaios triaxiais dos dois materiais estudados, não se observou um máximo de tensão desviatória, optou-se por determinar envoltórias de resistência para 4 e 12% de deformação específica. Para cada corpo de prova, nas deformações de 4 e 12%, obtiveram-se os valores de  $p$  e  $q$ ,  $p'$  e  $q'$  e, através de regressão linear, os valores da coesão e do ângulo de atrito para as duas deformações.

Os parâmetros utilizados na obtenção das envoltórias de resistência para 4 e 12% de deformação estão nas tabelas IV.3a, IV.4a, IV.7a, IV.8a.

As envoltórias de resistência, os parâmetros de resistência e os coeficientes de correlação obtidos estão mostrados nas figuras IV.3, IV.4c, IV.8 e IV.9c.

Deve-se ressaltar que, em alguns ensaios do material da Barragem do Açú, a resistência dos corpos de prova rompidos com 300 KPa ou 400 KPa de tensão confinantes foi superior à daqueles rompidos com pressões confinantes maiores que estas (400 ou 500 KPa). Tais resultados não foram levados em consideração na determinação das envoltórias de resistência.

## V.6. ENSAIO DE ADENSAMENTO

### V.6.1. Material da Barragem do Açu

Com relação aos ensaios de adensamento foram ensaiadas duas séries de corpos de prova, cada uma com 3 corpos de prova moldados com a umidade ótima, abaixo da ótima e acima da ótima. Em uma das séries os corpos de prova foram inundados imediatamente antes da colocação da carga de 320KPa; na outra, procedeu-se ao ensaio com a umidade de compactação, sem acrescentar água em nenhum estágio de carregamento. Procurava-se com isto determinar a variação de deformação sofrida pela amostra, quando se colocava água, no intervalo de pressões entre 160 e 320KPa, esperando-se encontrar uma explicação para as altas tensões desviatórias encontradas nos corpos de prova moldados com o material da Barragem do Açu, rompidos com 300 ou 400KP a de tensão confiante, conforme comentou-se no item anterior.

Através das  $\Delta H$  ou  $\epsilon_v\% \times \log t$ , apresentadas na figura IV.5c para o ensaio feito sem inundação das amostras, pode-se observar que em alguns estágios de carregamento não ocorreu a estabilização da deformação com o tempo, havendo no entanto uma tendência à estabilização para um tempo inferior a 24 horas. As pressões de pré-adensamento, determinadas nestes ensaios pelo Método de Casagrande, tendem a diminuir com o aumento da umidade de compactação, sendo o valor máximo obtido 270KPa e o mínimo, 130KPa.

Nos ensaios feitos com inundação, observa-se, através das curvas  $\Delta H$  ou  $\epsilon_v\% \times \log t$  apresentadas na figura IV.5d, que, até a colocação da carga de 320KPa, estágio imediatamente após a inundação, não há estabilização das deformações, mesmo mantendo-se a carga de cada estágio por um período de 3 a 4 dias (4000 a 6000min). Nesta série de ensaios, as pressões de pré-adensamento, determinadas pelo Método de Casagrande, também diminuem com o aumento da umidade de compactação, ficando entre 150 e 430 KPa.

Comparando-se os dados obtidos para as amostras compactadas em laboratório com os dados fornecidos pelo DNOCS para as amostras indeformadas, mostrados na tabela V.2, pode-se dizer que embora os métodos de compactação sejam diferentes, de laboratório e de campo, todos os valores de pressão de pré-adensamento situam-se dentro da mesma faixa entre 130 e 530KPa, sendo que os valores correspondentes às amostras indeformadas indicam que estas são menos compressíveis que as moldadas em laboratório.

Ladd (26) estudou o comportamento das curvas  $\Delta H$  ou  $\epsilon_v \times \log t$  para argilas naturais, saturadas, e observou os dois tipos de curvas que são mostrados na figura V.7. Curvas tipo I, que resultam de incrementos grandes de carregamento, onde a teoria de Terzaghi pode ser usada para avaliar a velocidade de adensamento primário, seu final e a velocidade de adensamento secundário; e curvas tipo III, obtidas para pequenos incrementos de carregamentos, onde a teoria de Terzaghi não é apropriada para descrever a dissipação das pressões neutras.

Apesar de o solo estudado não se tratar de uma argila natural saturada, e sim de um solo areno-argiloso compactado não saturado, pode-se fazer um paralelo entre o comportamento dos dois materiais.

Segundo as curvas  $\epsilon_v \times \log t$  apresentadas nas figuras IV.5c e IV.5d, observa-se que as curvas iniciais até a carga de 160KPa comportam-se como as curvas do tipo III, ou seja, nelas não se pode definir o final do adensamento primário. A partir da carga de 320KPa as curvas assumem a forma das do tipo I, podendo-se definir o final do adensamento primário. Dessa forma, ainda segundo Ladd (26), a parcela de compressão secundária promove um abaixamento da curva  $\epsilon_v \times \log t$  e uma determinação de valores de pressão de pré-adensamento menores que os reais, conforme a figura V.8. Isto leva a crer que as pressões de pré-adensamento determinadas para as amostras estudadas da Barragem do Açú são maiores que as apresentadas na tabela IV.5. Considerando-se o tempo final do adensamento primário

rio como sendo de 24hs, obteve-se a curva apresentada na figura V.9, onde se observa um acréscimo da pressão de pré-adensamento de 3,1%. Deve-se salientar que o tempo de 24hs foi escolhido arbitrariamente.

#### V.6.2. Material da Barragem de Bocaina

Tanto na amostra indeformada quanto na amostra compactada, foram feitos ensaios de adensamento com drenagem vertical.

Com a amostra indeformada foram moldados dois corpos de prova, um sem inundação e outro com inundação após a estabilização da carga de 160KPa. Os resultados obtidos nestes ensaios apresentam uma diferença razoável entre os índices de vazios iniciais da ordem de 14%, diferença esta que pode estar relacionada com a heterogeneidade do bloco e com a percentagem de pedregulhos com diâmetro de até 25mm (1") no interior do mesmo.

Nos dois ensaios, observa-se que as curvas  $\Delta H$  ou  $\epsilon_v \% \times \log t$ , apresentadas na figura IV.11a, são semelhantes, para todas as cargas aplicadas.

Para estes ensaios, as pressões de pré-adensamento de terminadas pelo método de Casagrande foram de 180KPa, no ensaio feito sem inundação, e 100KPa, no ensaio feito com inundação antes da carga de 320KPa.

Nas amostras compactadas em laboratório, os ensaios foram realizados sem inundação para 3 unidades de compactação (Wótima-2%, Wótima e Wótima +2%). Nestes ensaios, observa-se o mesmo comportamento das curvas  $\Delta H$  ou  $\epsilon_v \% \times \log t$  observado nos ensaios da amostra indeformada, como pode ser visto na figura IV.10a.

As pressões de pré-adensamento obtidas pelo Método de Casagrande variam entre 210 e 430KPa, sendo o máximo valor correspondente à maior umidade de compactação.

Nas curvas  $\epsilon_v\%$  x  $\log t$  mostradas nas figuras IV.10.a , e IV.11.a para o material da Barragem de Bocaina, nota-se que também, como no caso do material da Barragem do Açú, há curvas onde se aplica a Teoria de Terzaghi tipo I e curvas onde não se aplica a Teoria de Terzaghi tipo III. No entanto, para a amostra indeformada, a pressão onde nota-se a mudança de comportamento das curvas do tipo I para as do tipo III é de 40KPa e, tanto para a amostra indeformada, moldada em bloco, quanto para a amostra compactada no laboratório, as curvas do tipo III apresentam para as cargas mais elevadas apenas o final do trecho de compressão primária e um longo trecho de compressão secundária. Aqui também como no caso do material do Açú, e como sugere a figura V.8, as pressões de pré-adensamento determinadas devem ser inferiores às reais. Adotando para o final do adensamento secundário um valor de tempo de 15min, obtiveram-se as curvas apresentadas na figura V.10, onde se observa que a pressão de pré-adensamento aumentou de 12,5%, para a amostra compactada em laboratório, e de 5,5%, para a amostra indeformada.



USINA	AMOSTRA	ARGILA (%)	CASCALHO (%)	ENSAIO	GC (%)	$\Delta h$ (%)	$\phi'$ ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) max	$\phi'$ ( $\bar{\sigma}_1 / \bar{\sigma}_3$ ) max
ILHA SOLTEIRA	A	14	18	$\bar{Q}$	100,2	-0,5	39,5º	-
				$\bar{Q}$	100,6	-0,7	37,6º	-
				$\bar{Q}$	98,5	-0,7	34,1º	-
				$\bar{Q}$	100,9	-0,7	32,5º	-
				$\bar{RSAT}$	102,7	-0,2	32,1º	35,1º
				$\bar{RSAT}$	102,4	-0,3	32,5º	34,3º
				$\bar{RSAT}$	102,5	-0,2	34,1º	34,2º
				$\bar{RSAT}$	102,2	-0,2	32,6º	32,9º
SÃO SIMÃO	B	10	35	$\bar{Q}$	94,2	+1,9	42,7º	-
				$\bar{Q}$	93,9	+1,7	34,8º	-
				$\bar{Q}$	93,4	+2,4	33,9º	-
				$\bar{RSAT}$	94,8	+0,8	39,6º	41,6º
				$\bar{RSAT}$	94,6	+1,8	35,7º	35,9º
				$\bar{RSAT}$	95,1	+1,8	34,8º	36,6º
				$\bar{RSAT}$	91,8	+1,8	39,5º	40,9º
				$\bar{RSAT}$	91,0	+2,0	32,0º	38,9º
				$\bar{RSAT}$	91,1	+2,1	28,9º	39,0º
	C	13	50	$\bar{RSAT}$	94,1	+0,5	39,2º	41,5º
				$\bar{RSAT}$	96,6	+1,2	41,0º	41,5º
				$\bar{RSAT}$	93,6	+0,4	40,1º	40,4º

TABELA V.1. - PARÂMETROS GEOTÊNICOS DOS MATERIAIS  
DAS BARRAGENS DE ILHA SOLTEIRA E  
SÃO SIMÃO.

(Apud Mellios (1983))

POÇO	AMOSTRA	COTA (m)	CONDIÇÕES DOS CORPOS DE PROVA						$\sigma'_{vm}$ (KPa)	$C_c$	$C_s$
			INICIAL					FINAL			
			$\gamma_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	w (%)	$\delta$	e	S <sub>r</sub> (%)	e			
2	2	33,470	1,88	22,3	2,67	0,73	81	0,495	200	0,22	0,03
5	2	33,289	2,05	18,2	2,67	0,54	89	0,426	500	0,13	0,01
9	1	35,427	1,98	20,2	2,67	0,62	87	0,448	300	0,18	0,03
16	3	25,679	2,02	22,7	2,61	0,58	100	0,470	530	0,17	0,01
17	2	34,280	1,98	23,2	2,66	0,65	95	0,465	290	0,17	0,03

$\gamma_t$  - Peso específico úmido

w - umidade

$\delta$  - densidade dos grãos

e - índice de vazios

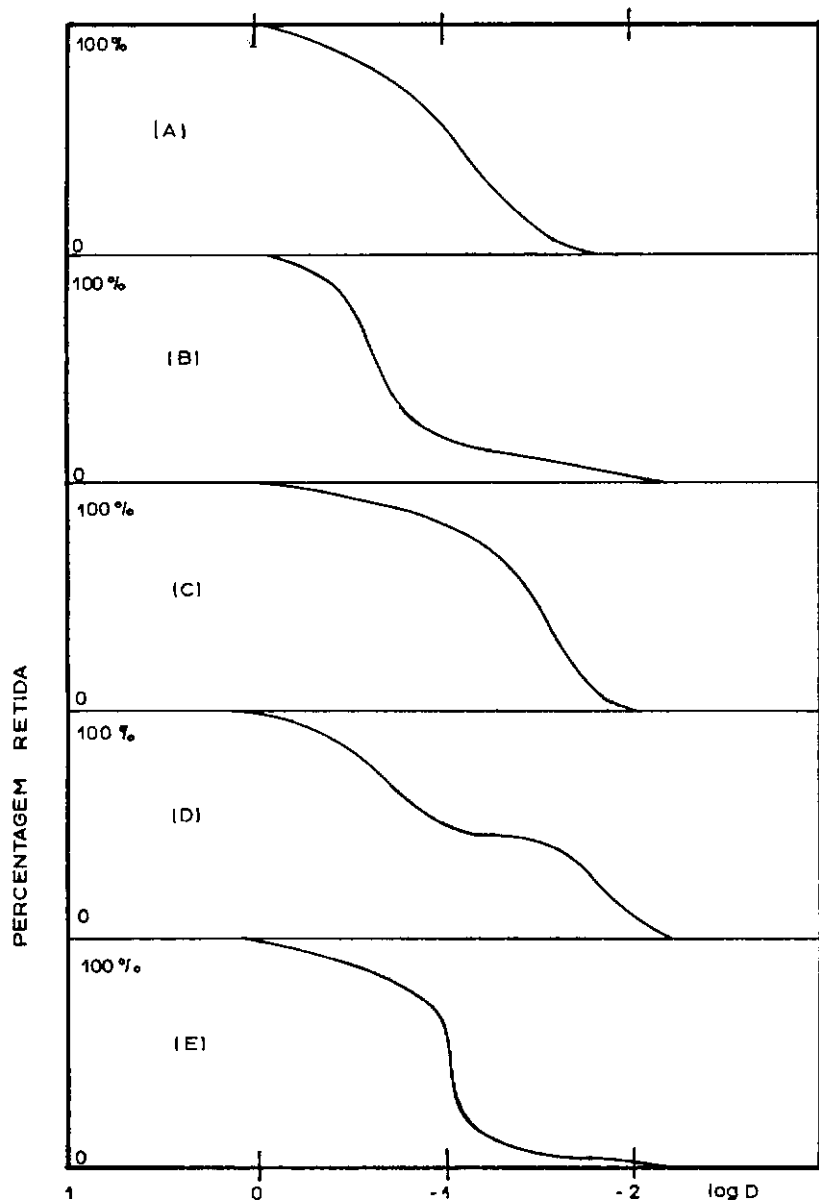
S<sub>r</sub> - grau de saturação

$\sigma'_{vm}$  - pressão de pré-adensamento

$C_c$  - índice de compressão

$C_s$  - índice de decompressão

TABELA V.2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO FEITOS EM AMOSTRAS INDEFORMADAS DO NÚCLEO DA BARRA GEM DO AÇU FORNECIDOS PELO DNOCS.



(A) CURVAS DE FREQUÊNCIA NORMAL

(B,C) CURVAS PARA SOLOS QUE TEM FRAÇÕES FINAS E GROSSAS  
DE DISTINTA UNIFORMIDADE

(D,E) CURVAS COMPOSTAS

FIG.VI CURVAS GRANULOMÉTRICAS TÍPICAS

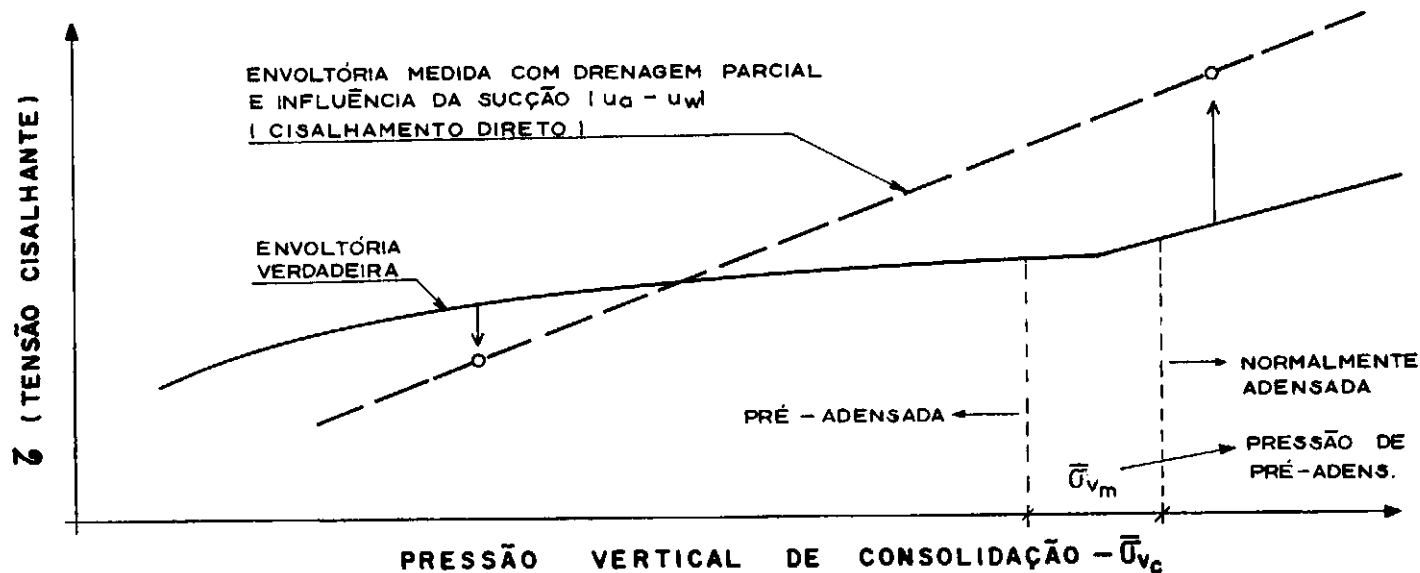


FIG. V.2 — COMPARAÇÃO ENTRE AS ENVOLTÓRIAS DO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO RÁPIDO E DO ENSAIO CU.

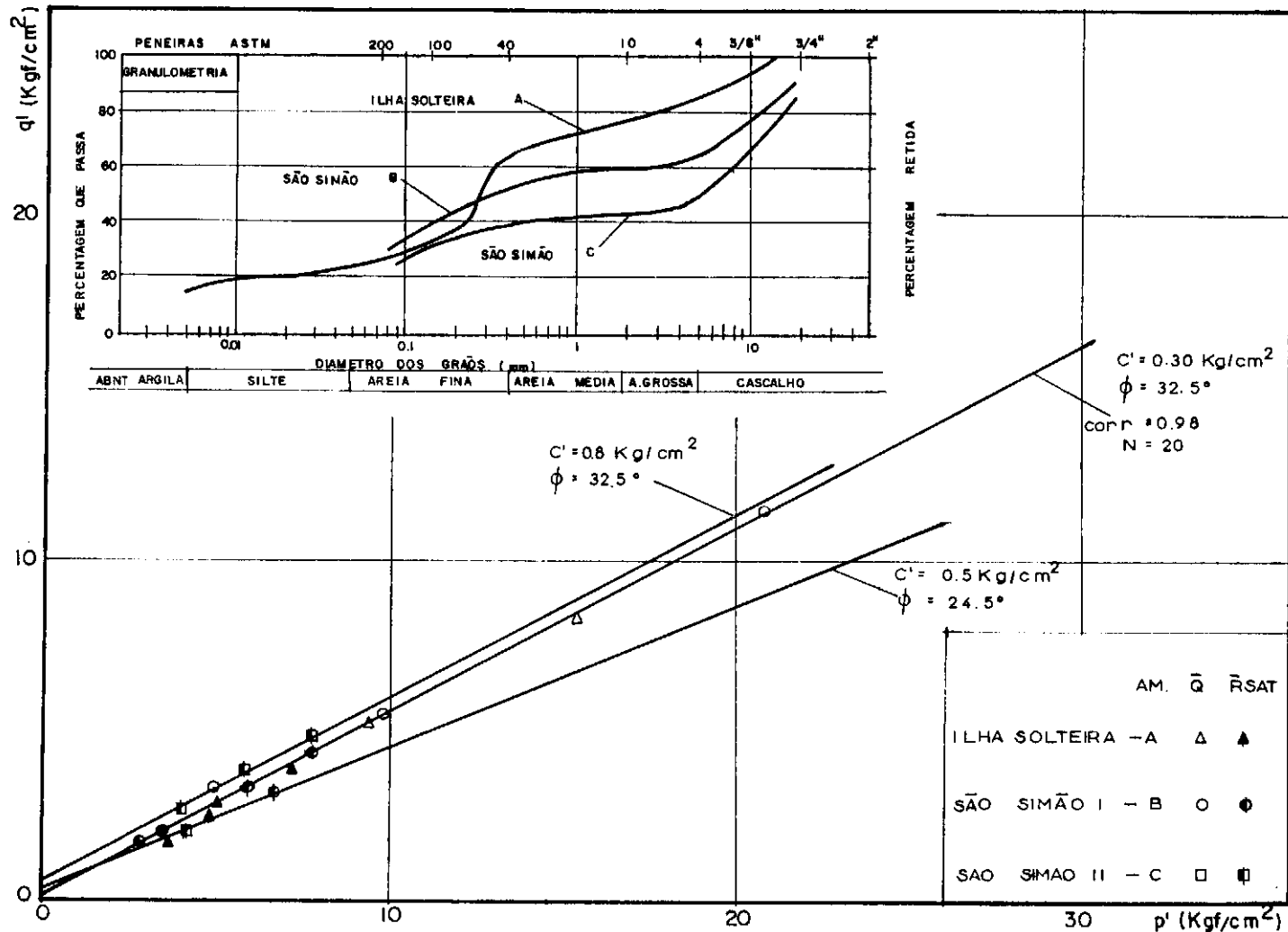


FIG. 13 - CURVAS GRANULOMETRICAS E ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIAS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS - MAT. DAS BARRAGENS I. SOLTEIRA, S. SIMÃO

(Apud. Mellios 1983)

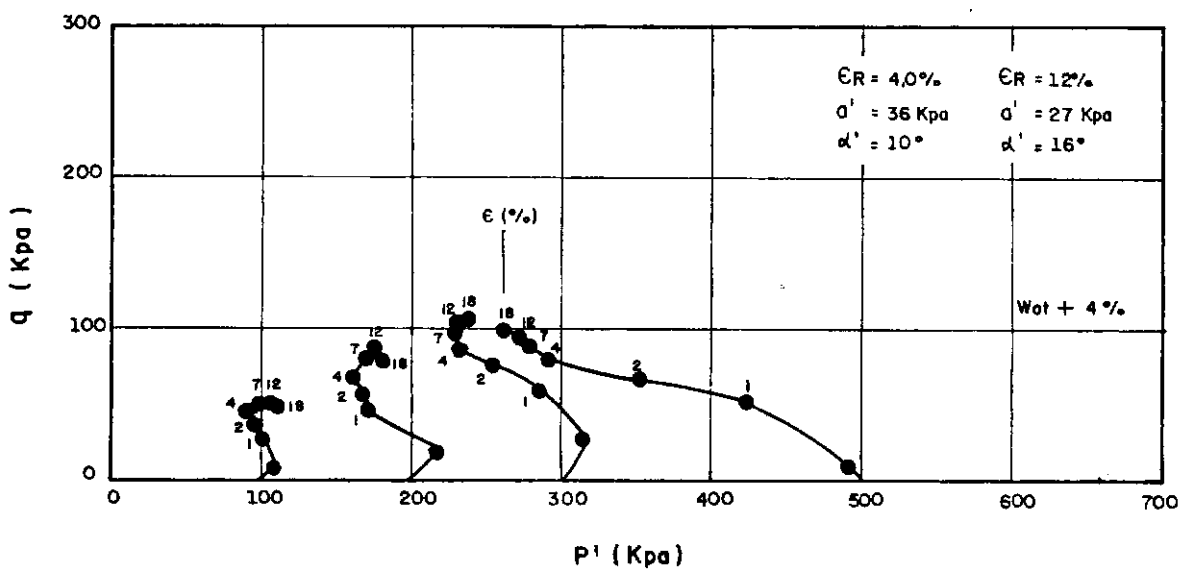
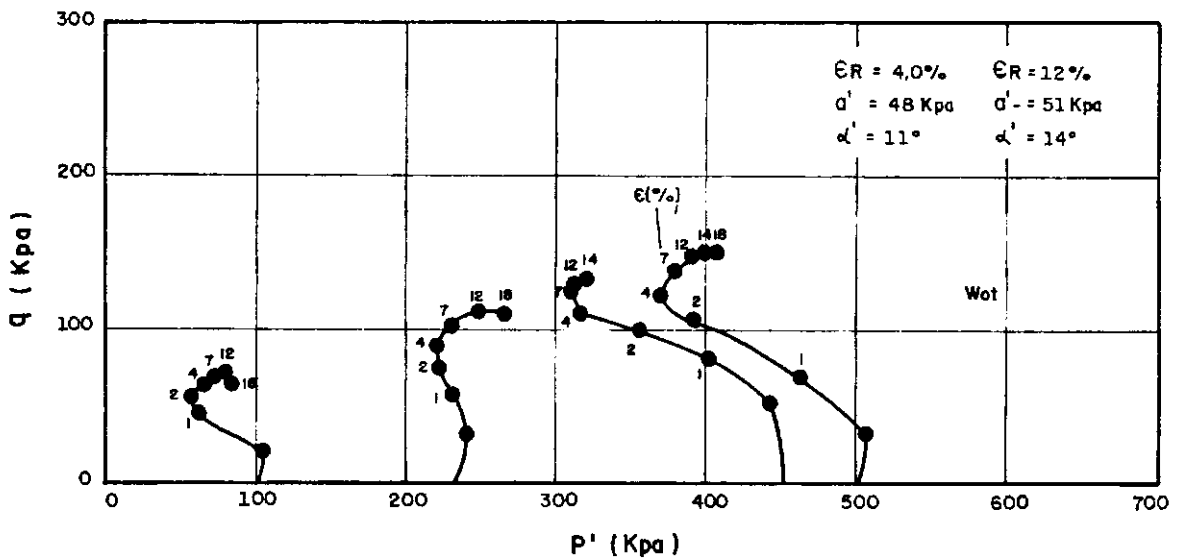
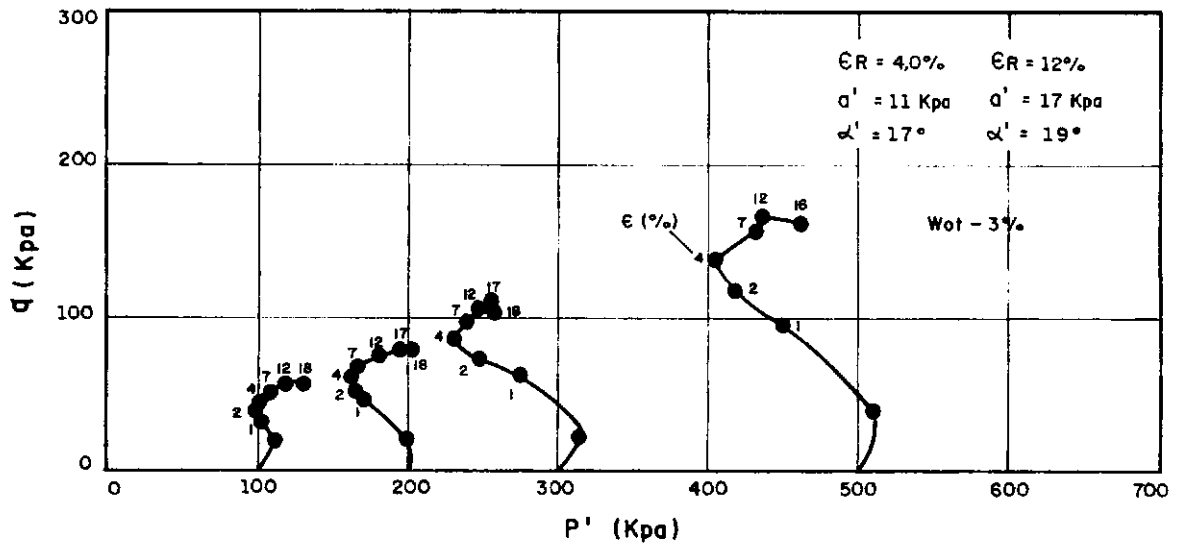


FIG. V.4 - CAMINHOS DE TENSÕES EFETIVAS DO MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU.

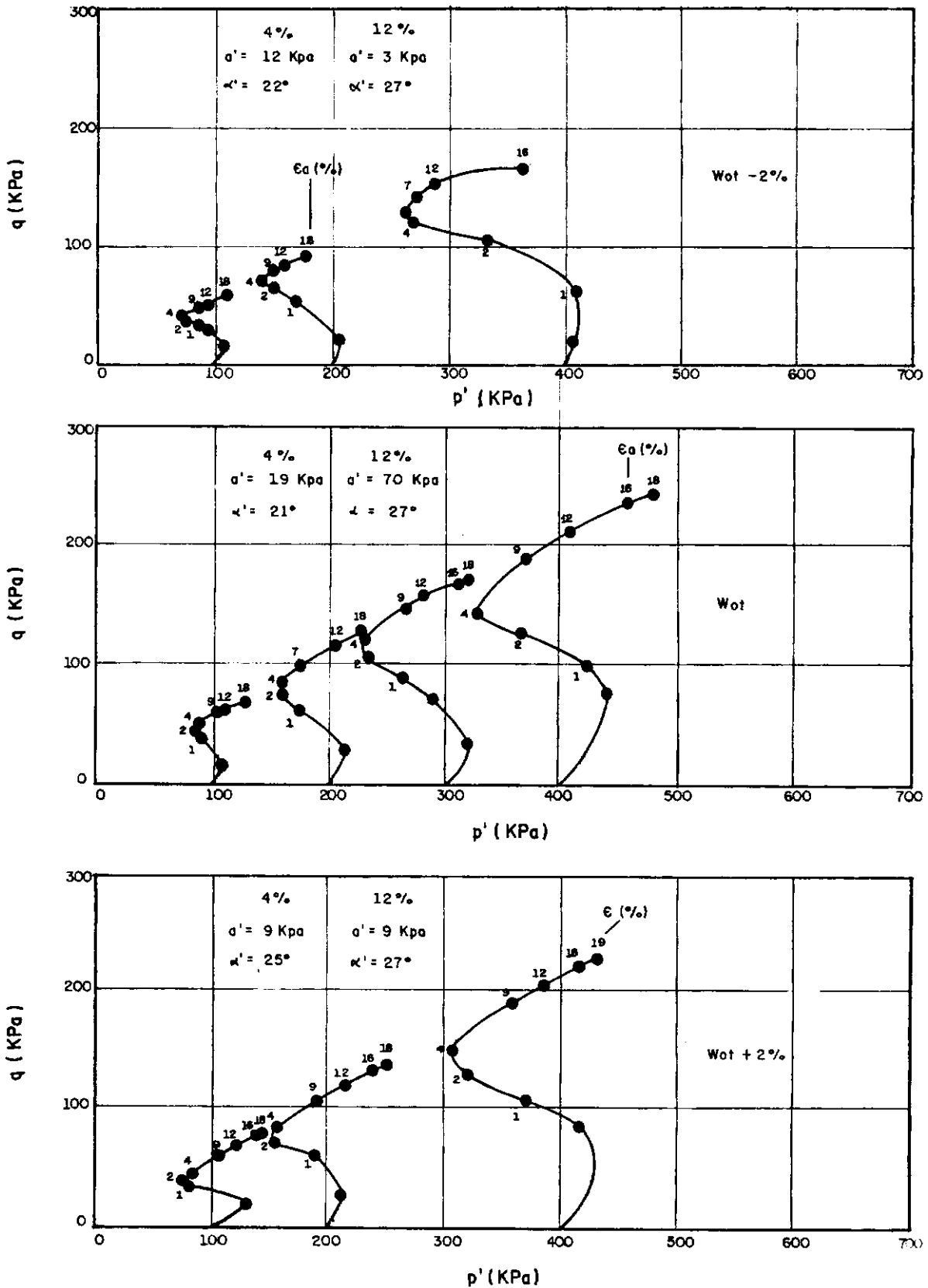


FIG. V.5 — CAMINHOS DE TENSÕES EFETIVAS DO MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA.

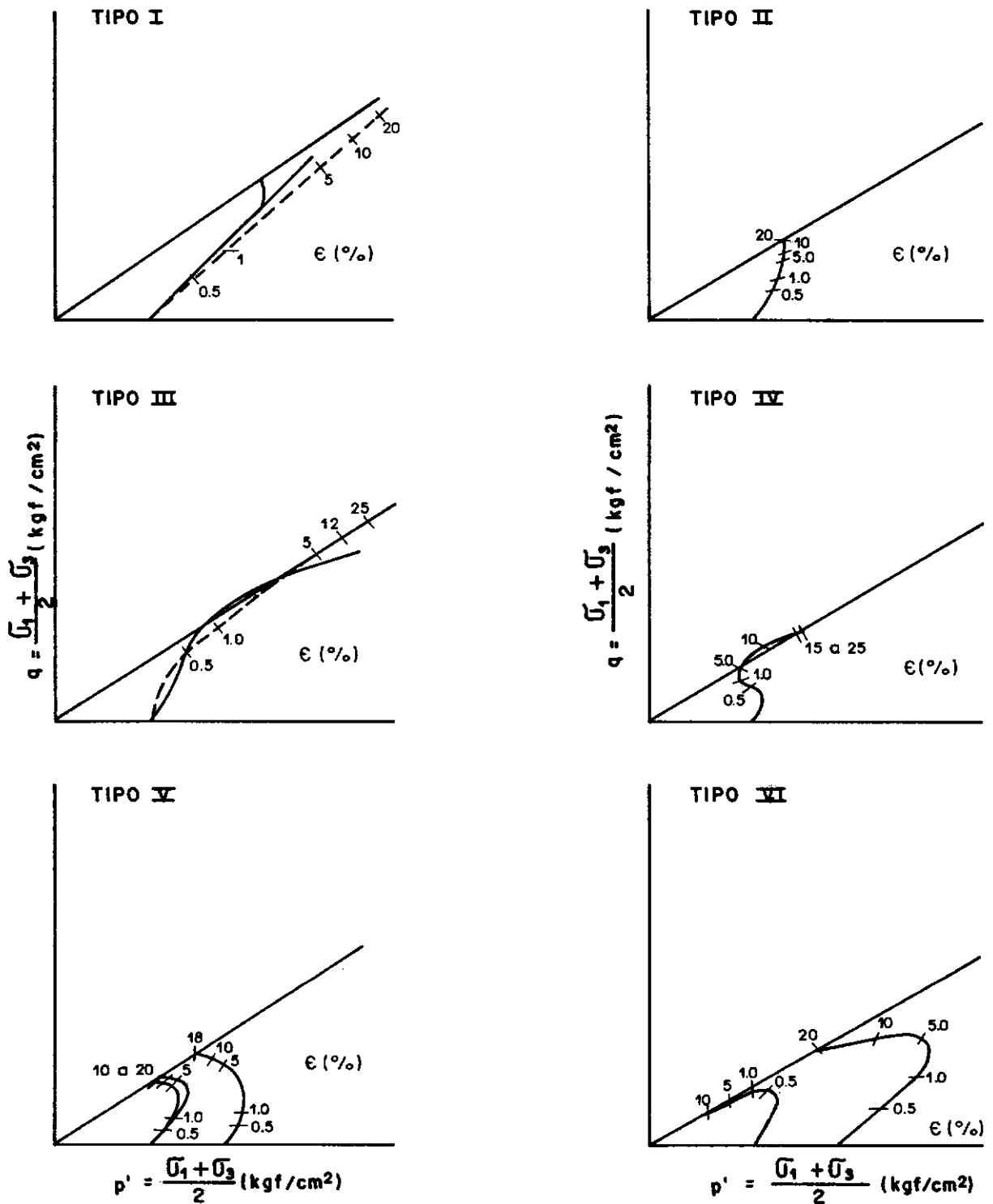


FIG. V6 — POSSÍVEIS CAMINHOS DE TENSÕES TÍPICOS DE SOLOS COMPACTADOS .



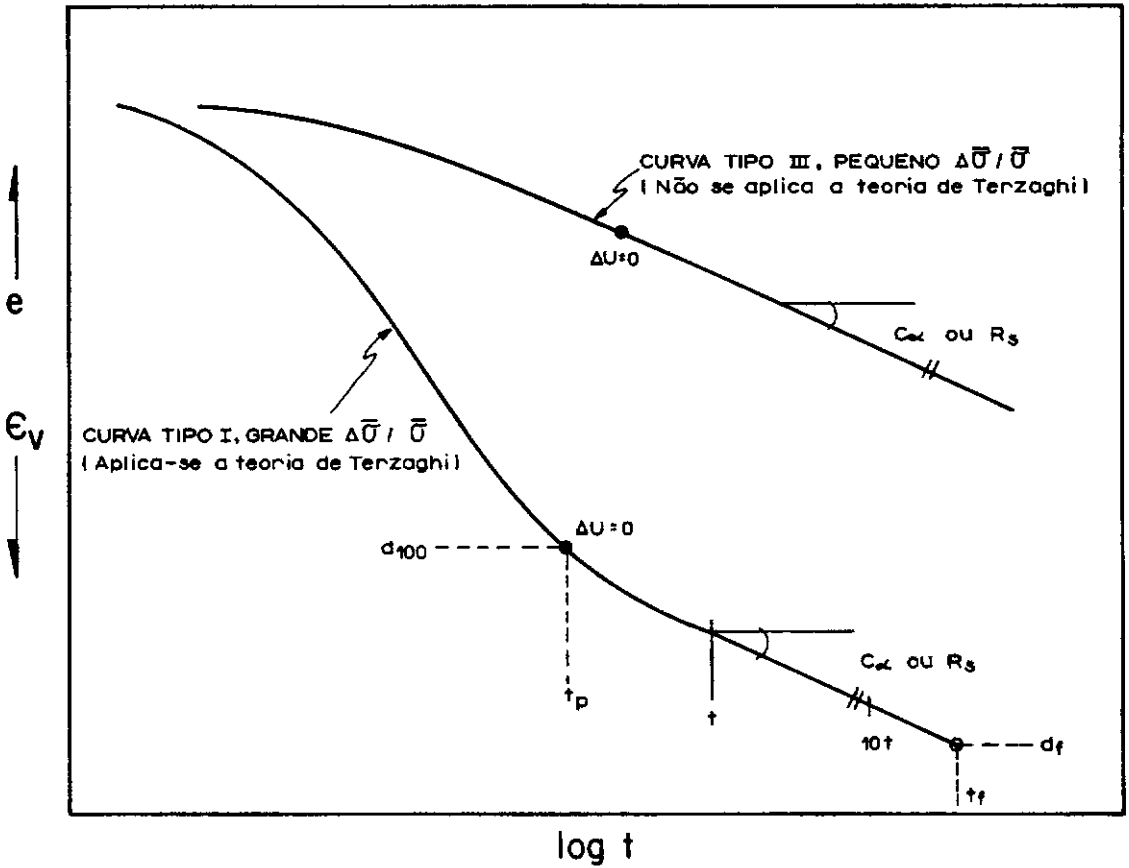


FIG. V7 — CURVAS TÍPICAS DE ADENSAMENTO SEGUNDO LADD (1973)

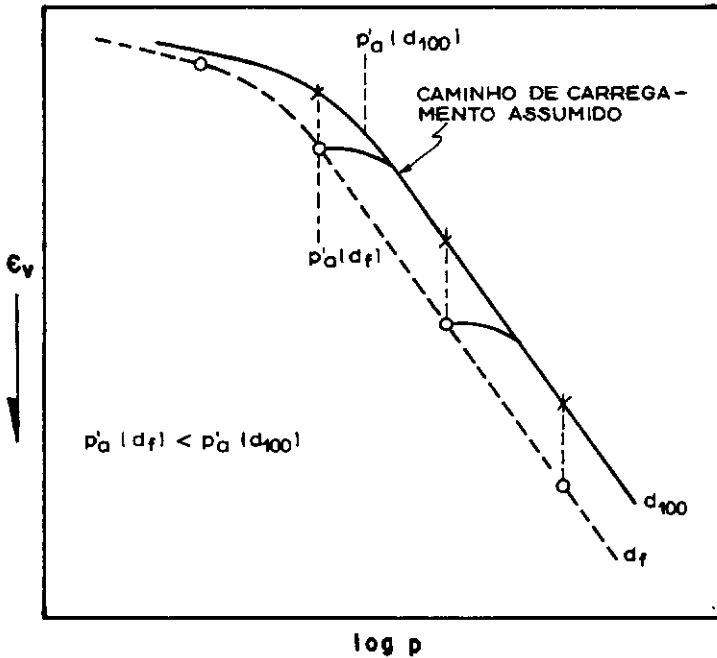


FIG. V8 — CURVAS DE ADENSAMENTO MOSTRANDO A INFLUÊNCIA DO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO NA PRESSÃO DE PRÉ-ADENS.

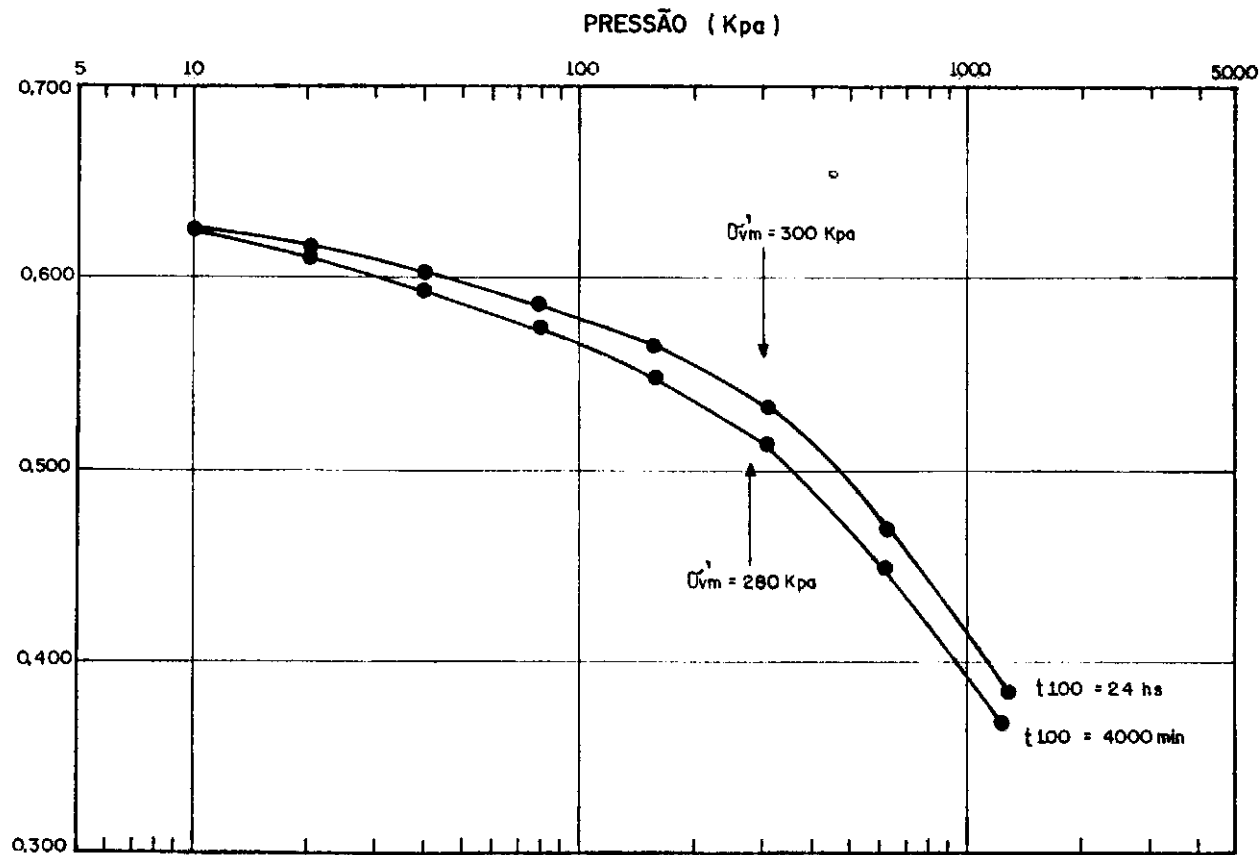


FIG.V.9 - CURVAS DE ADENSAMENTO OBTIDAS PARA O MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU, CONSIDERANDO-SE  $t_{100} = 24 \text{ hs}$ .

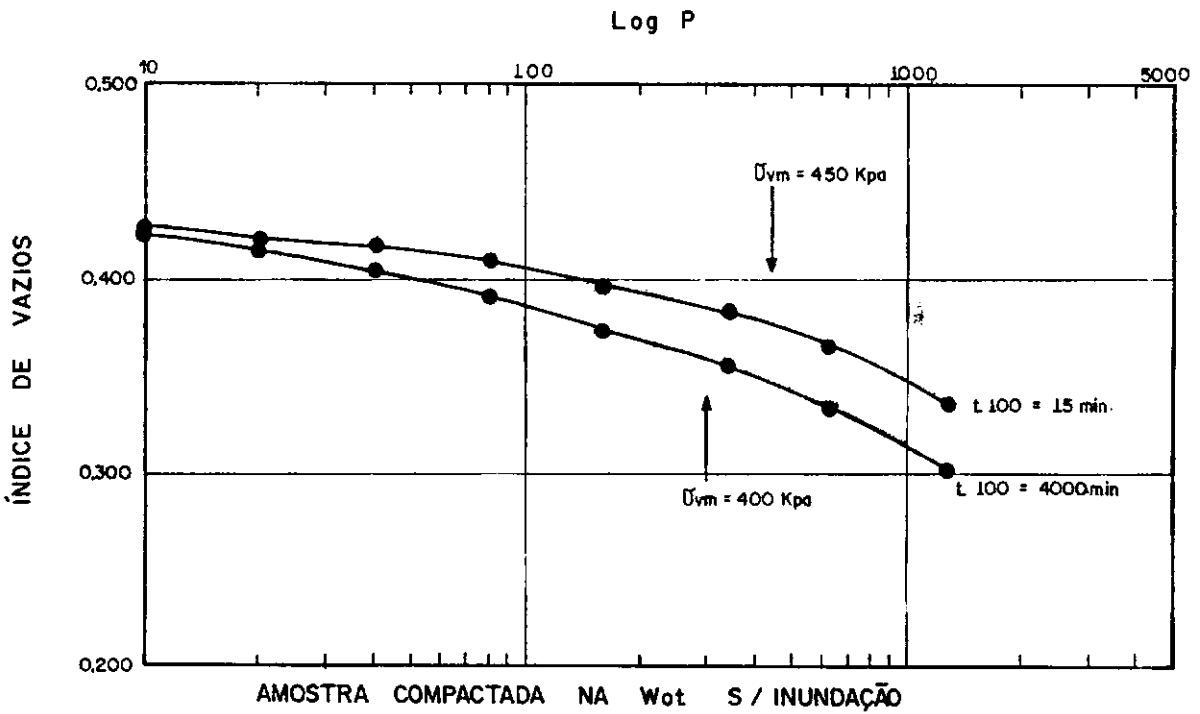
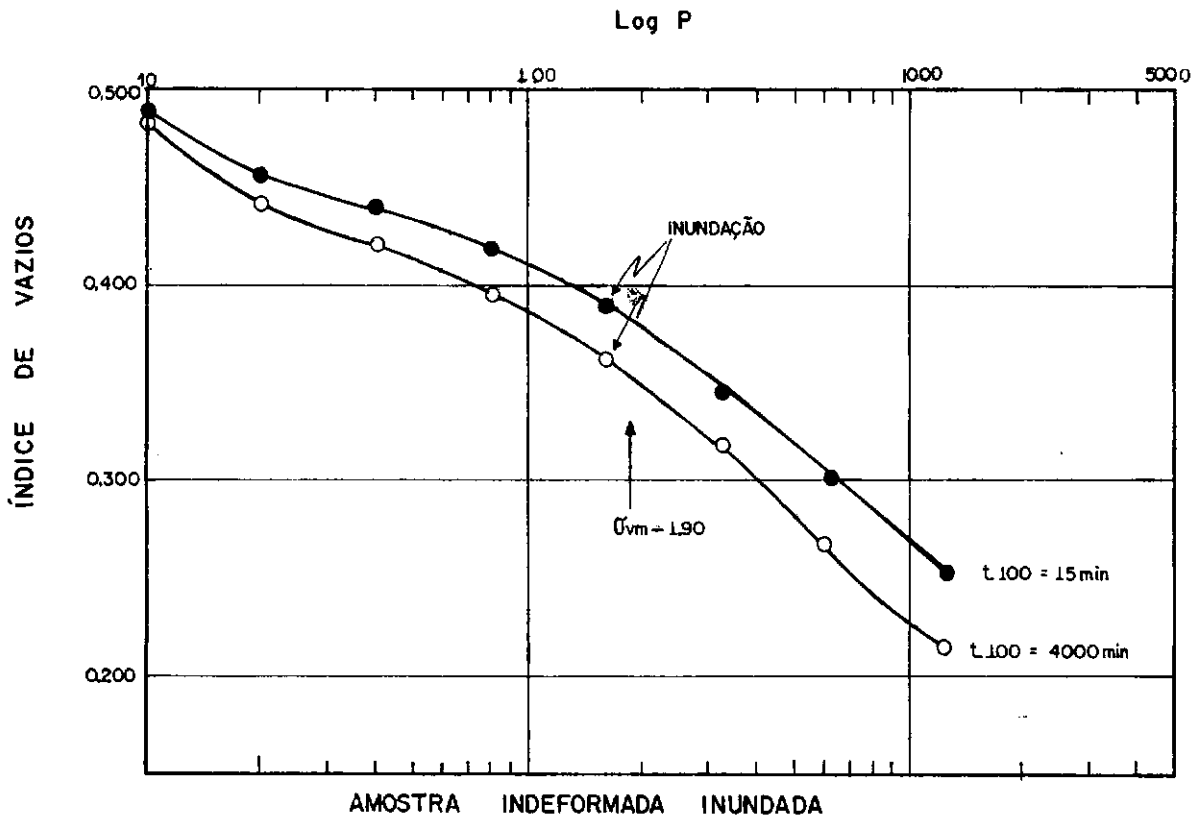


FIG. V. 10 — CURVAS DE ADENSAMENTO OBTIDAS CONSIDERANDO-AS  $t_{100} = 15 \text{ min}$  P/O MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA.

## CAPÍTULO VI

## APLICAÇÃO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA

Neste capítulo, procurou-se determinar, para os materiais das Barragens do Açú e de Bocaina, os parâmetros elásticos conforme a teoria descrita no Apêndice B.

Nas figuras VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4, são mostrados os resultados dos ensaios triaxiais tipo UU e  $\overline{\text{CU}}$ , apresentados no capítulo IV, em eixos transformados para os materiais das Barragens do Açú e de Bocaina. Verifica-se que há uma boa aproximação entre os pontos reais e a reta definida pela equação B.1 referentes aos dois materiais, conforme os coeficientes de correlação apresentados junto às retas. Com relação às curvas tensão-deformação teóricas e de ensaio, apresentadas nas figuras VI.5, VI.6, VI.7 e VI.8, para alguns ensaios executados nos dois materiais, observa-se que para o trecho deformações considerado, até 12%, a aproximação das curvas teóricas com as de ensaio não é muito boa, principalmente para o ensaio UU.

Os valores do módulo de deformação tangente inicial, obtidos através da expressão:

$$E_i = \left[ \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon} \right]_{\varepsilon=0} = 1/a$$

onde "a" é um dos parâmetros da hipérbole, conforme a figura B.1, bem como os valores assintóticos da tensão desviatória, ambos obtidos para as deformações de 4 e 12%, estão apresentados nas tabelas VI.1, VI.2, VI.3 e VI.4 para os ensaios UU e  $\overline{\text{CU}}$  realizados com as duas amostras.

Admitindo-se a variação do módulo tangente inicial,  $E_i$ , com a pressão de adensamento efetivo,  $\sigma'_c$ , de acordo com a Equação B.4 de Janbu (21), obtêm-se os parâmetros K e N conforme o que é apresentado nas tabelas de VI.1 a VI.4 para os dois materiais estudados, sendo K a intersecção da reta com o eixo das ordenadas para  $\sigma'_c = P_a$  e na inclinação da reta. Estes pa

râmetros foram obtidos através de correlação linear sendo os valores dos coeficientes de correlação também mostrados nas tabelas já citadas; através deles, observa-se que, para o material da Barragem do Açu, não se obteve uma boa correlação, principalmente para os pontos até 4% de deformação, sendo o valor de K muito pouco influenciado pela variação de umidade no ensaio tipo  $\overline{CU}$ . Para o material da Barragem de Bocaina, a concordância entre a reta e os pontos obtidos foi melhor, embora os ensaios feitos com umidade abaixo da umidade ótima tenham apresentado coeficientes de correlação baixos, principalmente o ensaio  $\overline{CU}$  na deformação de ruptura de 12%, como pode ser visto nas tabelas VI.3, IV.3a, VI.4 e IV 4a.

Os valores do módulo tangente inicial  $E_1$ , nos dois tipos de ensaios e para os dois materiais, nas pressões confinantes correspondentes, não são muito diferentes, visto que as condições de ensaio são as mesmas, ou seja, em ambos os materiais ou foram realizados ensaios de compressão, não havendo influência da tensão intermediária ( $\sigma_2$ ) no módulo de deformação inicial. Observa-se ainda que os módulos de deformação inicial obtidos para a deformação final de 4% são ligeiramente superiores aos obtidos para a deformação final de 12%.

Conforme a equação B.7, o módulo tangente,  $E_t$ , tende a diminuir com o aumento do nível de tensões. Nas tabelas VI.5 VI.6, estão apresentados os valores calculados do módulo tangente para os ensaios tipo UU e  $\overline{CU}$  realizados como os dos materiais pesquisados; para diversos níveis de tensões, são apresentados os valores do módulo tangente apenas para os ensaios onde se obteve uma boa correlação entre  $\log (E_i/Pa)$  e  $\log (\sigma_3/Pa)$  conforme as tabelas VI.1, VI.2, VI.3, VI.3a, VI.4, e VI.4a. Os módulos tangentes foram também determinados para as deformações de 4 e 12% e observa-se que os valores do módulo tangente determinados para 12% são menores que os determinados para 4% de deformação.

Os valores do módulo secante a um nível de tensões de 50%,  $E_{50}$ , correspondentes à inclinação da reta que une a origem ao ponto  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{rup}/2 \times \epsilon_{rup}$ , na curva tensão-deformação, consideram-se as deformações de 4 e 12% para a ruptura. Os valores do  $E_{50}$  obtidos para as duas deformações acima, nos ensaios UU e  $\overline{CU}$ , estão apresentados nas tabelas de VI.1 a VI.4a, juntamente com os valores do módulo tangente inicial, e, como se pode observar, são bem maiores que o módulo tangente para o mesmo nível de tensões (50%).

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMI DADE (%)	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_i = 1/a$ (KPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$ (KPa)	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
4	Wot-3%	1	100	30400	266	0,85	274	0,022	0,071	28200
		2	300	25500	326	0,80				29000
		3	400	23900	350	0,77				24800
		4	500	38000	377	0,84				40100
	Wot	1	100	24800	148	0,95	192	0,0163	0,363	14800
		2	200	14200	286	0,66				18800
		3	400	29600	217	0,88				29000
		4	500	26700	230	0,84				29000
	Wot+4%	1	100	6600	69	0,80	62	0,565	0,987	8100
		2	200	8600	70	0,83				8700
		3	500	16400	76	0,91				18800

TABELA VI.1 - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)

BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO UU

DEFOR MACÃO $\epsilon_a(\%)$	UMIDA DE E(%)	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_1=1/a$ (KPa)	$(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}=1/b$ (KPa)	$R_f=\frac{(\sigma_1-\sigma_3)f}{(\sigma_1-\sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
12	Wot-3%	1	100	25500	304	0,91	232	-0,014	-0,046	24800
		2	300	19800	429	0,87				18400
		3	400	19200	459	0,85				18000
		4	500	29800	467	0,91				27500
	Wot	1	100	14500	212	0,93	130	0,347	0,903	11900
		2	200	14200	287	0,86				15400
		3	400	22900	248	0,94				23600
		4	500	23500	250	0,93				23600
	Wot+4%	1	100	5800	77	0,91	55	0,374	0,996	6200
		2	200	7100	78	0,94				7000
		3	500	10600	89	0,97				14300

TABELA VI.1A - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)

BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO UU



DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a(\%)$	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\bar{\sigma}_c$ (KPa)	$E_1 = 1/a$ (KPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$ (KPa)	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	E50 SECANTE (KPa)
4	Wot-3%	1	100	26500	95	0,95	247	0,330	0,921	26100
		2	200	27600	123	0,92				29000
		3	300	38900	186	0,91				34900
		4	500	43500	322	0,85				56700
	Wot	1	100	23700	140	0,88	240	0,218	0,980	22500
		2	230	29900	204	0,87				32700
		3	450	32300	272	0,82				27500
		4	500	37000	288	0,85				47000
	Wot+4%	1	100	26200	97	0,93	257	-0,106	0,310	29000
		2	200	21700	159	0,87				22500
		3	300	32400	196	0,88				23600
		4	500	19300	180	0,87				37300

TABELA VI. 2 -- RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)

BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO CŪ

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_i = 1/a$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$ (KPa)	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
12	Wot-3%	1	100	18100	104	1,10	150	0,330	0,921	18000
		2	200	17900	138	1,09				18000
		3	300	31300	194	1,08				27500
		4	500	46900	311	1,06				51400
	Wot	1	100	24700	137	1,03	233	0,282	0,961	21400
		2	230	27800	210	1,06				24800
		3	450	38200	253	1,04				26100
		4	500	37700	283	1,04				38700
	Wot+4%	1	100	36800	92	1,10	340	0,254	0,801	26100
		2	200	25400	152	1,10				17300
		3	300	31300	197	1,06				18800
		4	500	22400	180	1,06				32700

TABELA VI 2A - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)

BARRAGEM DO AÇU - ENSAIO  $\overline{CU}$

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a(\%)$	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_i = 1/a$	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 1/b$	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
4	Wot-2%	1	100	34500	641	0,66	318	0,20	0,866	23600
		2	200	34200	769	0,62				24800
		3	400	44800	758	0,80				25400
	Wot	1	50	23500	301	0,80	244	0,105	0,954	11000
		2	200	26200	476	0,70				15400
		3	400	29800	585	0,71				17700
	Wot+2%	1	100	17100	168	0,88	180	0,417	0,916	5800
		2	200	28200	202	0,89				9500
		3	400	30200	256	0,85				12800

TABELA VI.3 - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA-KONDNER (1962)

BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO UU

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a(\%)$	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_i = 1/a$	$(\sigma_1 - \sigma_3) = 1/b$	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
12	Wot-2%	1	100	44600	503	0,88	412	- 0,20	0,829	23600
		2	200	33300	794	0,84				20100
		3	400	34100	1176	0,83				18000
	Wot	1	50	21200	346	0,86	212	0,055	0,997	9700
		2	200	22800	571	0,85				12300
		3	400	23900	855	0,81				11100
	Wot+2%	1	100	10200	284	0,90	104	0,483	0,968	3500
		2	200	16400	297	0,94				6000
		3	400	19600	357	0,94				8100

TABELA VI.3A - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA-KONDNER (1962)

BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO UU

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_1 = l/a$ (KPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = l/b$	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
4	Wot-2%	1	100	40700	85	0,96	437	0,870	0,950	34900
		2	200	32200	158	0,89				30800
		3	400	12400	508	0,47 (*)				23600
	Wot	1	100	35100	100	0,98	339	0,180	0,870	27500
		2	200	37200	189	0,90				40100
		3	300	46500	274	0,82				56700
		4	400	43100	339	0,84				56700
	Wot+2%	1	100	31300	94	0,95	315	0,250	0,945	29000
		2	200	41500	186	0,91				40100
		3	400	43900	361	0,84				63100

(\*) Corr = 0,693

TABELA VI.4 - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)  
BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO CU

DEFOR- MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	$\sigma_c$ (KPa)	$E_i = 1/a$ (KPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = 1/b$	$R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}}$	K	N	Corr	$E_{50}$ SECANTE (KPa)
12	Wot-2%	1	100	15000	103	1,36	171	- 0,033	0,078	12800
		2	200	24400	172	1,42				14800
		3	400	14200	369	1,13				19600
	Wot	1	100	17600	124	0,99	173	0,392	0,918	20500
		2	200	22200	235	0,98				27500
		3	300	30900	330	0,95				40100
		4	400	28100	441	0,96				34900
	Wot+2%	1	100	11000	139	1,01	144	0,750	0,990	14300
		2	200	21000	248	0,91				29000
		3	400	31300	439	0,95				43300

TABELA VI.4A - RESUMO DA FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA - KONDNER (1962)  
BARRAGEM DE BOCAINA - ENSAIO  $\overline{CU}$

ENSAIO UU

UMIDADE	$\epsilon_a$ (%)	CP	$\sigma_c$ (KPa)	$E_{20}$ (KPa)	$E_{40}$ (KPa)	$E_{50}$ (KPa)	$E_{60}$ (KPa)	$E_{80}$ (KPa)
Wot + 4%	4	1	100	13300	8700	6700	5000	2400
		2	200	18700	12000	9200	6800	3000
		3	500	32100	21300	16700	12700	6300
	12	1	100	11700	6900	5000	3400	1100
		2	200	15100	8900	6400	4300	1300
		3	500	20700	11600	8000	5100	1200

ENSAIO CU

UMIDADE	$\epsilon_a$ (%)	CP	$\sigma_c$ (KPa)	$E_{20}$ (KPa)	$E_{40}$ (KPa)	$E_{50}$ (KPa)	$E_{60}$ (KPa)	$E_{80}$ (KPa)
Wótima	4	1	100	15800	9100	6500	4200	1200
		2	230	17000	8000	4800	2400	100
		3	450	20700	10700	7000	4000	500
		4	500	19500	8700	4900	2200	0
	12	1	100	16300	9900	7300	5100	1900
		2	230	18400	9200	5800	3200	300
		3	450	24400	14300	10300	6900	2200
		4	500	24600	13900	9700	6300	1600

TABELA VI.5 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE COM O NÍVEL DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS UU E CU DO MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU

## ENSAIO UU

UMIDADE	$\varepsilon_a$ (%)	CP	$\sigma_c$ (KPa)	$E_{20}$ (KPa)	$E_{40}$ (KPa)	$E_{50}$ (KPa)	$E_{60}$ (KPa)	$E_{80}$ (KPa)
Wótina	4	1	50	16100	10600	8200	6200	3000
		2	200	17900	12300	9900	7700	4200
		3	400	20800	14300	11500	9100	5000
	12	1	50	16000	10200	7800	5800	2500
		2	200	17000	10600	7900	5700	2300
		3	400	18200	11900	9200	6900	3300

ENSAIO  $\overline{CU}$ 

UMIDADE	$\varepsilon_a$ (%)	CP	$\sigma_c$ (KPa)	$E_{20}$ (KPa)	$E_{40}$ (KPa)	$E_{50}$ (KPa)	$E_{60}$ (KPa)	$E_{80}$ (KPa)
Wótina	4	1	100	17100	10100	7300	4900	1600
		2	200	19600	11800	8600	5900	2100
		3	300	22200	14400	11100	8300	3900
		4	400	23200	14900	11400	8400	3800
	12	1	100	14700	8400	5900	3800	1000
		2	200	19000	10600	7300	4600	1100
		3	300	23100	13600	9800	6600	2100
		4	400	25500	14700	10400	6900	2000

TABELA VI.6 - VARIAÇÃO DO MÓDULO DE DEFORMAÇÃO TANGENTE COM O NÍVEL DE TENSÕES PARA OS ENSAIOS UU E  $\overline{CU}$  DO MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA



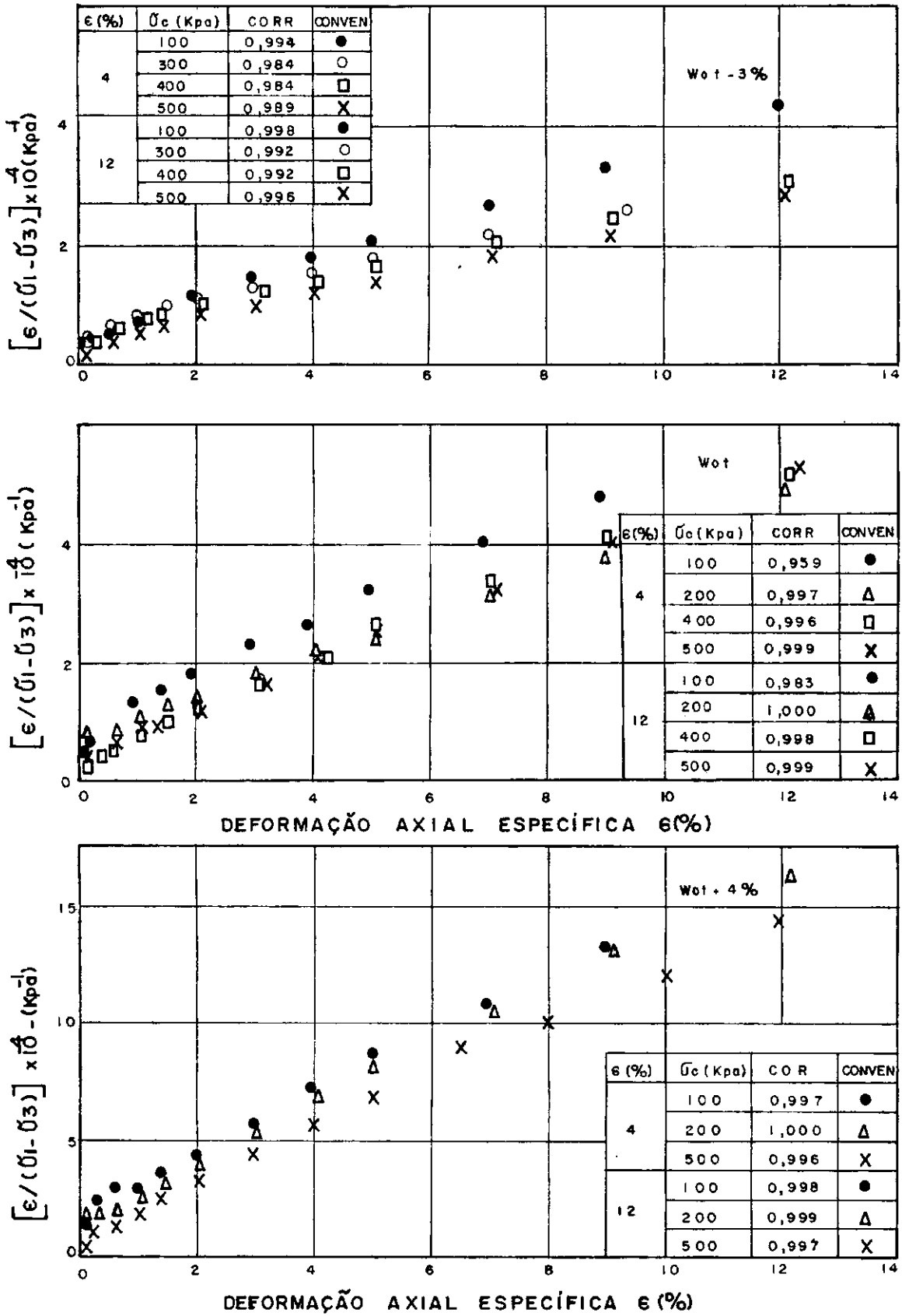


FIG. VI.1. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIPERBÓ-  
LICOS  $a$  e  $b$  PARA OS ENSAIOS UU DO MATE-  
RIAL DA BARRAGEM DO AÇU.

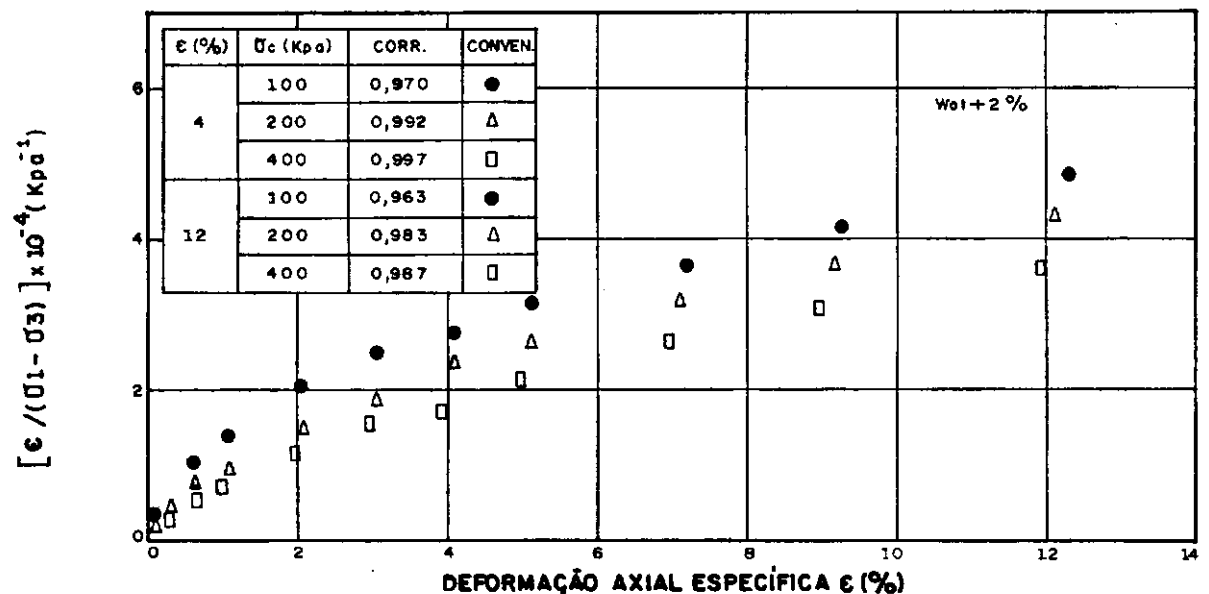
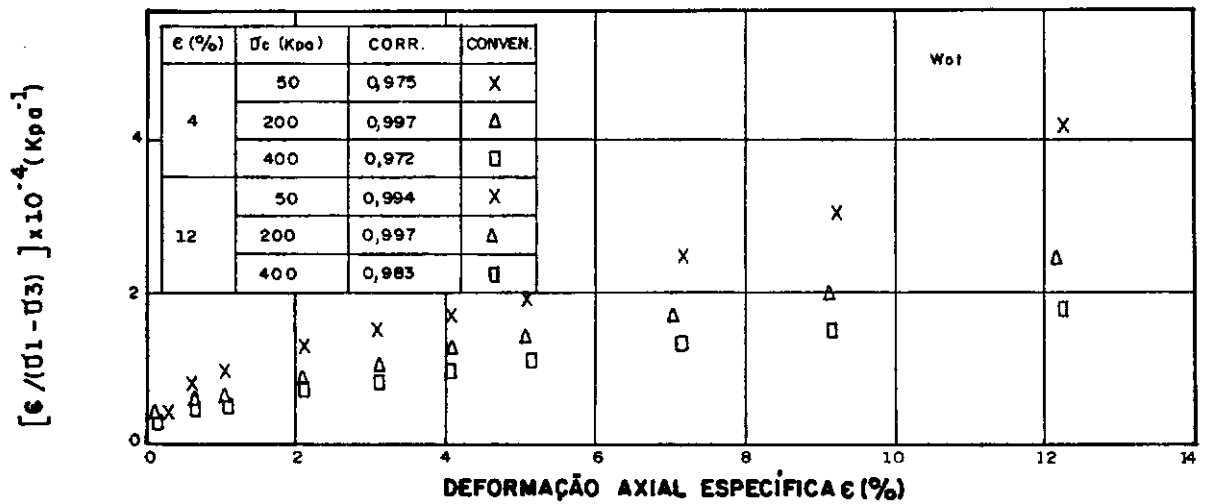
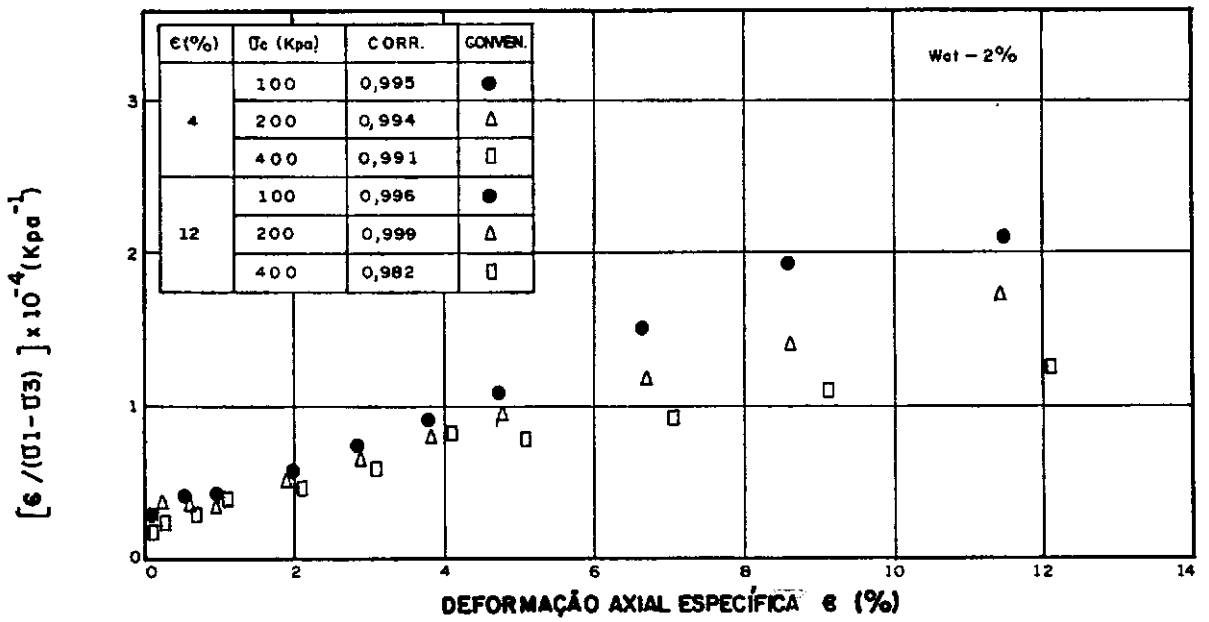


FIG. VI-2 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIPERBÓLICOS  $a$  e  $b$  PARA O ENSAIO UU DO MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA.

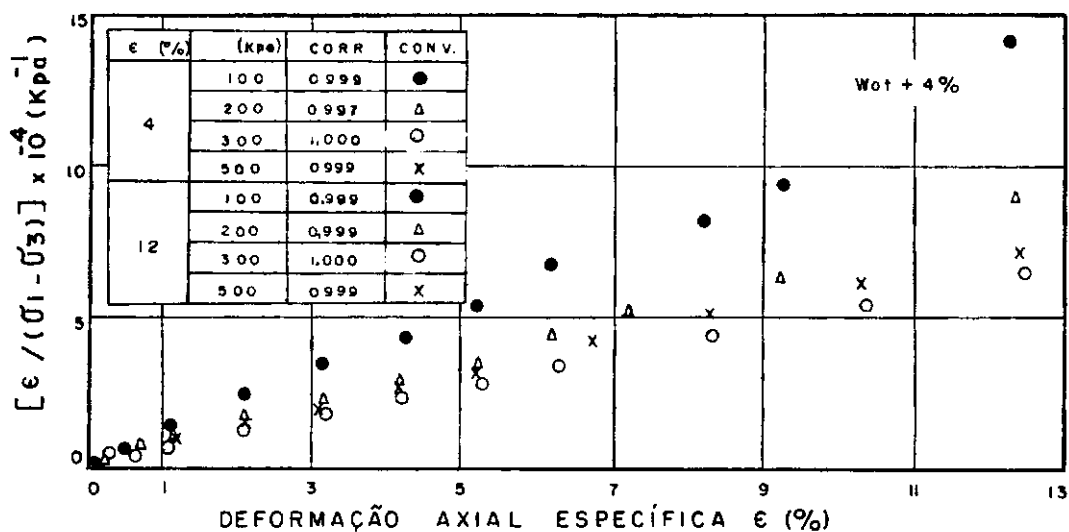
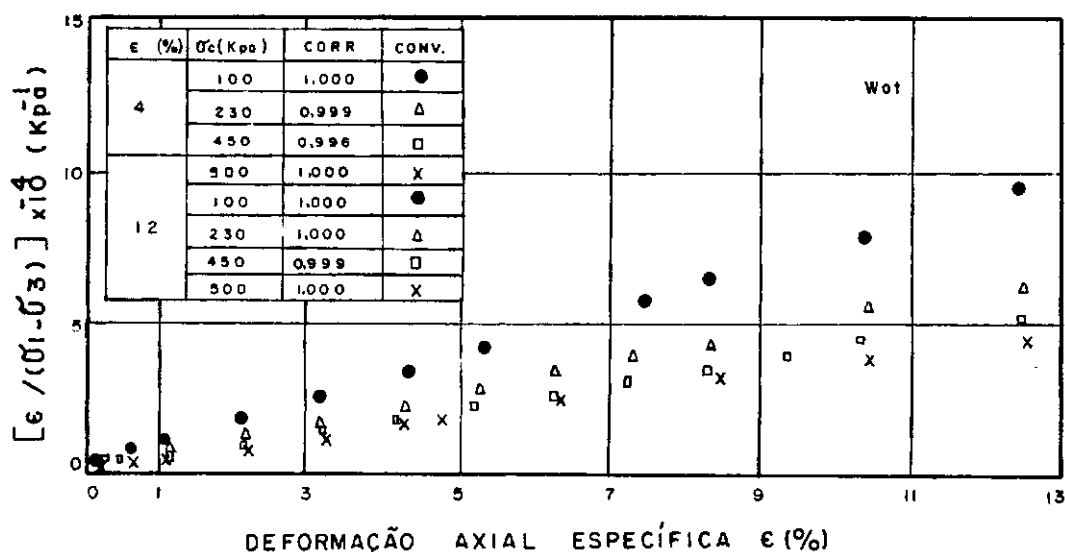
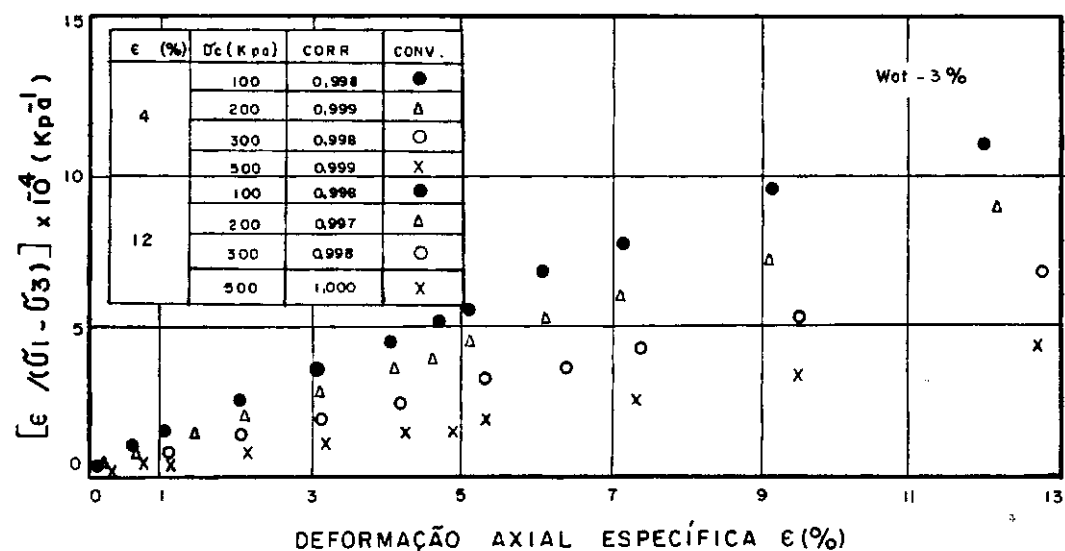


Fig. VI.3 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIPERBÓLICOS  $a$  e  $b$  PARA OS ENSAIOS  $\bar{\sigma}_c$  DO MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU.

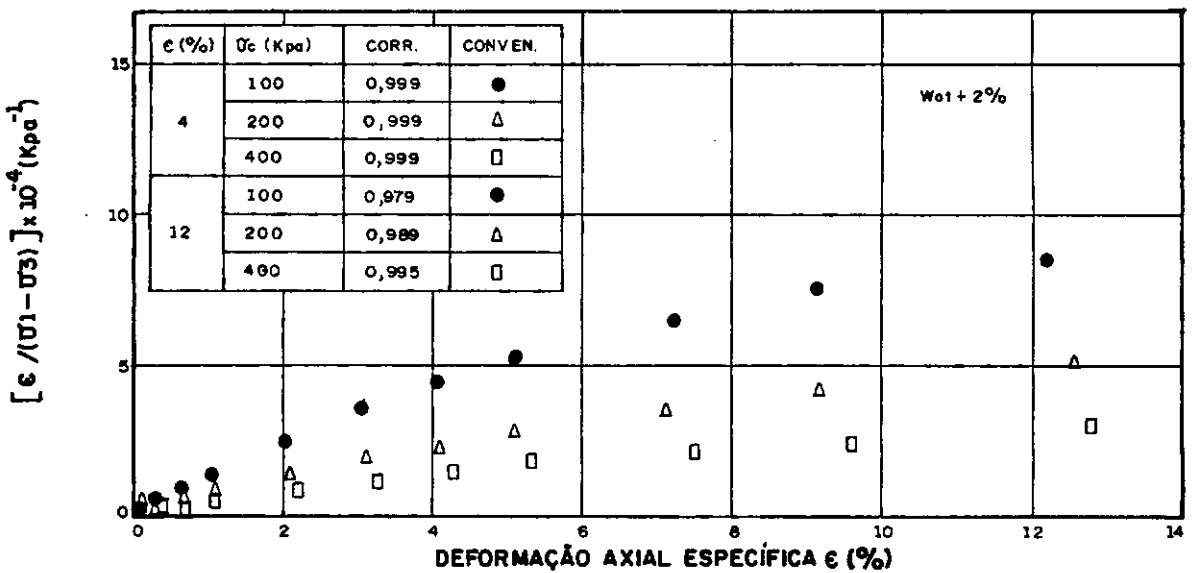
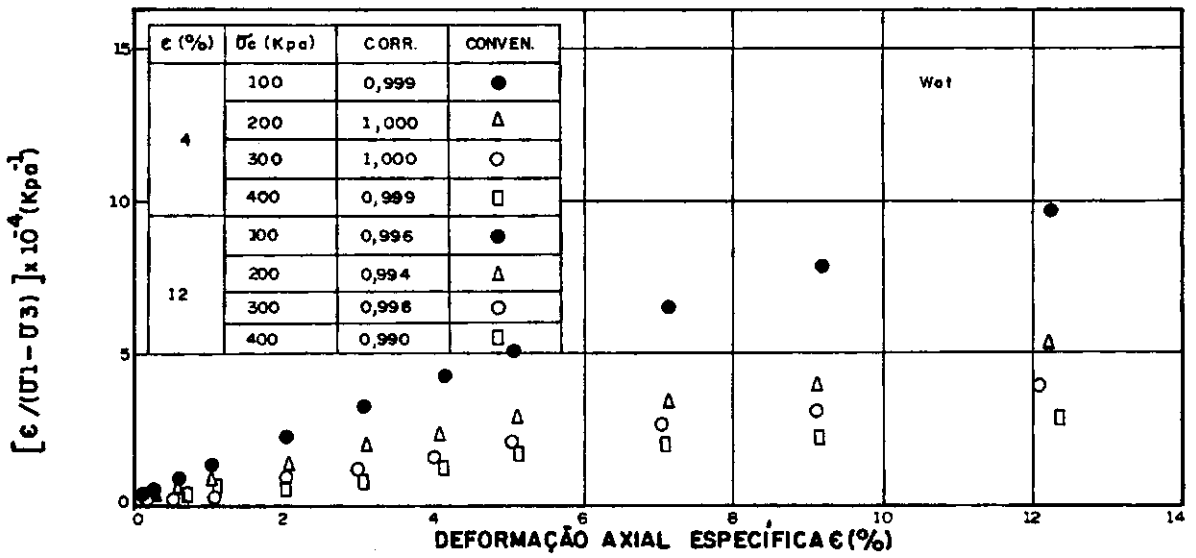
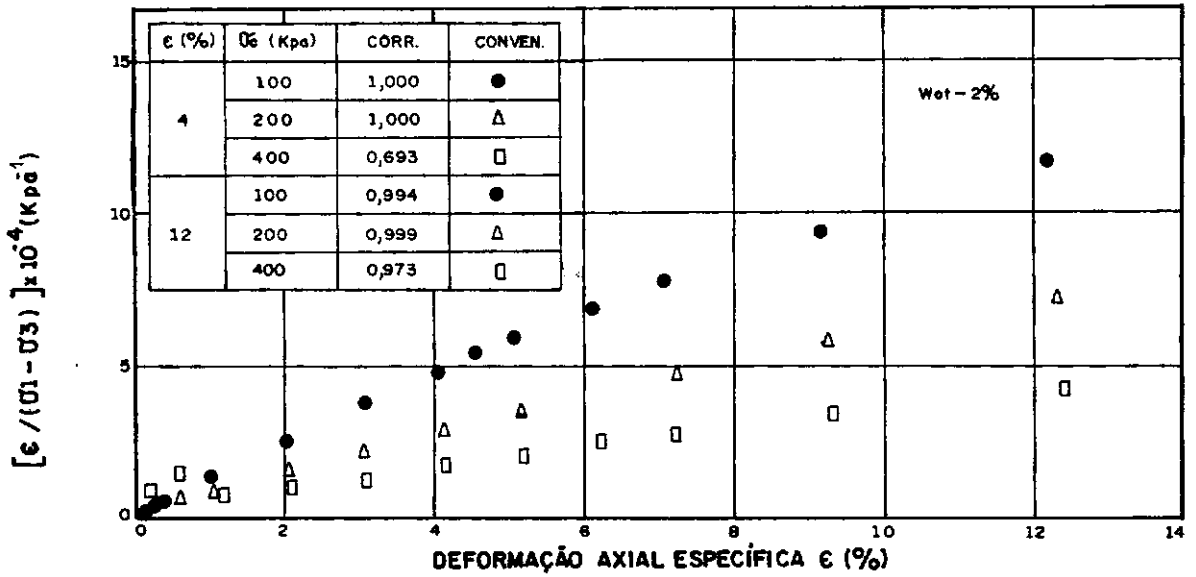


FIG. VI. 4 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS HIPERBÓLICOS  $a$  e  $b$  PARA O ENSAIO  $\bar{\sigma}_c$  DO MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAÍNA.

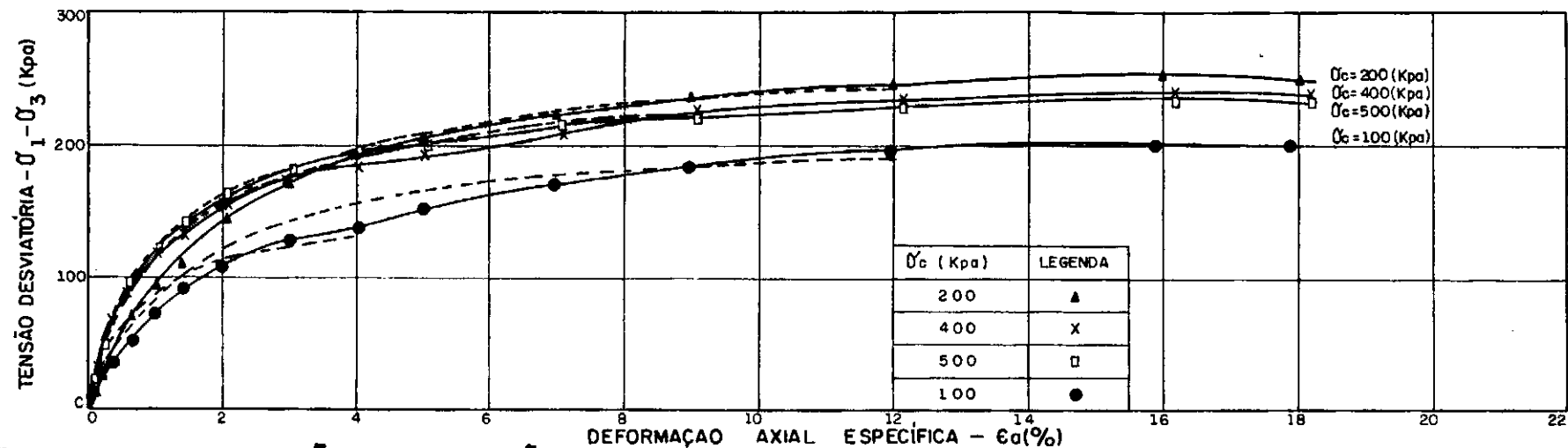


FIG.VI.5 - CURVAS DE TENSÃO - DEFORMAÇÃO TEÓRICAS-ENSAIO UU-MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇÚ - Wot

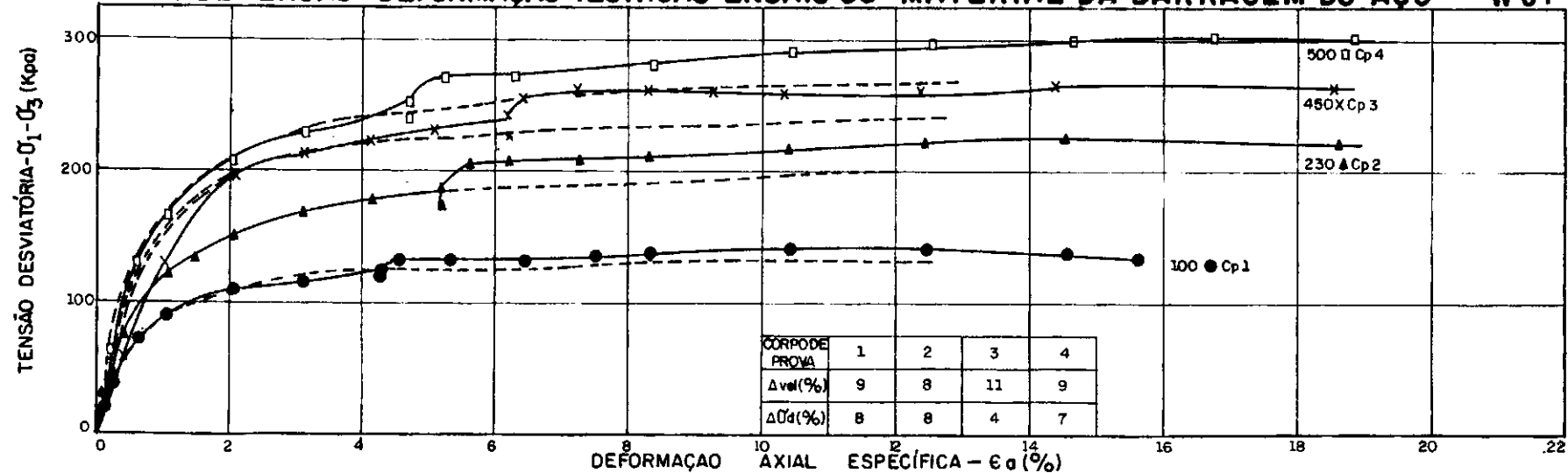


FIG.VI.6 - CURVAS DE TENSÃO - DEFORMAÇÃO TEÓRICAS-ENSAIO CŪ MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇÚ - Wot.

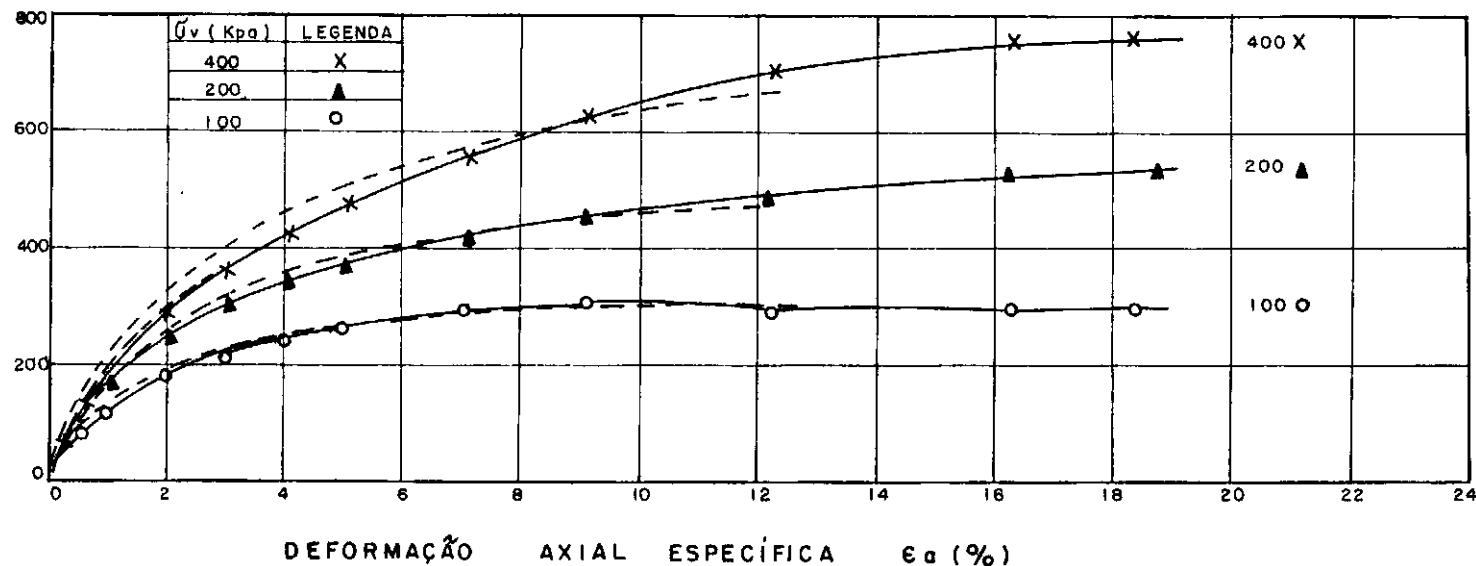


FIG. VI.7 - CURVAS DE TENSÃO DEFORMAÇÃO TEÓRICAS - ENSAIO UU  
MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA - Wot.

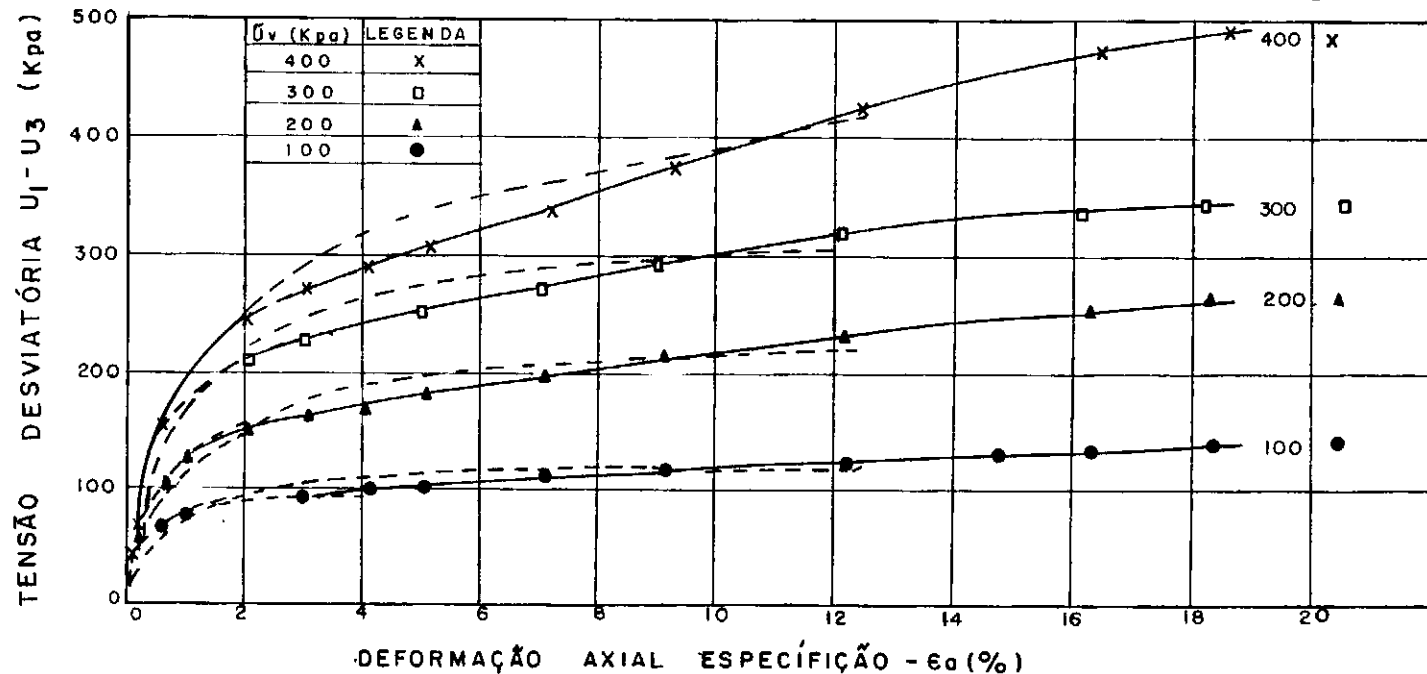


FIG. VI.8 - CURVA DE TENÇÃO - DEFORMAÇÃO TEÓRICAS - ENSAIO  $\bar{C}_U$  MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA - Wot.

## CAPÍTULO VII

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

## VI.1. Conclusões

1. Os dois materiais estudados possuem origens geológicas diferentes, sendo o material da Barragem do Açú muito menos intemperizado que o material da Barragem de Bocaina.
2. A amostra da Barragem do Açú apresenta um alto teor de sódio no seu complexo sortivo, o que o caracteriza como um material solódico de uma região sujeita a salinização ou edafização.
3. O elevado teor de sódio encontrado na amostra da Barragem do Açú lhe confere características de difícil trabalhabilidade permeabilidade reduzida e possivelmente está ligado à sua baixa resistência.
4. Os resultados dos ensaios de dispersibilidade sugeriram que o material da Barragem do Açú é pouco a moderadamente dispersivo, enquanto que o da Barragem de Bocaina é não dispersivo.
5. Através da análise mineralógica detectou-se no material da Barragem do Açú a presença de minerais do grupo 2:1, incluindo minerais expansivos.
6. A granulometria aberta da amostra da Barragem de Bocaina faz com que o uso deste material, principalmente em núcleos de Barragens, seja feito aliado a cuidadosos critérios de dimensionamento de filtros.
7. O uso dos ensaios de cisalhamento direto tipo "CU" conduziu a valores de resistência maiores que os ob



tidos nos ensaios triaxiais  $\overline{CU}$ , principalmente com relação à coesão, constatando-se que não é aconselhável o uso de ensaios de cisalhamento direto tipo "CU" na determinação dos parâmetros de resistência dos solos argilosos compactados.

8. O uso de velocidades de ruptura elevadas nos ensaios  $\overline{UU}$  feitos em solos de baixa permeabilidade leva a valores de pressões neutras, medidos na base do corpo de prova, menores que os reais, pois não há tempo para a equalização dos mesmos. É aconselhável, desse modo, reduzir a velocidade de ruptura de tais ensaios, de forma que se consiga a equalização das pressões neutras.
9. Ficou evidenciado o fato de que os dois materiais, apesar de terem sido pesquisados e empregados como materiais convencionais, se mostraram face a este trabalho, como não convencionais; o da Barragem do Açú, devido aos resultados da análise química e mineralógica e dos ensaios de dispersibilidade, e o da Barragem de Bocaina, face a descontinuidade da sua distribuição granulométrica.
10. Nos ensaios de adensamento realizados nas duas amostras com relação de carregamento  $\Delta P/p = 1$ , verificou-se que, para as pressões iniciais, as curvas de formação  $x \log.$  tempo não apresentam a forma clássica da Teoria de Terzaghi.

## VII.2. Sugestões:

1. Realização de ensaios de análise química em outros materiais empregados em barragens, procurando-se cor

relacionar os dados obtidos com as características de resistência e trabalhabilidade e com a formação geológica dos mesmos.

2. Estudar os parâmetros de resistência do material da Barragem de Bocaina com corpos de prova de tamanho maior sem eliminar os pedregulhos, verificando a influência dos mesmos nos parâmetros obtidos.
3. Estudar melhor o comportamento das curvas  $\epsilon_v(\%)$  x  $\log t$  obtido nos ensaios de adensamento de solos compactados e a influência da razão de carregamento.
4. Estudar a influência da parcela de adensamento secundário na pressão de pré-adensamento e o tempo "ideal" de final de adensamento primário para as curvas onde não se aplica a teoria de Terzaghi.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BISHOP, A.W.; ALPAN, I; BLIGHT, G.E. e DONALD, I.D., Factors Controlling the Strength of Partly Saturated Cohesive Soils", ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive soils, Boulder, Colorado, pp. 555 - 580, (1960).
2. BISHOP, A.W. e HENKEL, D.J., "The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test", Ed. Arnold, London, 2a Edition 228 p., (1962).
3. BLIGHT, G.E. "The Effect of Nonuniform Pore-pressure Measurements on the Shear Strength of Soils", ASTM-NRC, Sym on Laboratory Shear Testing of soils, ASTM STP Nº 361, pp. 173-183, (1963).
4. BOURDEAUX, G. e NAKAO, H., "Ensaaios sobre Argilas Dispersivas", Proc. V Cong. Bras de Mecânica dos solos e Eng. de Fundações, São Paulo, pp. 145-155 (1974).
5. BRADY, N.C. e BUCKMAN, H.O., "Natureza e Propriedades dos Solos", Trad. de Antônio B. Neiva Figueiredo Filho, 6ª Ed., Freitas Bastos, Rio de Janeiro, (1983).
6. CASAGRANDE, A. e HIRSCHFELD, R.C., "Stress Deformations and Strength Characteristics of a Clay Compacted to a Constant Dry Unit Weight", ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, Colorado, pp. 359-417. (1960).
7. CRUZ, P.T., "Propriedades de Engenharia dos Solos Residuais Compactados da Região Centro-Sul do Brasil, Escola Politecnica, USP, São Paulo, 191 p. (1967).

8. CRUZ, P.T., "Propriedades de Engenharia dos Solos Resi  
duais Compactados", Escola Politécnica, USP, 130 p.  
(1969).
9. CRUZ, P.T., "Solos Lateríticos e Saprolíticos Compactados  
Alguns Aspectos da Resistência ao Cisalhamento e Traba  
lhabilidade" 1º Cong. Int. de Geomecânica em Solos  
Lateríticos e Saprolíticos (TROPICAL'S) Pré- Print,  
Brasília, pp. 66, (1985).
10. DNOCS e SERETE, "Estudos Preliminares e Projeto Executivo  
da Barragem Engº Armando Ribeiro Gonçalves - RN"  
(1975).
11. DUNCAN, J.M. e SEED, H.B., "Corrections for Strength Test  
Data", J.of soil Mechnics and Foundation Division ,  
ASCE, Vol 93 Nº SM5, pp. 121-137, (1967).
12. DUNCAN, J.M. e CHAN, C.Y., "Nonlinear Analisis of Stress  
and Strain in Soil", J. of Soil Mechanics and Foundati  
tion Division, ASCE, Vol. 96 Nº SM5, pp. 1629-1953 ,  
(1970).
13. DUNCAN, J.M. e WONG, K.S., "Hiperbolic Stress-Strain Parame  
ters for Nonlinear Finite Element Analisis of  
Stress and Movement in Soil Masses" Report NºTE-74-3,  
University, of California (1974).
14. EMBRAPA, "Manual de Métodos de Análise de Solo", SNLCS,  
Rio de Janeiro (1979)
15. FERREIRA, S.R.M., "Compressibilidade de uma Argila Orgâni  
ca Mole do Recife" Tese MSC, COPPE/UFRJ. 212 p(1982).

16. GILBERT, G.C. e Henkel, D.J. "The Effects of Rubber Membranes on Measured Compression Strength of Clay Samples" Geotechnique, Vol. 3, pp 20-29, (1952).
17. GRIM, R.E., "Clay Mineralogy" 2nd Edition, Mc Graw- Hill Book co., New York, 596 p. (1968).
18. GUIMARÃES, R.B., "Parâmetros Elásticos do Solo Residual Compactado da Barragem de Itaúba", Tese MSC, COPPE/UFRJ, 172 p, (1977).
19. HIDROTERRA, "Estudos Preliminares e Projeto Executivo da Barragem de Bocaina - Pi" (1982).
20. JACKSON, M.L., "Soil Chemical Analysis - Advanced Course", 2nd Edition, 11<sup>th</sup> printing, Published by the author, Madison Wi - USA (1979).
21. JAMBU, N., "Soil Compressibility as Determined by oedometer and Triaxial Test", proc. of European Conf. on Soil Mechanic and Foundation Eng., Weisbaden Germany, Vol I pp. 19-25, (1963).
22. KONDNER, R.L., "Hiperbolic Stressstrain Response: Cohesive Soils", J.of Soil Mechnics and Foundation Division, ASCE, Vol 89, Nº SM1, pp. 115-143, (1963).
23. KULHAWY, F.H.; DUNCAN, J.M. e SEED, H.B., "Finite Element Analysis of Stresses and Movements, in Embakments During Construction, Report Nº TE. 69-4, Office Research Services Univ. of California, Berkeley (1969).
24. LACERDA, W.A., "Stress-Relaxation and Creep Effects on Soil Deformation", Ph. D.Tesis, University of California, Berkeley (1976).

25. LADD, C.C., "Strength Parameters and Stress-Strain Behavior of Saturated Clays" MIT Research Report R.71-23, Department of Civil Engineering, (1971).
26. LADD, C.C., "Estimating Settlements of Structures Supported on Cohesive Soils" MIT, ASCE, (1973).
27. LAMBE, T.W., "Soil Testing for Engineers", J.Wiley and Sons, New York, 165 p., (1951).
28. LAMBE, T.W., "A Mechanistic Picture of Shear Strength in Clay" ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder Colorado, pp. 555-580, (1960).
29. LINS, A.H.P., "Ensaio Triaxiais de Compressão e Extensão na Argila Cinza do Rio de Janeiro em Botafogo" Tese Msc, COPPE/UFRJ, (1980).
30. LOWE III, J. e KARAFIATH, L., "Effect of Anisotropic Consolidation on the Undrained Shear Strength of Compacted Soils", ASCE, Conf on Shear Strength of Cohesive Soil, Boulder Colorado, pp. 837-858, (1960).
31. LSI - Resultados de ensaios feitos no material das Barragens de Bocaina, Palmeirinha, Chepeu e Mãe do Pontal.
32. MARSAL, R.J., "Propriedades de los Suelos Compactados", Relatório Geral, 6ª Conf. Panamericana de Mecânica dos Solos Vol I, Lima (1979).
33. MELLIOS, G.A. e MONTEIRO, L.B., "Utilização de Cascalhos Argilosos na Construção de Barragens - Parâmetros Geotécnicos", Simp. sobre a Geotecnia da Bacia do Alto-Paraná Vol II.A, pp. 105-118 (1983).

34. MIRANDA, A.N., "Barragens do Semi-árido" Rel. Geral do VII Cong. Bras. de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações Vol. VII, Olinda/Recife, pp. 287-299, (1982).
35. MITCHELL, J.K., "Fundamental of Soil Behavior" J. Wiley and Sons, New York, (1976).
36. MORI, R.T., "Materiais não Convencionais" Rel.Geral do VII Cong. Bras. de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações, Vol. VII, Olinda/Recife, pp. 275-286 (1982).
37. OLSON, R.E. e KIEFER, M.L., "Effect of Lateral Filter - paper Drain on The Triaxial Shear Characteristics of Soils", ASTM-NRC, Sym on Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM SPT 361, pp. 482-491, (1963).
38. PRIMAVESI, A. "Manejo Ecológico dos Solos", A Agricultura em Regiões Tropicais, 6ª Ed, São Paulo - Ed. Nobel, (1984).
39. SCHNAID, F., "Estudo do Comportamento Tensão-Deformação do Solo Coluvionar Compactado da Barragem de Nova Avanhadava" Tese Msc PUC/RJ., 165 p, (1983).
40. SEED, H.B.; MITCHELL, J.K. e CHAN, C.W. "The Strength of Compacted Cohesive Soils", ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder, pp. 877-964, (1960).
41. SHERARD, J.L.; DUNNIGAN, L.P. e DECKER, R.S. "Pinhole Test for Identifying Dispersive Soils", J. of Soil Mecha nics and Foundation Division, ASCE, Vol. 102 Nº GT1, pp 69-85, (1976).
42. TERZAGHI, K. e PECK, R.B., "Soil Mechnics in engeneering Prattice 2<sup>nd</sup> Edition, Ed. El Ateneo S.A., Espanha (1955).

## OUTRAS REFERÊNCIAS

- AVILA, J.P. de, "Trasições Processadas e não Processadas" Simp. sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná, Vol. IA , São Paulo, pp. 83-101, (1983).
- BOWLES, J.E., "Engineering Properties of Soil and Their Measurements", Ed. Mc Graw Hill Book Company, New York, 2<sup>nd</sup> Ed, 213 p, (1970).
- CARVALHO, L H. e ARAÚJO, M.Z.T., "Fundações Aluvionares de Barragens de Terra no Nordeste", Proc. VII Cong. Bras. de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações, Vol VI , Olinda/Recife, pp. 429-444, (1982).
- CASAGRANDE, A. e WILSON, S.D., "Effect of Rate of Loading on the Strength of Clays and Shales at Constant Water Content", Geotechnique, Vol. II Nº 3, pp. 251-263 , (1951).
- CASAGRANDE, A.; HIRSCHFELD, R.C. e POULOS, S.J., " Investigation of Stress Deformation and Strength Characteristics of Compacted Clays Vols I, II, III e IV, Report Nº DA-22-079 - CIVENG - 61-25, Pierce Hall Cambrige, Massachussets, (1963).
- CASTELLO BRANCO, J.F., "Algumas Correlações Gráficas Entre Parâmetros de Solos", Proc. do VI Cong. Bras. de Mecânica dos Solos e Eng. de Fundações (COBRAMSEF) Rio de Janeiro, Vol, 1, pp. 9-24. (1978).
- GIBBS, H.J.; HILF, J.W.; HOLTZ, U.G. e WALKER, F.C., "Shear Strength of Cohesive Soils", ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Boulder Colorado, pp. 33-162, (1960).



- HILF, J.W., "Compacted Fills", Foundation Engeneering Hand  
book Winterkorn e Fang, cap. 7, Ed. Van Mostrand  
(1975).
- KUPPER, A.A.G. e COSTA FILHO, L.M., "O Efeito da Deformabilidad  
de do Sistema nos Resultados de Ensaios de Compres  
são Uni-dimensional" Revista Solos e Rochas, Proc .  
ABMs, Vol. Nº 7, pp. 87-97 (1984).
- LAMBE, T.W., "Stress Path Method", J. of Soil Mechanics and  
Foundation Division, ASCE, Vol. 93 SM6, pp.309-331 ,  
(1967).
- LAMBE, J.K, "Soil Mechanics", J. Wiley and Sons, New York 551  
p. (1968).
- LOWE III, J. e JOHNSON, T.C., "Use of Back Pressure to Increa  
se Degree of Saturation of Triaxial Test Specimens",  
ASCE, Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, Bould  
er Colorado, pp. 1111-1116, (1960).
- MARSAL, R.J. e RESENDIZ, D.N., "Presas de Tierra Y Enrocamien  
to", Ed. Limusas, México (1975).
- MARTINS, M.A. e LOPES, A.S., "Solos Argilosos Aluvionares Uti  
lizados em Aterros de Barragens e seus Aspectos Geo  
técnicos", Proc. do VII Cong. Bras. Mec. dos Solos e  
Engenharia de Fundações Vol. VI, Olinda/Recife, pp.  
352-361, (1982).
- MITCHELL, J.K., "Fundamental Aspects of Tixotropy in Soils",  
J. of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE,  
Vol. 86 Nº SM3 pp. 19-52, (1960).

- NISHIDA, Y e FUTAKI, M., "The correlation Between Physical Properties and Mechanical Properties of Soil Viwing from Site Exploration Data", 6º Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. de Fundações, Rio de Janeiro Vol.1, pp. 229-242, (1978).
- PINTO, C.S. "Resistência do Cisalhamento dos Solos", Escola Politécnica, USP., (1972).
- TAYLOR, D.W., "Fundamentals of Soil Mechanics", J. Wiley and Sons, New York, (1948).
- SILVEIRA, M.A.A.; SANTOS, N.B. dos e KOSKIMA, A. "Estudos da Dispersão de Solos Argilosos Através de Ensaio Químicos e de Dispersão Rápida", Proc. V. Cong. Bras. de Mec. dos Solos e Eng. de Fundações, São Paulo, pp. 157-162, (1974).

## APENDICE A - CORREÇÕES EM ENSAIOS TRIAXIAIS E DE ADENSAMENTO

### A.1. INTRODUÇÃO

Sempre que se executam ensaios de laboratório, incorre-se em diversas fontes de erros que podem afetar a grandeza medida, no nosso caso, a resistência ao cisalhamento do solo. Alguns erros, como os provenientes da utilização de drenos de papel filtro, membranas e atrito do pistão em ensaios triaxiais, foram estudados por diversos pesquisadores como Bishop e Henkel (2) Olson e Kiefer (37) e Duncan e Seed (12).

As correções propostas pelos pesquisadores acima são baseadas em dados estatísticos e empíricos, não sendo, por este motivo precisas; contudo fornecem dados indicativos valiosos acerca das variações dos parâmetros envolvidos e a não consideração das mesmas leva a valores de resistência e pressão neutra maiores que os reais.

Neste trabalho, usando-se as correções propostas pelos autores acima referidos, procurou-se determinar a variação percentual de tensão desviatória devida aos erros citados.

### A.2. CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA DEVIDA AO PAPEL FILTRO

Bishop & Henkel (2), Olson e Kiefer (37) propuseram a seguinte expressão para determinar a parcela de resistência atribuída ao papel filtro, onde:

$$\Delta\sigma_{afp} = -K_{fp} (P/A_s) \quad \text{Eq (A.1)}$$

$\Delta\sigma_{afp}$  - correção da tensão axial para a resistência compressão do papel filtro;

$K_{fp}$  - carga suportada pelo papel filtro que cobre uma unidade de comprimento do perímetro da amostra;

$P$  - perímetro coberto pelo papel filtro

$A_s$  - Área da amostra

Vários valores para  $K_{fp}$  para o papel filtro Whatman's nº 54 foram sugeridos Bishop e Henkel (2) sugeriram  $K_{fp}=0,19 \text{ Kg/cm}$

Duncan e Seed (12) sugeriram  $K_{fp} = 0,13 \text{ Kg/cm}$  e, mais recentemente, Lacerda (24) sugeriu  $K_{fp} = 0,08 \text{ Kg/cm}$ .

Adotando o valor de  $K_{fp} = 0,08 \text{ Kg/cm}$  sugerido por Lacerda (24) obteve-se para a correção da tensão resistida pelo dreno do papel filtro nas deformações de 4 e 12% nos ensaios apresentados no cap.IV, o valor médio de 4,27 e 3,77 , para as deformações de 4 e 12% respectivamente independentemente da forma de ruptura do corpo de prova, das pressões confiantes aplicadas e da resistência do solo segundo demonstraram Bishop e Henkel (2).

### A.3. CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MEMBRANA

Gilbert e Henkel (17) fizeram vários estudos experimentais sobre a carga suportada pelas membranas no ensaio triaxial. Considerando que a membrana se deforma elasticamente, a amostra não muda de forma durante a ruptura, a membrana e o corpo de prova se deformam como um único elemento, a membrana trabalha como uma casca elástica de reforço em torno do corpo de prova.

Baseado nas considerações de Gilbert e Henkel, (17) , Duncan e Seed (12) desenvolveram as seguintes expressões para obter a parcela de tensão axial e lateral suportada pela membrana:

$$\Delta \sigma_{am} = - \frac{2 E_m}{3} \left[ 1 + 2 \epsilon_{at} - \sqrt{\frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_{at}}} \right] \frac{A_{om}}{A_{os} (1 - \epsilon_v)} \quad \text{Eq (A.2)}$$

$$\Delta \sigma_{al} = - \frac{2 E_m}{3} \left[ 2 + \epsilon_{at} - 2 \sqrt{\frac{1 - \epsilon_v}{1 - \epsilon_{at}}} \right] \frac{t_{om}}{r_{os} (1 - \epsilon_v)} \quad \text{Eq (A.3)}$$

onde:

$\Delta \sigma_{am}$  - correção da tensão axial para a resistência da membrana;  
 $\Delta \sigma_{al}$  - correção da tensão lateral para a resistência da membrana

- $E_m$  - módulo de elasticidade da membrana;  
 $A_{OR}$  - área transversal inicial da membrana  
 $A_{OS}$  - área inicial da secção transversal da amostra;  
 $t_{om}$  - espessura inicial da membrana;  
 $r_{os}$  - raio inicial da amostra;  
 $\epsilon_{at}$  - deformação específica axial devida ao adensamento e/ou à deformação não drenada;  
 $\epsilon_v$  - deformação volumétrica específica.

Os corpos de prova ensaiados neste trabalho foram envolvidos por duas ou três membranas de borracha Jontex de espessura igual a 0,06mm. Para obter módulo de Young das membranas ( $E_m$ ), utilizou-se o equipamento indicado por Bishop e Henkel (2) e o procedimento descrito por Lins (29). Através da declividade da reta que se obtém marcando num gráfico os valores de tensão longitudinal média com as deformações específicas verticais no final de cada estágio de carregamento, conforme as figuras A.1 e A.2 determinou-se o valor do módulo de elasticidade da membrana ( $E_m$ ) a partir da média de quatro ensaios ( $E_{m1} = 885$  Kpa,  $E_{m2} = 849$  KPa,  $E_{m3} = 890$  KPa,  $E_{m4} = 934$  KPa) como sendo  $E_m = 890$  KPa.

Os valores das correções devidas a membrana obtidas a partir das equações 2 e 3 estão apresentados na tabela A.1. Os valores obtidos, como se pode observar, são pequenos, podendo ser desprezados na prática, para solos de alta resistência.

#### A.4. CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA DEVIDA AO ATRITO DO PISTÃO

A determinação do atrito dinâmico do pistão de aplicação de carga vertical no ensaio triaxial foi obtida, seguindo o procedimento descrito por Lins (29), para todas as células utilizadas e os valores obtidos encontram-se, na figura A.3 em função da pressão aplicada. Os resultados foram obtidos utili

zando-se uma velocidade de prensa de 0,016mm/min ( velocidade mais baixa utilizada nos ensaios triaxiais). Pesquisou-se, tam**ém**, o atrito denâmico com uma velocidade cerca de 100 vezes maior ( $v = 1.507$  mm/min), encontrando-se valores dentro da mes**ma** faixa como pode ser visto na figura A.3.

O somatório das correções acima está apresentado pa**ra** cada corpo de prova na tabela A.2, para os solos do Açu e Bocaina submetidos aos ensaios tipo  $\overline{CU}$  e UU.

#### A.5. MEDIDA DE DEFORMAÇÃO DA CÉLULA DE ADENSAMENTO

Apesar de se considerar, durante os ensaios de adensa**mento**, que a célula e a própria prensa de aplicação da carga se comportam como corpos rígidos, existem espaços varios entre a prensa e a célula e dentro da célula que são reduzidos quan**do** se aumentam as pressões aplicadas e estas deformações são computadas pelo deflectômetro como se fossem do corpo de prova.

As deformações das prensas e das células de adensamen**to** utilizadas neste trabalho foram determinadas por Ferreira (16) segundo a metodologia por ele descrita e são de, no máxi**mo**, 0,50 mm para a carga 1280kPa, o que representa 2,5% da al**tu**ra do corpo de prova e não causa sensível variação nos parâ**metros** determinados nos ensaios.

Ainda segundo Ferreira, como as deformações da prensa em cada estágio de carregamento foram próximas às deformações ocorridas entre o final de um estágio e o início do outro, con**siderando**-se a leitura inicial de cada estágio como sendo a leitura correspondente ao "do" (deformação inicial) obtida pe**lo** método de Casagrande as deformações da prensa ficarão corri**gidas**.

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU				MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA			
			ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$		ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$	
			$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)
4	ABAIXO DA ÓTIMA	1	- 0,50	- 0,10	- 1,60	- 0,40	- 0,50	- 0,10	- 1,10	- 0,20
		2	- 0,70	- 0,10	- 1,90	- 0,40			- 1,70	- 0,40
		3			- 2,50	- 0,70	- 0,70	- 0,10	- 1,90	- 0,50
		4			- 2,40	- 0,70			-	-
	ÓTIMA	1	- 0,50	- 0,10	- 1,40	- 0,20	- 0,50	- 0,10	- 1,10	- 0,20
		2			- 1,90	- 0,50			- 1,20	- 0,20
		3	- 0,70	- 0,10	- 1,50	- 0,20	- 0,70	- 0,10	- 1,50	- 0,30
		4			- 1,40	- 0,70			- 1,80	- 0,40
	ACIMA DA ÓTIMA	1	- 0,50	- 0,10	- 1,50	- 0,30	- 0,50	- 0,10	- 1,10	- 0,20
		2			- 1,80	- 0,40			- 1,20	- 0,20
		3	- 0,70	- 0,10	- 1,90	- 0,60	- 0,70	- 0,10	- 1,50	- 0,30
		4	-	-	- 1,90	- 0,50	-	-	-	-

TABELA A.1 - CORREÇÕES PARA A RESISTÊNCIA DA MEMBRANA

DEFOR MAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU				MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA			
			ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$		ENSAIO UU		ENSAIO $\overline{CU}$	
			$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{am}$ (KPa)	$\Delta\sigma_{lm}$ (KPa)
12	ABAIXO DA ÓTIMA	1	- 1,30	+ 0,20	- 3,10	- 0,30	- 1,40	+ 0,40	- 2,50	- 0,10
		2	- 2,00	+ 0,40	- 3,40	- 0,40			- 3,10	- 0,40
		3			- 3,90	- 0,70	- 2,00	+ 0,20	- 3,20	- 0,50
		4			- 3,90	- 0,70	-	-	-	-
	ÓTIMA	1	- 1,30	+ 0,20	- 2,70	- 0,10	- 1,40	+ 0,40	- 2,50	- 0,10
		2			- 3,30	- 0,40			- 2,80	- 0,10
		3	- 2,00	+ 0,40	- 2,70	- 0,10	- 2,00	+ 0,20	- 2,80	- 0,20
		4			- 3,40	- 0,60	-	-	- 3,20	- 0,40
	ACIMA DA ÓTIMA	1	- 1,30	+ 0,20	- 2,90	- 0,20	- 1,40	+ 0,40	- 2,60	- 0,10
		2			- 3,30	- 0,40			- 2,70	- 0,10
		3	- 2,00	+ 0,40	- 3,50	- 0,50	- 2,00	+ 0,20	- 2,80	- 0,20
		4	-	-	- 3,50	- 0,50	-	-	-	-

TABELA Ala - CORREÇÕES PARA A RESISTÊNCIA DA MEMBRANA



DEFORMAÇÃO $\epsilon_a$ (%)	UMIDADE	CORPO DE PROVA	MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU		MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA	
			ENSAIO UU	ENSAIO $\overline{CU}$	ENSAIO UU	ENSAIO $\overline{CU}$
			$\Delta\sigma_a$ (kPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)
4	ABAIXO DA ÓTIMA	1	7,67	8,77	7,67	8,27
		2	22,57	14,97	13,57	14,77
		3	31,47	24,37	31,47	32,67
		4	37,32	39,02	-	-
	ÓTIMA	1	7,67	8,57	4,77	8,27
		2	13,57	19,37	13,57	14,27
		3	31,47	35,2	32,27	23,37
		4	37,32	38,02	-	32,57
	ACIMA DA ÓTIMA	1	7,67	8,67	7,67	8,27
		2	13,57	14,87	13,57	14,27
		3	37,32	23,77	31,47	32,27
		4	-	38,52	-	-

TABELA A.2 - SOMATÓRIO DAS CORREÇÕES DOS ENSAIOS TRIAXIAIS

DEFORMAÇÃO $\epsilon_a(\%)$	UMIDADE	CORPO DE PROVA	MATERIAL DA BARRAGEM DO AÇU		MATERIAL DA BARRAGEM DE BOCAINA	
			ENSAIO UU	ENSAIO CŪ	ENSAIO UU	ENSAIO CŪ
			$\Delta\sigma_a$ (KPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)	$\Delta\sigma_a$ (KPa)
12	ABAIXO DA ÓTIMA	1	7,97	9,77	8,07	9,17
		2	22,37	15,97	13,97	15,67
		3	32,27	25,27	32,27	33,47
		4	38,12	40,02	-	-
	ÓTIMA	1	7,97	9,37	5,17	9,17
		2	13,87	20,27	13,97	15,37
		3	32,27	35,90	32,27	24,17
		4	38,12	39,52	-	33,47
	ACIMA DA ÓTIMA	1	7,97	9,57	8,07	9,27
		2	13,87	15,87	13,97	15,27
		3	38,12	24,87	32,27	33,07
		4	-	39,62	-	-

TABELA A.2a - SOMATÓRIO DAS CORREÇÕES DOS ENSAIOS TRIAXIAIS

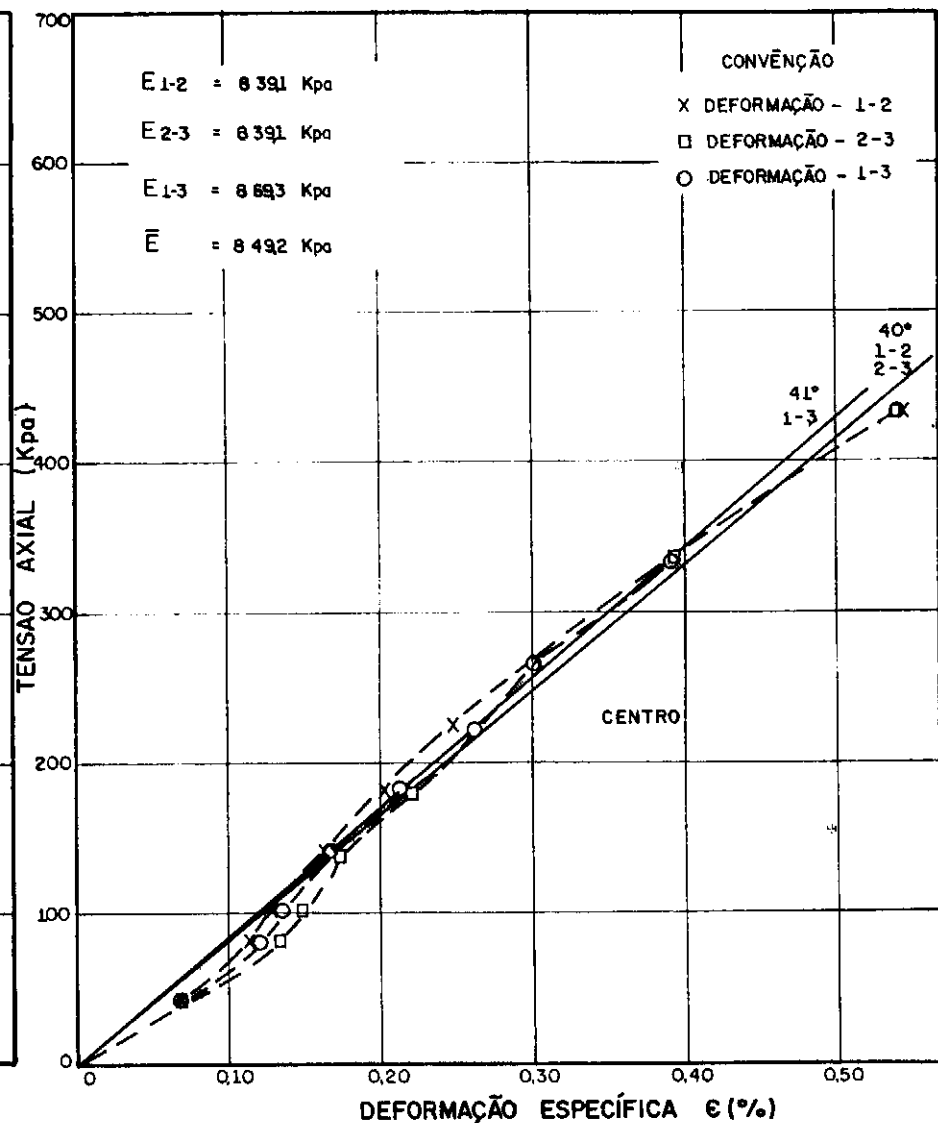
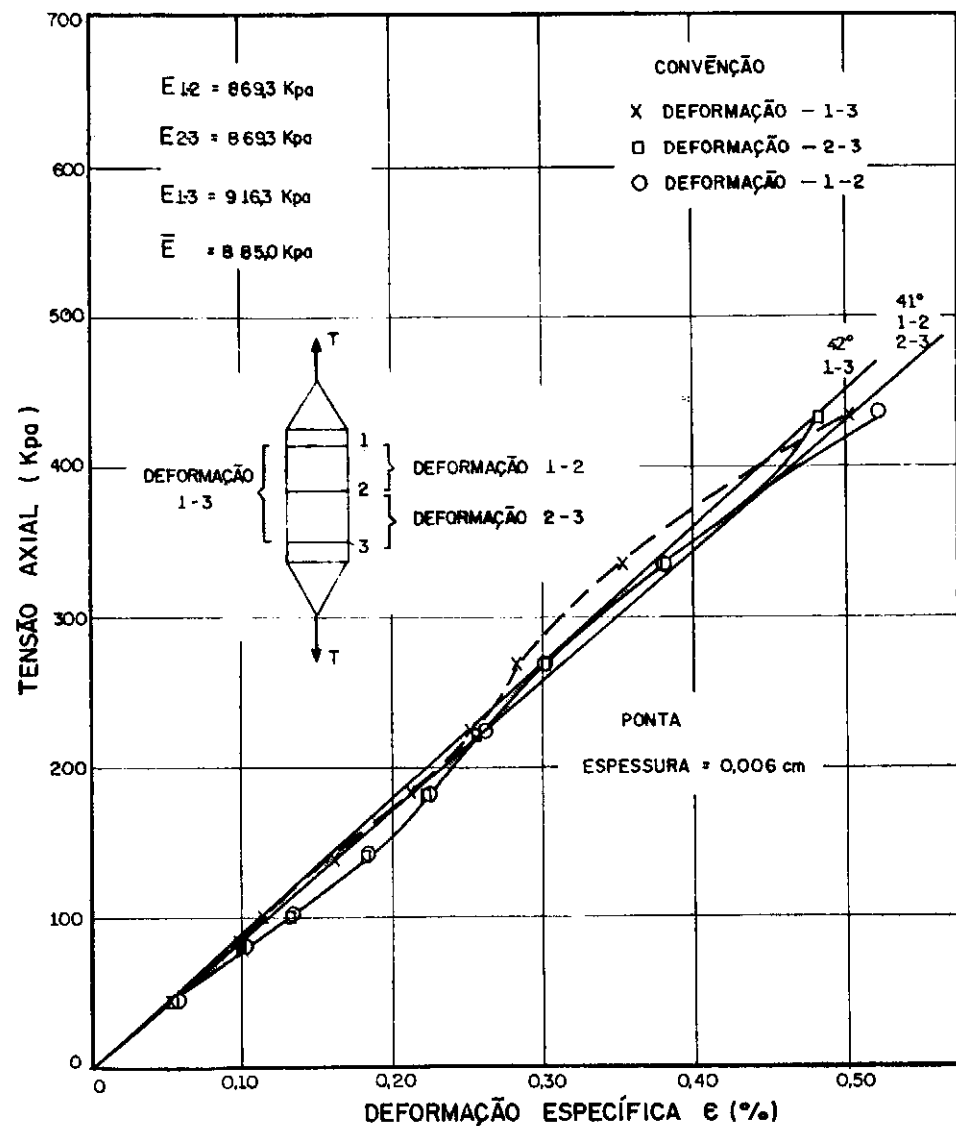


FIG. A.1 - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MEMBRANA.

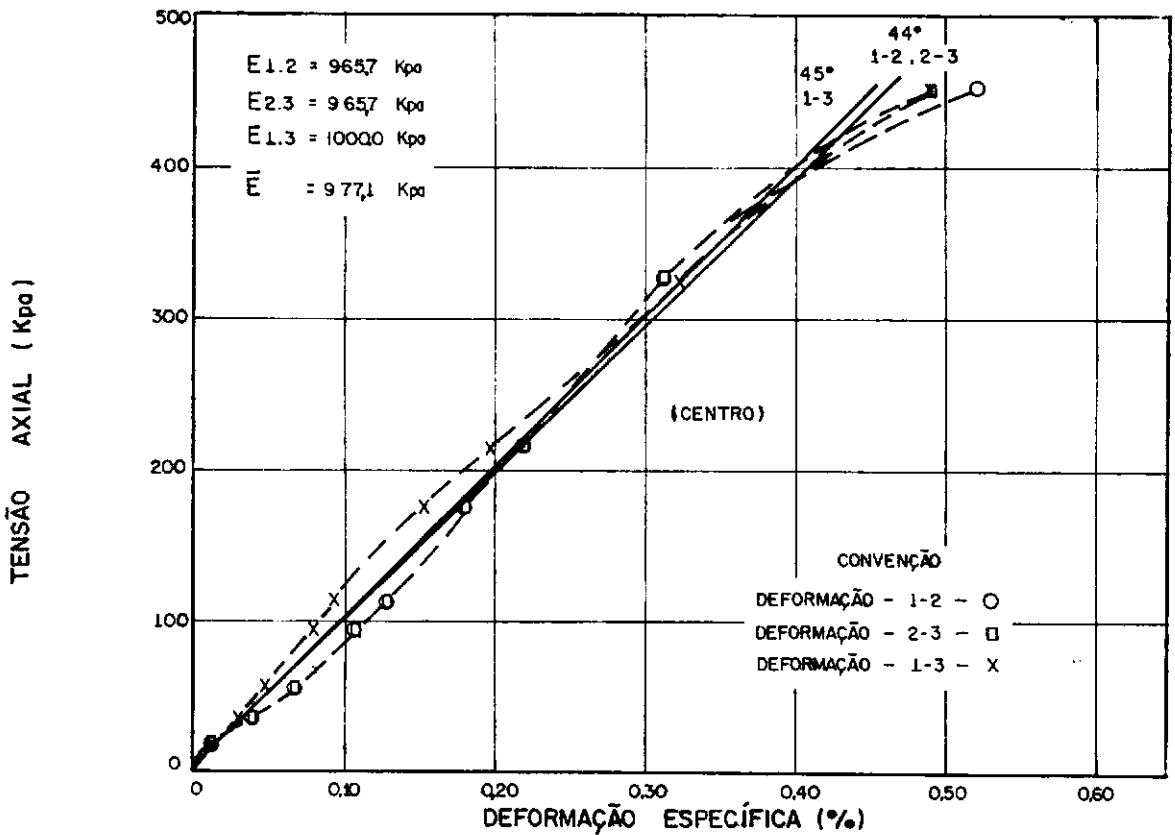
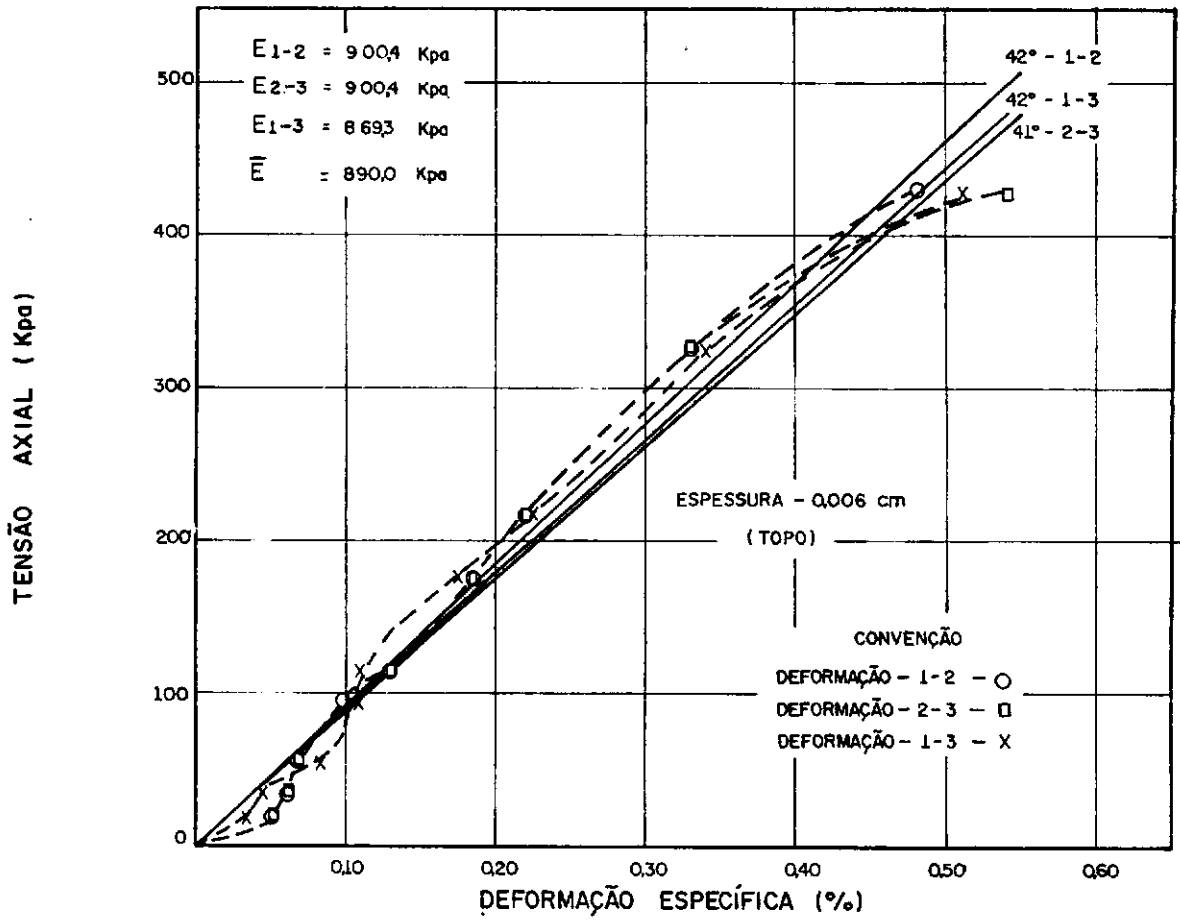


FIG. A.2 - DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DA MEMBRANA

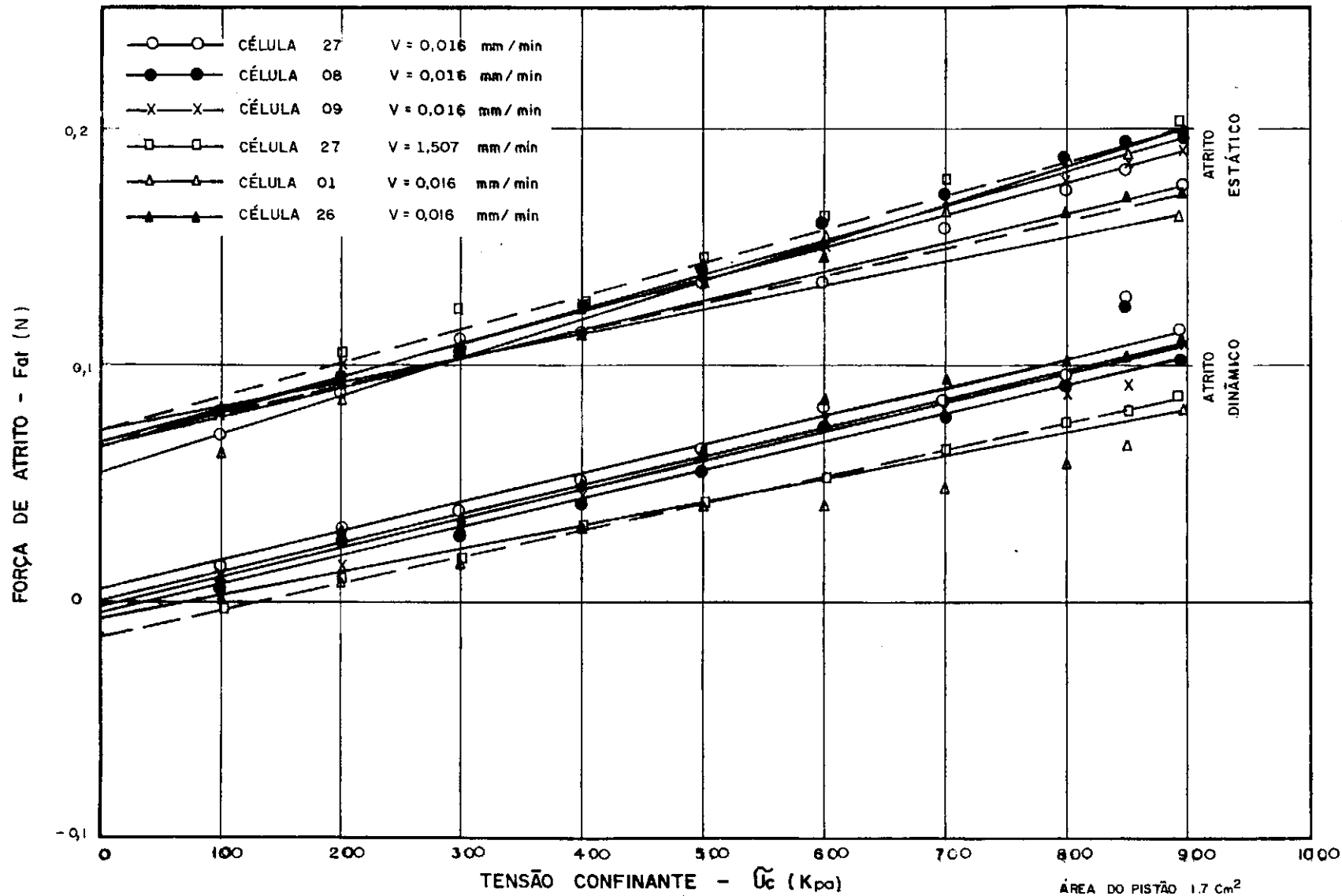


FIG. A.3 - ATRITO ESTÁTICO E DINÂMICO NO PISTÃO DO ENSAIO TRIAXIAL.

## APENDICE B - FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA

### B.1. INTRODUÇÃO

Com o uso cada vez mais freqüente dos métodos computacionais na solução de problemas de análise de tensões e movimentos de maciços de terra em barragens de terra, taludes de aterros, escavações, interação solo-estrutura, pesquisaram-se novas maneiras de se representar o comportamento inelástico não linear do solo através de relações tensão-deformação que possibilitassem uma fácil utilização nas análises.

As relações tensão-deformação dos solos podem ser representadas de suas formas: a forma tabular e a forma funcional. Na primeira, a curva tensão-deformação é representada por pares de valores indicando a tensão e a deformação em cada ponto da curva, sendo, neste caso, o módulo de Young,  $E$ , e o coeficiente de Poisson,  $\nu$  determinados através de interpolações numéricas. Na forma funcional, a curva tensão-deformação é representada por uma função matemática e os parâmetros do solo são obtidos por derivação da função contínua.

### VI.2. OBTENÇÃO DOS MÓDULOS DE DEFORMAÇÃO ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS

Kondner e seus colaboradores demonstraram que as curvas tensão-deformação não lineares dos solos podem ser aproximadas com boa precisão por uma hipérbole, representada pela equação:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_a}{a + b \frac{\epsilon}{a}} \quad \text{Eq (B.1)}$$

onde:

$a$  e  $b$  - são constantes que representam, respectivamente, o inverso do módulo tangente inicial  $E_i$  e o valor assintótico da tensão desviatória  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ , como mos

tra a figura B.1A. Plotando-se os dados de tensão deformação em eixos transformados, como na figura B.1B, a e b serão, respectivamente, o intercepto e a declividade da reta traçada pelos pontos escolhidos. Segundo Duncan Chang(13), há uma boa aproximação, na prática, quando são plotados apenas os valores correspondentes a 70 e 95% da resistência máxima.

Como o valor assintótico da tensão desviatória  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$  é inferior ao valor da tensão desviatória na ruptura  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ , relacionam-se os dois valores pelo fator Rf, sendo:

$$Rf = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}} \quad \text{Eq (B.2)}$$

Rf, segundo Kondner, varia para diferentes tipos de solos geralmente entre 0,75 e 1.00, e independe das tensões confinantes.

A Eq B.1 fica então:

$$\sigma_d = (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon}{\frac{1}{E_i} + \frac{\epsilon Rf}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}} \quad \text{Eq (B.3)}$$

Como para qualquer tipo de solo, exceto quando o mesmo é ensaiado sob condições não adensadas não drenadas (UU), o módulo tangente inicial e a tensão desviatória na ruptura variam com as tensões confinantes efetivas aplicadas no início do ensaio, Jambu (21), baseado em dados experimentais, propôs que a variação de  $E_i$  com  $\sigma_v$  pode ser expressa por:

$$E_i = K Pa \left( \frac{\sigma_v}{Pa} \right)^N \quad \text{Eq (B.4)}$$

onde:

K - módulo numérico;

N - expoente que exprime a variação de  $E_i$  com  $\sigma_v$ ;

$P_a$  - pressão atmosférica, utilizada para tornar a equação dimensionalmente correta;

$\sigma_v$  - pressão confinante efetiva. Em ensaios adensados isotropicamente  $\sigma_v = \sigma_1 = \sigma_3$

A determinação dos parâmetros  $K$  e  $N$  pode ser feita plotando-se os valores de  $E_1/P_a$  versus  $\sigma_v/P_a$  em escala logxlog e interpolando-se, pelos pontos plotados, uma reta conforme a fig. B2,  $K$  é o valor de  $E_1$  para  $\sigma_v = P_a$  e  $N$  é a declividade da reta.

Considerando-se que a tensão principal menor ( $\sigma_3$ ) permanece constante durante o ensaio, o módulo tangente,  $E_t$ , pode ser determinado para qualquer ponto da curva tensão-deformação pela equação:

$$E_t = \frac{\partial (\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon} \quad \text{Eq. B.5}$$

Segundo Mohr

$$\sigma_{df} = \frac{2c \cos \phi + 2 \sigma_3 \sin \phi}{\sigma_1 - \sin \phi} \quad \text{Eq. B.6}$$

sendo:

$c$  - coesão;

$\phi$  - ângulo de atrito

Aplicando-se a formulação de Kondner à Eq B.5, obtém-se:

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2 \sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^N \quad \text{Eq.3}$$

$K$ ,  $N$  e  $R_f$  são - coeficientes empíricos que representam o comportamento do solo sob determinadas condições, dependendo do OCR e das condições de drenagem. Desse modo, valores representati

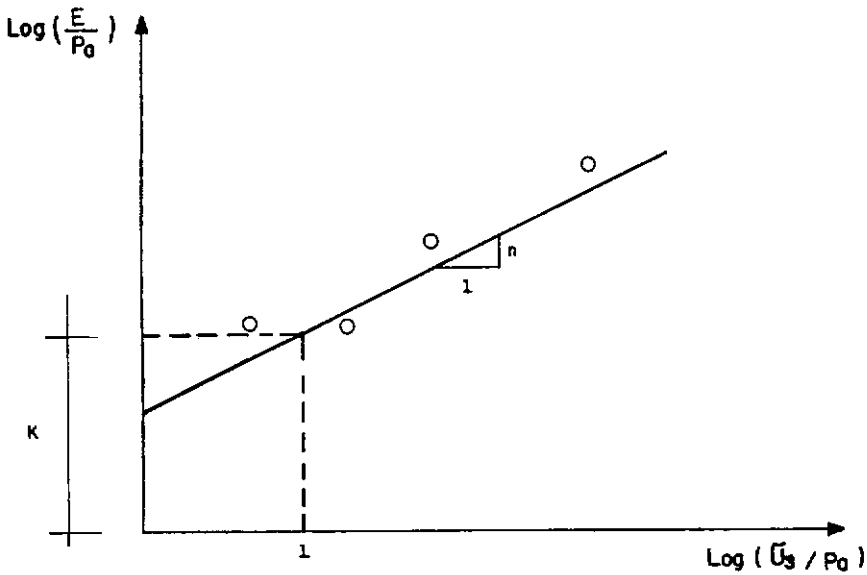
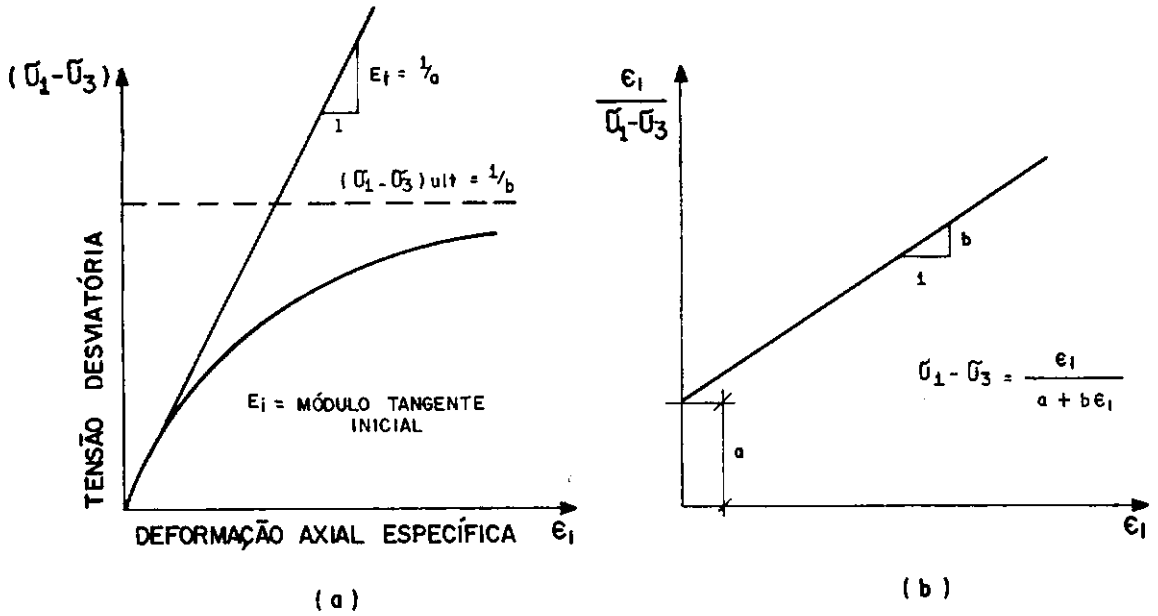


vos do comportamento do solo só serão obtidos utilizando-se parâmetros de ensaios que representem as condições de campo.

Com relação ao coeficiente de Poisson, ( $\nu$ ) Duncan e Wong (13) apresentaram uma formulação a partir de Kulhawy e outros (23), onde a determinação de  $\nu_i$  é análoga a de  $E_i$ , como mostra a figura B.3.  $\nu_i$  é então correlacionado com  $\sigma_3$  de acordo com a equação abaixo.

$$\nu_i = G - F \log \sigma_3/p_a \quad \text{Eq. (B.8)}$$

Para solos saturados cisalhados sob condições não drenadas  $\nu_i = 0,50$  para qualquer sequência de carregamento e nível de tensões, porque não há variação de volume, segundo Duncan e Wong (13), para a maioria dos solos saturados,  $\nu_i$  cresce com a pressão confinante, conforme a figura B.4.



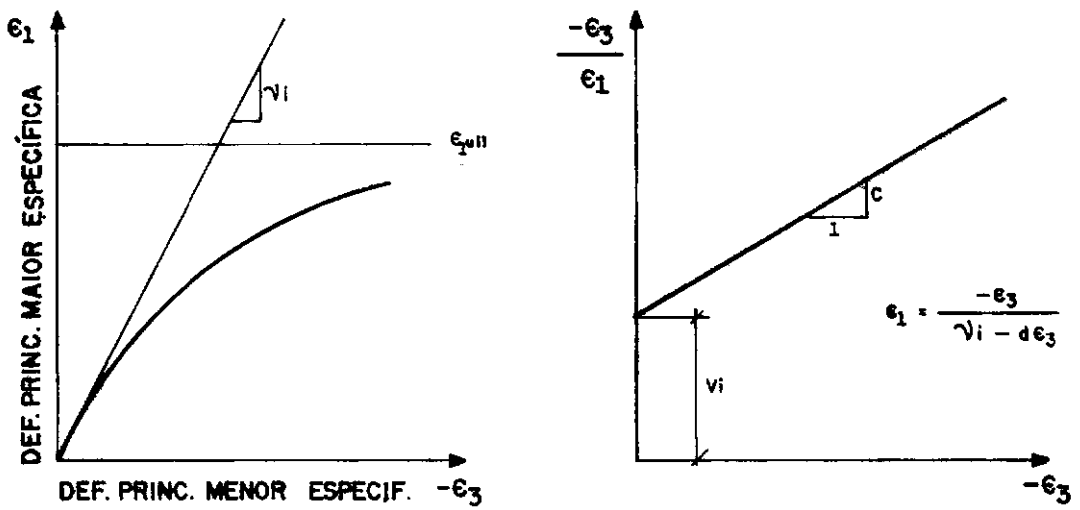


FIG. B3 — DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE POISSON PELO MODELO DE DUCAN E WONG (1974).

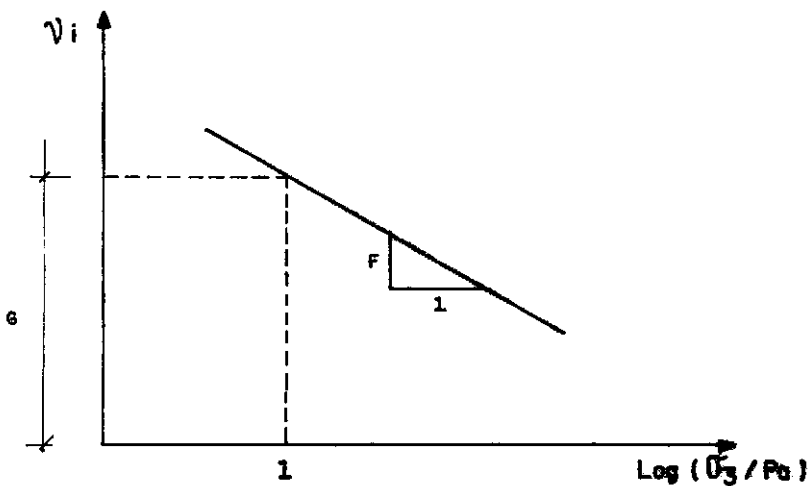


FIG. B4 — VARIAÇÃO DE  $\gamma_i$  COM  $\bar{\sigma}_3$ .