

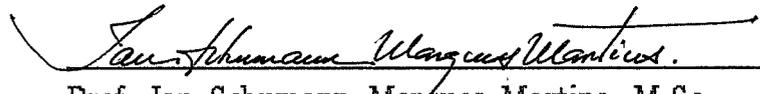
ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO COM
TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA
RELACIONADA AO TEMPO NA ARGILA DO SARAPUÍ

Sérgio Roberto Ladeira Carvalho

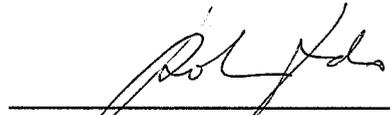
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

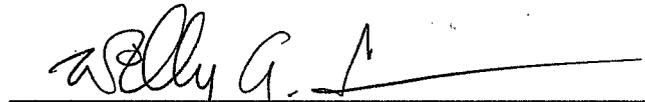
Aprovada por:


Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.
(PRESIDENTE)


Prof. Ian Schumann Marques Martins, M.Sc.


Prof. Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, Ph.D.


Prof. Roberto F. de Azevedo, Ph.D.


Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D.

CARVALHO, SÉRGIO ROBERTO LADEIRA

Ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí [Rio de Janeiro] 1989.

XVI, 224 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1989).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Ensaio de adensamento II.COPPE-UFRJ Título
(série).

As críticas acrimoniosas e mordazes de Erasmo à sociedade em geral obrigam-nos a uma profunda reflexão sobre o valor de nossas ações e nos fazem ver que a intenção de praticar a humildade deve transmutar-se em gesto conseqüente. Eis aqui trechos da sua catilinária:

[...] Rasguemos esse véu de orgulho e presunção, e vejamos o que são os filósofos. Não passam de ridículos loucos. Quem poderá conter o riso ao ouvi-los sustentar seriamente a infinidade dos mundos? O sol, a lua, as estrelas, todos esses globos são por eles conhecidos tão bem como se os tivessem medido palmo a palmo ou com um fio. Sem duvidar de nada eles vos dizem a causa do trovão, dos ventos, dos eclipses e de todos os outros mistérios físicos. Na verdade, ao ouvi-los falar com tanta convicção, qualquer os julgaria membros do conselho dos deuses ou testemunhas oculares da natureza quando tudo saiu do nada. Mas, a despeito disso, a natureza, essa hábil produtora do universo, parece zombar das suas conjecturas. Basta com efeito, refletir-se sobre a estranha diversidade dos seus sistemas, para se dever confessar que eles não têm nenhuma idéia segura, pois que, enquanto se gabam de saber tudo, não estão de acordo em nada. Os filósofos nem ao menos se conhecem, porquanto, ao tentarem elevar-se às mais sublimes especulações, caem num buraco com que não contavam e quebram a cabeça contra uma pedra[...]

Em nenhuma outra ciência se despreza tanto o vulgo profano como nas matemáticas, que consistem em triângulos, quadrados, círculos e outras figuras geométricas semelhantes, que se sobrepõem umas às outras, confundindo tudo como num labirinto. Por fim, atordoam os idiotas com diversas letras dispostas como um exército em ordem de batalha e subdivididas em várias companhias. (Erasmo de Rotterdam, 1536, in Elogio da loucura, tradução de Paulo M. Oliveira, Nova Cultural, Coleção: Os pensadores).

AGRADECIMENTOS

Para um adventficio nesta cidade do Rio de Janeiro, não tivera eu uma única lembrança positiva da parte puramente técnica deste trabalho, bastar-me-ia a recompensa de poder evocar seu mérito de fautor da oportunidade de que se dessem os inumeráveis gestos de atenção e solidariedade com que fui distinguido.

Considero temerário, por força de seu grande número, nomear aqueles a quem devo uma palavra de gratidão. Ainda assim, ousou empreender esta tarefa; move-me, neste momento, não a necessidade de aparentar hábitos morigerados, mas a convicção de estar externando o que é vero.

Do professor Márcio Almeida devo salientar o empenho e o entusiasmo devotados à causa deste tema de tese. Acresço, ainda, a orientação segura e o espírito solidário, que foram essenciais à consecução dos objetivos propostos.

Ao professor Ian Schumann, a cujo exemplo de dedicação ao trabalho científico sempre recorri para me imbuir do indispensável *animus pugnandi*, manifesto o meu mais vivo reconhecimento pela valiosa contribuição prestada.

Do programa FIPPEC—Banco do Brasil devo encarecer o apoio financeiro que fomentou esta pesquisa.

Aos professores Willy Lacerda, Roberto Azevedo e Paulo Santa Maria dirijo-me para agradecer a solicitude com que se dispuseram a participar da banca examinadora da tese.

Da CAPES assinalo o prestimoso auxílio financeiro.

À minha família estou grato pela compreensão neste período.

Aos amigos, particularmente os de Juiz de Fora, de cujo convívio me apartei, asseguro que sempre vi na famigerada pergunta—quando a tese vai terminar?—, não o látego do algoz, mas o incontido desejo de que eu tivesse êxito.

Volvendo minha atenção para todas as pessoas que integraram o

laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ no período deste trabalho (técnicos, engenheiros, professores, funcionários administrativos e estagiários), é imperioso consignar nesta página o agradecimento pelo apoio e pela cooperação recebida. Especialmente, devo me referir à lealdade e à dedicação do Sérgio Iório e do Álvaro Dellê Viana, companheiros das horas amargas e jubilosas vividas.

Fica aqui, também, uma menção *post-mortem* ao Sr. Roberto, de nós separado pela nefanda brutalidade da nossa vida quotidiana.

Na parte referente à Informática, estou em débito com o Eliézio Batista de Oliveira, cuja inaudita capacidade de resolver questões difíceis foi decisiva em várias etapas desta pesquisa.

Registro, também, o esmero com que se houve o Brugger nas fotografias.

Do Gilmar, desenhista emérito, cuja paciência sabidamente inesgotável eu desafiei em muitos momentos, fica aqui exaltado o valor da sua laboração.

Ao Pierre e ao Eduardo Paiva agradeço a atenção recebida nas inúmeras vezes em que os consultei sobre problemas computacionais.

Aos colegas Emídio N.S.Lira, Paulo Sérgio de Almeida Barbosa, Renato Cunha e Marco Antônio Durães reitero minha sincera gratidão pelas incomensuráveis contribuições e pelo incentivo.

Ao professor Roberto F. Oliveira agradeço a oportuna e proffcua ajuda prestada.

Aos alunos que ingressaram recentemente no laboratório dedico o meu aplauso pelo sentimento de solidariedade com que me trataram.

Por fim, com perdão dos que gostariam de ver-me conduzir *sine ira et studio*, externo minha gratidão aos que se omitiram, por me ensinarem quão imperfeitos somos todos nós e aos que se mantiveram indiferentes, por me mostrarem com limpidez o caminho de como não se deve proceder.

Resumo da tese apresentada à COPPE-UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO COM TAXA CONSTANTE
DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO
NA ARGILA DO SARAPUÍ

SÉRGIO ROBERTO LADEIRA CARVALHO

Agosto de 1989

Orientador: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida
Programa: Engenharia Civil

Inicialmente, apresenta-se neste trabalho uma revisão bibliográfica de temas relativos a procedimentos utilizados no ensaio de adensamento edométrico convencional. Comparam-se, também, os resultados deste tipo de experimento com os advindos dos ensaios realizados no aparelho TRICON.

A seguir, são revistos os ensaios com carregamento continuamente crescente com o tempo, dando-se especial relevo ao caso em que a taxa de deformação específica relacionada ao tempo é mantida constante.

Faz-se, ainda, uma descrição do equipamento, do sistema automático de aquisição e processamento de dados e do procedimento de que se valeu para executar os ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo. Ressalta-se, em particular, o método proposto para a determinação da velocidade de ensaio. Finalmente, cotejam-se os resultados destes experimentos com os dos convencionais.

Abstract of Thesis presented to COPPE-UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

CONSTANT RATE OF STRAIN CONSOLIDATION TESTS
ON SARAPUÍ CLAY

SÉRGIO ROBERTO LADEIRA CARVALHO

August, 1989

Thesis Supervisor: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida.
Department: Civil Engineering.

This work initiates with a review of some important issues related to oedometer consolidation test procedures. In addition, a comparison of conventional test with TRICON consolidation tests is also presented.

Monotonic increasing with time loading consolidation tests are subsequently reviewed with especial attention to the type whose rate of strain remains constant.

Equipment, automated data acquisition system and procedures used to perform constant rate of strain consolidation tests are also described. Particular emphasis is given to a proposed method to define the velocity to be used in these tests.

Finally, the results of constant rate of strain consolidation tests are compared to conventional consolidation tests one's.

ÍNDICE.

	pág.
CAPÍTULO I—INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO II—ENSAIOS CONVENCIONAIS DE	
ADENSAMENTO EDOMÉTRICO.....	05
II.1—Introdução.....	05
II.2—A Teoria de adensamento de	
Terzaghi e Fröhlich.....	06
II.2.1—A formulação matemática....	06
II.2.2—Comentários gerais.....	09
II.3—Procedimentos do ensaio de	
adensamento convencional.....	10
II.3.1—Método de aplicação de	
carga.....	11
II.3.2—Efeitos da amostragem.....	19
II.3.3—Efeitos do atrito entre a	
parede interna do anel e a amostra	21
II.3.4—Parâmetros do ensaio de	
adensamento convencional.....	23
II.4—Avaliação crítica do ensaio	
de adensamento convencional.....	25
II.5—Ensaio de adensamento	
edométrico no equipamento TRICON..	26
II.5.1—Introdução.....	26
II.5.2—Descrição do equipamento para	
ensaio de adensamento edométrico.	27
II.5.2.1—Câmara do sistema ar-água	27
II.5.2.2—Câmara de ensaio.....	30
II.5.2.3—Célula de adensamento....	30
II.5.2.4—Sistema de transmissão	
de força.....	30
II.5.2.5—Sistema de medição de	
deslocamentos.....	31

II.5.3—Aspectos gerais do equipamento TRICON (ensaios de adensamento edométrico).....	31
II.5.4—Ensaio de adensamento edométrico no aparelho TRICON.....	33
II.5.4.1—Introdução.....	33
II.5.4.2—Descrição dos materiais ensaiados.....	33
II.5.4.3—Procedimentos de ensaio..	39
II.6—Apresentação dos resultados obtidos nos ensaios edométricos no TRICON e no equipamento convencional.....	42
II.7—Discussão dos resultados.....	42
II.7.1—Ensaio na argila do aterro sanitário do Caju.....	42
II.7.2—Ensaio na argila do Sarapuí.....	43
II.8—Análise crítica do TRICON, no que se refere a ensaios de adensamento edométrico.....	54

CAPÍTULO III—ENSAIOS ESPECIAIS DE ADENSAMENTO

UNIDIMENSIONAL.....	56
III.1—Introdução.....	56
III.2—Princípios gerais dos ensaios de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo..	57
III.3—Ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo.....	59
III.3.1—A interpretação do ensaio.	59
III.3.2—O cálculo de parâmetros...	59
III.3.3—Comentários sobre o desempenho do ensaio.....	60

III.4—Ensaio de adensamento com gradiente controlado.....	60
III.4.1—Considerações gerais.....	60
III.4.2—A concepção teórica do ensaio.....	61
III.4.3—Comentários sobre o desempenho do ensaio.....	63
III.5—Ensaio com velocidade de carregamento constante.....	64
III.5.1—Considerações gerais.....	64
III.5.2—A concepção teórica.....	64
III.5.3—Comentários sobre o ensaio	65
III.6—Ensaio de adensamento com fluxo restringido.....	65
III.6.1—Considerações gerais.....	65
III.6.2—A concepção teórica do ensaio.....	66
III.6.3—Comentários sobre o desempenho do ensaio.....	67
III.7—Ensaio de adensamento com carregamento contínuo.....	68
III.7.1—Considerações gerais.....	69
III.7.2—A concepção teórica.....	69
III.7.3—Comentários sobre o desempenho do ensaio.....	72
III.8—Comentários finais.....	72

CAPÍTULO IV—ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO
COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO
ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.. 73

IV.1—Introdução.....	73
IV.2—Revisão bibliográfica.....	73
IV.3—Análise teórica do ensaio através do método de WISSA et alii (1971).....	87
IV.3.1—Regime permanente.....	89

IV.3.1.1—Cálculo de c_v e k no regime permanente.....	89
IV.3.2—Regime transiente.....	93
IV.4—Comentários gerais sobre o método de WISSA et alii (1971)....	93
IV.5—Critérios para determinação da velocidade de ensaio.....	95
IV.5.1—O critério de SMITH e WAHLS (1969).....	96
IV.5.2—O critério de WISSA et alii (1971).....	96
IV.5.3—O critério de GORMAN et alii (1978).....	97
IV.5.4—O critério da ASTM.....	97
IV.5.5—O critério utilizado na Suécia.....	98
IV.5.6—O critério do Instituto de Geotecnia da Noruega (N.G.I.).....	100
IV.5.7—O critério de ARMOUR e DRNEVICH.....	100
IV.5.8—O critério utilizado neste trabalho.....	102
IV.5.8.1—Considerações gerais.....	102
IV.5.8.2—Ensaio de adensamento convencional e com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ em corpos-de-prova de mesma altura H e somente uma face drenante.....	103
IV.5.8.3—Ensaio de adensamento convencional com duas faces drenantes e ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ em corpos-de-prova com a mesma altura H	105

CAPÍTULO V—METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.....	107
V.1—Descrição do equipamento.....	107

V.1.1—Câmara de ensaio.....	109
V.1.2—Célula de adensamento.....	111
V.1.3—Instrumentação.....	113
V.1.3.1—Transdutor de força.....	113
V.1.3.2—Transdutor de pressão.....	113
V.1.3.3—Transdutor de deslocamento	114
V.1.3.4—Transdutor de volume.....	115
V.1.3.5—Extensômetro mecânico.....	115
V.2—A aquisição e o processamento de dados.....	115
V.2.1—Introdução.....	115
V.2.2—Os aparelhos eletrônicos....	115
V.2.3—A bancada do sistema auto- mático de aquisição de dados.....	117
O programa para aquisição de dados.....	118
Os programas para processamento de dados.....	119
V.2.6—Comentários finais.....	119
V.3—Ensaio preliminares.....	120
V.3.1—O material ensaiado.....	120
V.3.2—O procedimento inicial.....	120
V.3.2.1—A contrapressão.....	121
V.3.2.2—O assentamento do pistão sobre a placa de topo.....	121
V.3.2.3—A perda de contacto do pis- tão com a viga superior da prensa.	124
V.3.2.4—A saturação da pedra porosa da base.....	125
V.3.2.5—A saturação do transdutor de pressão da base.....	126
V.3.2.6—O diafragma rolante de borracha.....	126
V.3.2.7—O anel de adensamento.....	126
V.3.2.8—O assentamento da pedra porosa de topo no corpo-de-prova..	127

V.3.2.9—A saturação da célula de adensamento.....	128
V.4—Procedimento definitivo.....	128
V.5—Programa de ensaios convencionais de adensamento edométrico para fins comparativos.....	133
V.6—Comentários finais.....	134

CAPÍTULO VI—APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.....

VI.1—Introdução.....	135
VI.2—A velocidade dos experimentos	136
VI.2.1—Comparação das velocidades obtidas pelos métodos mencionados no item (IV.5).....	140
VI.3—A razão u_b/σ_v	147
VI.4—A comparação da deformação específica volumétrica com a axial	151
VI.5—As curvas deformação específica vertical—tensão efetiva (esc.log.)	153
VI.6—As curvas índice de vazios—tensão efetiva (esc.log.).....	160
VI.7—As curvas v —(esc.log.)— σ_v (esc.log.).....	164
VI.8—Tensões de sobreadensamento..	167
VI.9—As curvas $u_b-\sigma_v$ (esc.log.)...	167
VI.10—O coeficiente de adensamento	172
VI.11—Comentários finais.....	177

CAPÍTULO VII—CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TEMAS

PARA FUTURAS PESQUISAS.....	178
VII.1—Introdução.....	178

VII.2—Conclusões relativas ao ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo.....	178
VII.3—Conclusões concernentes aos ensaios de adensamento edométrico realizados no TRICON.....	180
VII.4—Propostas de temas para futuras pesquisas.....	180
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182
APÊNDICE A.1.....	191
A.1.1—Demonstração da equação (IV.4).....	191
A.1.2—Erro relativo no cômputo de ϵ_v	198
APÊNDICE A.2.....	200
A.2.1—Programa PROCS.....	200
A.2.1—Programa "CRSC".....	212
APÊNDICE A.3—CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO.....	222

RELAÇÃO DOS SÍMBOLOS UTILIZADOS NESTE TRABALHO.

- $r = \dot{\epsilon}_v$ = taxa de deformação específica relacionada ao tempo
 u = sobrepressão hidrostática.
 u_b = sobrepressão hidrostática medida na base.
 σ'_{vm} = tensão de sobreadensamento.
 ϵ_v = deformação específica vertical.
 δ = função deslocamento.
 $\dot{\delta} = \frac{d\delta}{dt}$ = velocidade.
 t = tempo.
 c_v = coeficiente de adensamento.
 z = variável espacial que indica a distância da fronteira drenante.
 U_z = grau de adensamento.
 u_o = sobrepressão hidrostática inicial.
 T_v = fator-tempo.
 H_d = altura máxima de drenagem.
 H = altura inicial do corpo-de-prova.
 \bar{U} = grau de adensamento médio.
 $\Delta\sigma$ = variação da tensão total.
 σ_i = tensão total do estágio anterior.
 σ'_{o} = tensão efetiva de campo.
 σ'_v = tensão efetiva.
 σ'_c = tensão crítica.
 e = índice de vazios.
 φ = razão entre a tensão total real média e a tensão aplicada.
 F = força de atrito.
 M = módulo edométrico.
 $\Delta\sigma'_v$ = variação da tensão efetiva.
 m_v = coeficiente de compressibilidade volumétrica.
 Δe = variação do índice de vazios.
 a_v = coeficiente de compressibilidade.
 C_c = índice de compressão.
 C_r = índice de recompressão.
 CR = razão de compressão.
 RR = razão de recompressão.
 D/H = relação entre o diâmetro do anel de adensamento e sua altura.

d_{\max} = máximo deslocamento medido pelo extensômetro.

\bar{u} = sobrepressão hidrostática média.

$\lambda = \frac{du_b/dt}{d\sigma_v/dt}$ = razão entre as derivadas, em relação ao tempo, da sobrepressão hidrostática na base e da tensão total.

γ_a = peso específico da água.

k = coeficiente de permeabilidade.

$v = 1 + e$ = volume específico.

h = teor de umidade natural.

IL = índice de liquidez.

CAPÍTULO I.

INTRODUÇÃO.

I.1- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.

Os dias atuais estão indelevelmente marcados por uma revolução tecnológica cuja quintessência é a Cibernética. Seu suporte mais visível, a Informática, associou-se diretamente ao trabalho do dia-a-dia dos diversos setores da atividade humana, alcançando posição de relevo, especialmente, naqueles ligados à produção científica.

Não obstante o caráter incontrastável da afirmação de que o processamento racional de informações possibilitou um avanço significativo das ciências em geral, impõe-se, principalmente no caso da Mecânica dos Solos, uma adversão ditada pelo cultivo da virtude da prudência: a preponderância que deve existir do discernimento do engenheiro sobre o arsenal de recursos colocados ao seu dispor pela Informática.

PECK (1981) já chamara a atenção para a relevância do ato de julgar tecnicamente, remetendo-o à condição de atributo inalienável e essencial para o bom exercício da Engenharia. Tal admoestação revela-se de comperto bom senso num momento em que é preciso manter o equilíbrio entre a absorção indiscriminada das novidades e o uso consciente do potencial por elas oferecido.

É nesse contexto que o autor do presente trabalho insere a adoção dos sistemas automáticos de aquisição e processamento de dados nos ensaios de Geotecnia. Há que perseguir o objetivo de acompanhar *pari passu* o processo evolutivo dessa técnica, já consolidada nos países desenvolvidos, mas com a visão clara de que sua utilização não torna prescindível a capacidade de discernir, inerente àqueles que almejam ser bons profissionais.

I.2- ESCOPO DO TRABALHO.

Considerando a importância crescente que vêm assumindo no exterior os ensaios de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, é de real interesse dominar a tecnologia de sua execução, adaptando-a às particularidades dos solos brasileiros.

Em vista dessa situação, decidiu-se desenvolver o presente trabalho, cuja proposta pode ser desdobrada da seguinte forma:

- a) Elaborar um sistema automático de aquisição e processamento de dados;
- b) Estabelecer um procedimento de ensaio condizente com as peculiaridades da argila do Sarapuí;
- c) Comparar os resultados obtidos na nova modalidade de experimento com os do ensaio de adensamento edométrico convencional.

Secundariamente, buscou-se também investigar a exeqüibilidade do uso de uma alternativa à prensa do ensaio de adensamento edométrico convencional, para o caso de atividades de campo e didáticas. Tal possibilidade pode ser vislumbrada no equipamento TRICON, o qual alia as características de ser simples e compacto, além de se prestar também à execução de ensaios triaxiais.

1.3- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.

Esta dissertação de mestrado compõe-se de sete capítulos e três apêndices de cujo conteúdo faz-se, a seguir, uma abreviada exposição.

O capítulo II versa sobre a Teoria do Adensamento de Terzaghi e Fröhlich, ali sucintamente descrita e comentada. Apresenta-se, também, uma revisão bibliográfica de alguns temas relevantes no que tange à execução do ensaio de adensamento convencional, tais como: procedimento de experimentação, amostragem, amolgamento e atrito entre a parede interna do anel e a amostra. Além disso, descrevem-se o equipamento TRICON e os ensaios de adensamento edométrico nele realizados. No final, comparam-se os resultados obtidos nesse aparelho com os provenientes do ensaio convencional.

No capítulo III são revistos os diversos tipos de ensaio de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo. Expõem-se seus fundamentos teóricos e os resultados existentes na literatura técnica, fazendo-se, ao final, uma análise do desempenho de cada experimento.

No capítulo IV dá-se a conhecer uma revisão bibliográfica do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo (ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$). Em aditamento a isso, mostra-se um estudo teórico desse experimento, consoante o proposto por WISSA et alii (1971). A seguir, são comentados diversos métodos existentes para a estimativa da velocidade de ensaio e, também, é descrito o critério desenvolvido neste trabalho para tal fim.

O capítulo V é dedicado à descrição do equipamento, da metodologia e do sistema automático de aquisição e processamento de dados utilizados no ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Sinteticamente, são expostas a

instrumentação de que se valeu para executar esse tipo de experimento e as calibrações realizadas. Além disso, apontam-se os problemas detectados no funcionamento do aparelho usado e as soluções encontradas. A seguir, apresenta-se o procedimento definitivo de ensaio. Finalmente, é feita uma descrição dos ensaios convencionais executados para fins comparativos.

No capítulo VI buscou-se elaborar uma análise minuciosa dos resultados dos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, discutindo-os à luz do acervo à disposição na literatura técnica.

No capítulo VII este autor expende as conclusões que dimanaram do trabalho ora dado a lume, ao lado de sugestões para pesquisas vindouras.

No apêndice A.1 demonstra-se matematicamente a equação fundamental do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, por via diversa da apresentada por WISSA et alii (1971). Além disso, deduz-se a expressão do erro relativo que se comete quando não é levada em conta a fase transiente.

No apêndice A.2 transcrevem-se os programas PROCS e CRSC de que se fez uso, respectivamente, no processamento e na aquisição automática dos dados do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

No apêndice A.3 descreve-se a calibração do transdutor de pressão feita com o manômetro de mercúrio para pressões até 100 kPa.

1.4— CONSIDERAÇÕES SOBRE A TERMINOLOGIA TÉCNICA EM MECÂNICA DOS SOLOS.

A influência marcante exercida pela língua inglesa nos trabalhos da área geotécnica desenvolvidos no Brasil tem levado à existência de forte dissonância entre os especialistas quanto à denominação de parâmetros e fenômenos atinentes a essa ciência. Cômscio desse problema, este autor viu-se na contingência de ter que optar entre os vários termos empregados por peritos de renome. A tal escolha presidiu o espírito de buscar o ponto de equilíbrio entre aquilo que não afrontava o idioma português, mas mantinha a significação desejada, e a cópia pura e simples—na maioria das vezes feita de forma arreesada—dos termos do inglês.

Tomou-se o partido de determinadas expressões, sem se vergar a todo instante ao argumento da "consagração", em diversas oportunidades trazido à tona segundo a ótica de interesse de quem defende uma dada designação. Isto porque, levado ao limite, esse raciocínio de que algo consagrado é sempre correto teria induzido, por exemplo, Copérnico a admitir como válido o geocentrismo de Ptolomeu, uma idéia que se apoiava no pressuposto da

veracidade do imobilismo da terra defendido por um sábio da envergadura intelectual de Aristóteles e, durante séculos, preservada sob o manto abençoado de uma instituição poderosa como a Igreja Católica Romana.

Assim sendo, para bem caracterizar a preferência por diversos termos que constam do presente trabalho, é preciso arrolá-los ao lado daqueles que têm sido tratados de forma diferente por autores ilustres. Os principais são:

- a) u — sobrepressão hidrostática (outros assim nomeiam este parâmetro: excesso de pressão neutra, excesso de poro—pressão, excesso de pressão na água dos vazios do solo);
- b) σ'_{vm} — tensão de sobreadensamento (outras designações: pressão de sobreadensamento, tensão de pré—adensamento, pressão de pré—adensamento);
- c) ϵ_v — deformação específica vertical (outra designação: deformação vertical);
- d) $\dot{\epsilon}_v$ ($d\epsilon_v/dt$) — taxa de deformação específica relacionada ao tempo (outra denominação: velocidade de deformação);
- e) Ensaio edométrico (outra denominação: ensaio oedométrico);
- f) Ensaio de adensamento edométrico com carregamento continuamente crescente com o tempo (outra designação: ensaio contínuo);
- g) $\delta = d\delta/dt$ — velocidade, sendo δ a função deslocamento (outra denominação: velocidade de deslocamento);
- h) Ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, ou mais simplificada, ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ (outro nome: ensaio com velocidade de deformação controlada). Como este ensaio só será analisado à luz do conceito de deformações infinitesimais, há correção em dizer que, se $d\delta/dt$ for constante, $\dot{\epsilon}_v$ no regime permanente também o será.

CAPÍTULO II.

ENSAIOS CONVENCIONAIS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO.

II.1— INTRODUÇÃO.

Remontam aos primórdios do século XIX os primeiros registros do emprego do termo adensamento para caracterizar o fenômeno observado na natureza no qual, lenta e gradualmente, desenvolve-se uma variação de volume associada à expulsão de água dos poros do solo, após a imposição de determinada sobrecarga. TELFORD (1830) relatou que em 1809 uma camada espessa de argila fora pré-carregada, permitindo-se a ocorrência de recalques por nove meses, com o propósito de expelir a água e adensar a lama.

O tema, desde então, despertou o interesse dos profissionais de engenharia, devendo-se salientar os trabalhos realizados em Chicago, no final do século passado, e na Suécia pela Comissão de Estradas de ferro, nas primeiras décadas do século XX. Despontavam, assim, a relevância do assunto e o interesse pela compressibilidade no trato das questões relativas ao assentamento de fundações, o que pode ser aquilatado por essas judiciosas palavras de COLLINGWOOD (1891): "*in most cases it is sufficient to reach sound undisturbed earth of a known quality. But this should always be penetrated to a sufficient depth to insure that it is not underlain by semifluid or compressible material which may in time yield and cause trouble and danger...*"

Embora fosse considerado importante para a Engenharia desde aquelas longínquas épocas, o adensamento dos solos somente veio a ter um tratamento teórico e uma base experimental sólida após a publicação dos trabalhos de Karl Terzaghi nos anos vinte deste século, aos quais juntou-se o clássico artigo de TERZAGHI e FRÖHLICH (1936). Nesse ponto, é relevante consignar que coube a ORTENBLAD (1926) a primazia de apresentar a solução da equação do adensamento. Ainda que tardiamente, é de inteira justiça resgatar esse feito histórico importante.

Por fim, é preciso reconhecer que estes últimos eventos assinalam o início de uma nova era para a Mecânica dos Solos na qual o empirismo puro e simples cedeu lugar à abordagem científica.

II.2- A TEORIA DE ADENSAMENTO DE TERZAGHI E FRÖHLICH.

Com base na validade de um conjunto de hipóteses simplificadoras, Terzaghi e Fröhlich desenvolveram uma teoria capaz de estabelecer racionalmente o avanço no tempo do adensamento unidimensional, cuja expressão matemática é análoga à da condução do calor. Completou-se, assim, um corpo coerente de idéias, o qual pode ser desdobrado em quatro peças fundamentais:

- a) Uma interpretação física do fenômeno estudado, traduzida na célebre analogia mecânica do sistema mola-água-pistão;
- b) Uma formulação matemática que permitiu relacionar as grandezas envolvidas;
- c) Um ensaio de laboratório para reproduzir o fenômeno investigado;
- d) Um método para calcular os parâmetros que integram a equação matemática a partir dos resultados fornecidos pelo ensaio.

As hipóteses nas quais se fundamentou a concepção da Teoria de Adensamento de Terzaghi e Fröhlich são:

- 1) O solo está completamente saturado;
- 2) Os grãos de solo e o fluido intersticial são incompressíveis;
- 3) O solo é homogêneo;
- 4) A drenagem é unidirecional;
- 5) É válida a lei de Darcy para o escoamento do fluido intersticial;
- 6) As deformações só ocorrem na direção vertical;
- 7) Os fenômenos observados em pequenas massas de solo podem ser estendidos às grandes;
- 8) Certas propriedades do solo (módulo edométrico e permeabilidade) permanecem invariáveis durante todo o desenrolar do adensamento;
- 9) A tensão total se mantém constante ao longo do tempo;
- 10) Há uma relação linear entre as variações da tensão efetiva e do índice de vazios.

II.2.1- A FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.

Como a teoria de Terzaghi e Fröhlich tem sido descrita de forma pormenorizada na maior parte dos livros de Geotecnia (e.g., TERZAGHI, 1943; TAYLOR, 1948) e, entre nós, por MARTINS (1983), apresenta-se no presente trabalho somente uma sinopse desse tema.

A equação que governa o adensamento unidimensional, deduzida a

partir das hipóteses simplificadoras relacionadas acima, pode assim ser expressa:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{II.1}).$$

onde:

c_v = coeficiente de adensamento (considerado constante).

u = sobrepressão hidrostática num tempo qualquer.

z = variável espacial que indica a distância da fronteira drenante.

t = tempo.

O grau de adensamento (U_z) é definido pela relação entre a compressão ocorrida até o momento e a compressão total a ocorrer. Em vista da hipótese (10) e do princípio das tensões efetivas, U_z pode ser escrito da seguinte forma:

$$U_z = 1 - \frac{u}{u_0} \quad (\text{II.2}).$$

onde:

u_0 = sobrepressão hidrostática inicial.

Na figura (II.1) mostra-se graficamente a solução da equação do adensamento de Terzaghi e Fröhlich em termos de isócronas que expressam o grau de adensamento (U_z) como uma função da profundidade normalizada (z/H_d) e do fator-tempo (T_v). Este último é definido por:

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2} \quad (\text{II.3}).$$

onde:

H_d = máxima altura de drenagem.

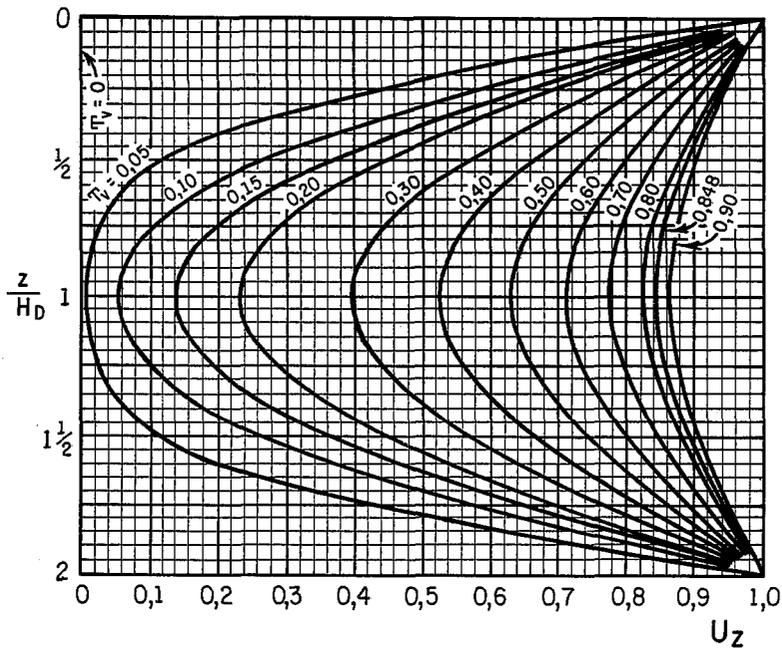


FIG. II.1 - Variação do grau de adensamento (U_z) com a profundidade normalizada (z/H_0) e o fator-tempo (T_v).
(APUD TAYLOR, 1948)

O grau de adensamento médio (\bar{U}) pode ser obtido em qualquer tempo integrando-se U_z ao longo de toda a camada que adensa. A representação gráfica de como \bar{U} se relaciona com o fator-tempo é mostrada na figura (II.2).

A curva da figura (II.2) é válida apenas para o caso em que a sobrepressão hidrostática inicial varia linearmente com a profundidade.

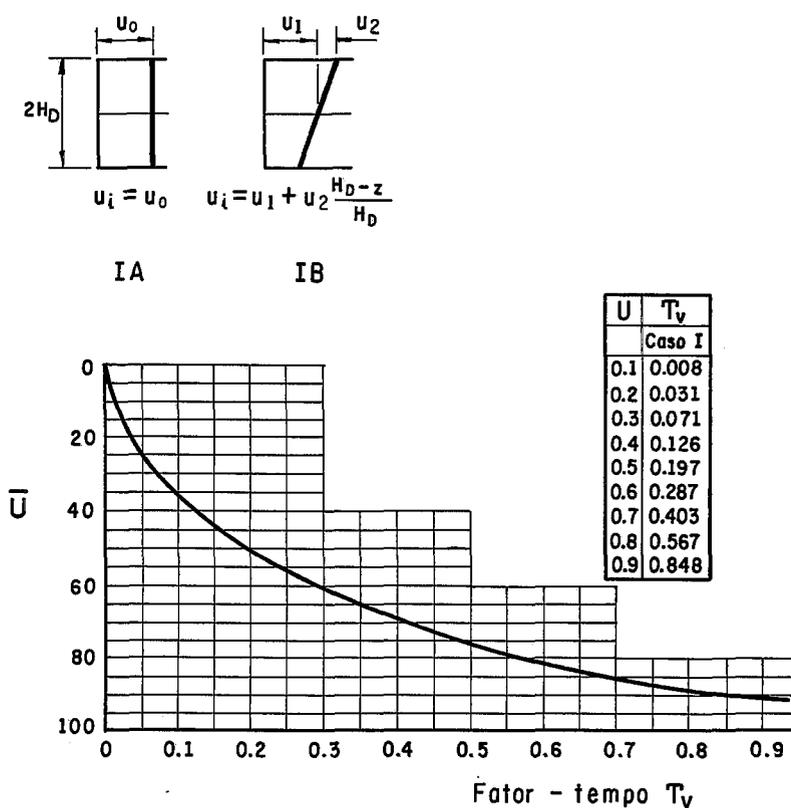


FIG. II.2 - Curva teórica grau de adensamento médio (\bar{U}) versus fator-tempo (T_v).
(APUD TAYLOR, 1948)

II.2.2- COMENTÁRIOS GERAIS.

Todas as hipóteses mencionadas na seção (II.2), em maior ou menor grau, limitam a aplicabilidade da teoria proposta. Mas, segundo TAYLOR (1948), de todos os itens, o último é responsável pelas maiores restrições, só se justificando a sua inclusão pela singularidade com que relaciona as variações de volume do solo e as tensões efetivas.

SCHIFFMAN et alii (1969) salientaram que o uso da teoria de Terzaghi e Fröhlich para analisar situações práticas se revelara paradoxal na medida em que, mesmo admitindo hipóteses irreais como o caráter unidimensional da compressão e a constância de certas

propriedades do solo, a simplicidade matemática que lhe é inerente induzira a criação de uma gama variada de extensões para abranger diversos problemas de campo e dar-lhes soluções mais aperfeiçoadas.

TAVENAS et alii (1979) comentaram que, para chegar a uma formulação simples e a uma solução do problema do adensamento de uma camada de argila, Terzaghi e Fröhlich lançaram mão de uma série de hipóteses muito restritivas e, em grande parte, pouco condizentes com a realidade física. Por outro lado, a simplicidade da abordagem conduziu à sua utilização quase universal e disso resultou que suas limitações fossem perdidas de vista.

CRAWFORD (1986) assinalou que a teoria de Terzaghi e Fröhlich é um competente conjunto de idéias que fornecera a base para o desenvolvimento do princípio das tensões efetivas e levava à compreensão da resistência e da compressibilidade das argilas, mas fora desenvolvida usando solos amolgados e quase sempre conduz a erros grosseiros na previsão da velocidade de adensamento no campo.

O pensamento do autor é que, à semelhança das grandes contribuições apresentadas em qualquer campo do saber, a teoria de Terzaghi e Fröhlich deve ser analisada no contexto histórico da sua época, razão pela qual é pertinente mencionar entre seus atributos meritórios o pioneirismo e o gigantesco salto qualitativo e quantitativo no estudo da compressibilidade dos solos. Os aperfeiçoamentos que se seguiram, juntamente com as críticas e as soluções para as deficiências encontradas, são próprios do curso natural da evolução do conhecimento.

II.3- PROCEDIMENTOS ESSENCIAIS DO ENSAIO DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL.

O ensaio de adensamento edométrico, aqui denominado ensaio convencional, encontra-se descrito nas normas ASTM D 2435 e BS 1377 e em grande parte dos manuais de engenharia geotécnica (e.g., LAMBE, 1951; HEAD, 1986). Convém ressaltar, ainda, que a Associação Brasileira de Normas Técnicas está, no momento, discutindo um projeto de norma relativo a esse experimento.

Por essas razões, limita-se a abordagem do tema às propostas modificadoras da metodologia tradicional e ao estudo dos efeitos do

procedimento de ensaio nos resultados.

II.3.1— MÉTODO DE APLICAÇÃO DE CARGA.

A prática usualmente adotada em laboratório é submeter um corpo-de-prova cilíndrico, com relação diâmetro/altura (D/H) entre 3 e 4, a uma série de incrementos de carga, de tal forma que a cada 24 horas seja duplicado o valor da tensão total. Visando a uma definição da curva índice de vazios (e)—tensão efetiva (σ_v) melhor que a obtida com esse método, foram propostas técnicas que diferem quanto à duração do incremento e à razão $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_i}$, onde, $\Delta\sigma$ = acréscimo de tensão total e σ_i = tensão total no estágio anterior.

Dentro desse objetivo geral, LEONARDS (1962), preconizou o uso de incrementos pequenos até se atingir o trecho virgem da curva e- σ_v (esc.log.), seguindo-se um descarregamento até σ_{v_0} (tensão efetiva de campo) e recarregamento segundo uma razão unitária entre o incremento de tensão total e a tensão total do estágio anterior, com duração de 24 horas para cada estágio.

BJERRUM (1973) propôs que a amostra fosse submetida a 2 ou 3 carregamentos de curta duração até a tensão efetiva de campo (σ_{v_0}). No trecho entre σ_{v_0} e σ_{vm} (tensão de sobreadensamento), os incrementos de carga deviam ser da ordem de $\frac{1}{3}(\sigma_{vm} - \sigma_{v_0})$ e aplicados no final do adensamento primário definido pelo método de Taylor. Assim que se excedesse a tensão de sobreadensamento—fenômeno percebido pelo decréscimo acentuado na velocidade de adensamento em decorrência da diminuição de c_v —, o tempo de duração de cada estágio deveria ser de 24 horas.

SÄLLFORS (1975) relatou a execução de ensaios de adensamento em que todos os acréscimos de carga foram iguais a 10 kPa ou 20 kPa e com duração de 24 horas. Os resultados mostraram uma curva e- σ_v bem definida, mas o valor de c_v não pôde ser avaliado porque as curvas de deformação específica vertical-tempo obtidas não obedeciam ao modelo de Terzaghi. Esse fenômeno fora descrito anteriormente por LEONARDS e ALTSCHAEFFL (1964).

A adoção dessas variações no procedimento para aplicar carga implica um aumento do tempo de ensaio, com conseqüente elevação dos

custos. Em vista disso, a utilização dessas inovações tem-se restringido, na maioria dos laboratórios, aos trabalhos de pesquisa e aos casos em que o material mostra uma quebra acentuada na curva $e-\sigma\dot{\epsilon}$ (esc.log.) na vizinhança de σ_{vm} e há necessidade de bem definir esse trecho.

Quanto à necessidade de abreviar tempo de duração do ensaio de adensamento, NEWLAND e ALLELY (1960) estão entre os primeiros que se ativeram ao problema. Sugeriram incrementar a tensão total no fim da compressão primária de cada estágio (o valor de d_{100} foi definido como sendo igual a $10/9$ da compressão correspondente a 90% de grau de adensamento médio, medida pelo método de Taylor na curva leitura do extensômetro - \sqrt{t}). Essa forma de carregamento diminui o tempo de ensaio, mas exige redobrada atenção dos operadores e disponibilidade para aplicar incrementos de carga em horários variados durante o dia e à noite.

A INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DO INCREMENTO DE CARGA NA CURVA $e-\sigma\dot{\epsilon}$ (esc.log.).

LEONARDS e RAMIAH (1959) realizaram ensaios em amostras amolgadas de argila residual e argila siltosa adotando diferentes intervalos de tempo para os incrementos de tensão total (quatro horas, um dia e uma semana). Os autores concluíram que, se o estágio de carga dura o suficiente para ocorrer o fim da compressão primária e o solo não exhibe grande compressão secundária, o tempo sob o qual a tensão total é mantida em cada etapa de carregamento não influencia significativamente a curva $e-\sigma\dot{\epsilon}$ (esc.log.), para um determinado $\Delta\sigma$ e $\Delta\sigma/\sigma_i$.

HAMILTON e CRAWFORD (1959) executaram ensaios em amostra de bloco com $\Delta\sigma/\sigma_i$ igual a 1, $1/3$ e $1/2$ e estabeleceram que as curvas $\Delta e-\sigma\dot{\epsilon}$ (esc.log.) são pouco influenciadas pela variação de $\Delta\sigma/\sigma_i$, se os valores de índice de vazios correspondem ao final do adensamento primário de cada incremento, arbitrando-se o fim do estágio como o ponto referente à velocidade de $4,23 \times 10^{-9}$ m/s.

NEWLAND e ALLELY (1960), após ensaiar amostras amolgadas e indeformadas da argila de Whangamarino, mostraram que as curvas $e-\sigma\dot{\epsilon}$ (esc.log.) referentes aos ensaios com incrementos de maior duração situavam-se abaixo da curva obtida para o fim da compressão primária e

eram grosseiramente paralelas a ela. Confirmou-se, de uma forma geral, a proposição anteriormente feita por TAYLOR (1942).

CRAWFORD (1964) apresentou resultados de ensaios em amostra de bloco da argila de Leda, Canadá, nos quais os incrementos de carga foram aplicados no final da compressão primária, ao fim de um dia e após uma semana. Como se pode observar na figura (II.3), as curvas traçadas em termos de $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc.log.), para facilitar as comparações, encontram-se deslocadas para a esquerda em relação à curva de fim-do-primário. Essa diferença aumenta à medida que cresce a duração do estágio de carregamento e se deve à presença de compressão secundária.

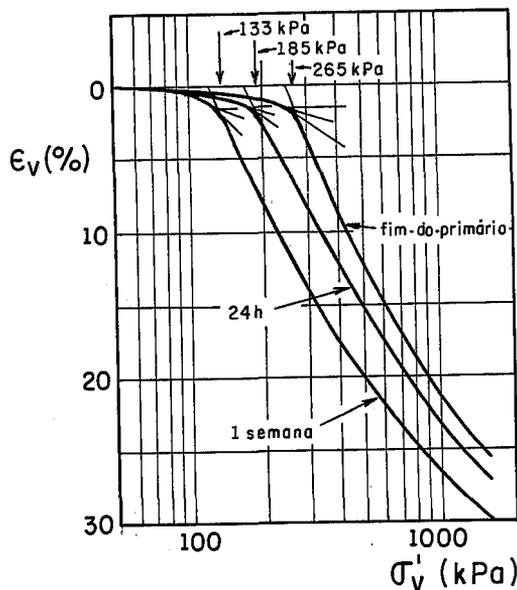


FIG. II.3 - Curvas $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log.)
(APUD CRAWFORD, 1964).

SÄLLFORS (1975), analisando resultados de ensaios incrementais na argila de Bäckebo, Göteborg, nos quais utilizaram-se três procedimentos de aplicação de carga distintos—convencional, método de BJERRUM (1973) e incrementos constantes de 10 kPa ou 20 kPa—, expendeu conclusões semelhantes às de CRAWFORD (1964), no que tange à dependência posicional da curva $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc.log.) em relação ao intervalo de tempo de cada incremento.

Recentemente, MESRI e CHOI (1985) postularam que, para qualquer argila mole, existe uma relação única entre o índice de vazios ao final do primário e a tensão efetiva. Esta conclusão baseou-se em resultados de ensaios em corpos-de-prova com alturas de 25mm, 50mm, 75mm e 125mm submetidos a adensamento isotrópico. Decorre dessa formulação que a variação de índice de vazios ao final do adensamento primário (Δe_p) obtida numa amostra delgada de laboratório pode ser usada diretamente para o cálculo do recalque de uma camada espessa de argila no campo, ainda que no primeiro caso o fenômeno ocorra em horas e no segundo, em um período de anos. Trata-se, evidentemente, de uma questão importante, mas que ainda não alcançou consenso entre os especialistas, como pode ser comprovado nos relatórios referentes ao estado da arte dos congressos internacionais de Tóquio (LADD et alii, 1977) e de San Francisco (JAMIOLKOWSKI et alii, 1985).

A INFLUÊNCIA DA RAZÃO $\Delta\sigma/\sigma_i$ NA CURVA ϵ_v-t (esc.log.).

Um tema importante, no que se refere ao método de carregamento, é determinar como a razão entre o incremento de tensão e a tensão total do estágio anterior ($\Delta\sigma/\sigma_i$) interfere nas relações deformação-tempo dos solos. LEONARDS e GIRAULT (1961), em seu estudo sobre o ensaio de adensamento unidimensional, adotaram a classificação de curvas ϵ_v-t (esc.log.) em tipos I, II e III proposta anteriormente por MARSAL et alii (1950). Observam-se na figura (II.4) os efeitos marcantes da razão $\Delta\sigma/\sigma_i$ na forma dessas curvas. O tipo I, a menos da compressão secundária, é característico da teoria de Terzaghi e Fröhlich e é obtido para grandes valores de $\Delta\sigma/\sigma_i$. Para valores pequenos dessa razão, obtém-se o tipo III e para valores intermediários, o tipo II. Os autores ainda chamaram a atenção para o fato de que os dois últimos modelos são típicos de incrementos de carga que passam pela tensão de sobreadensamento.

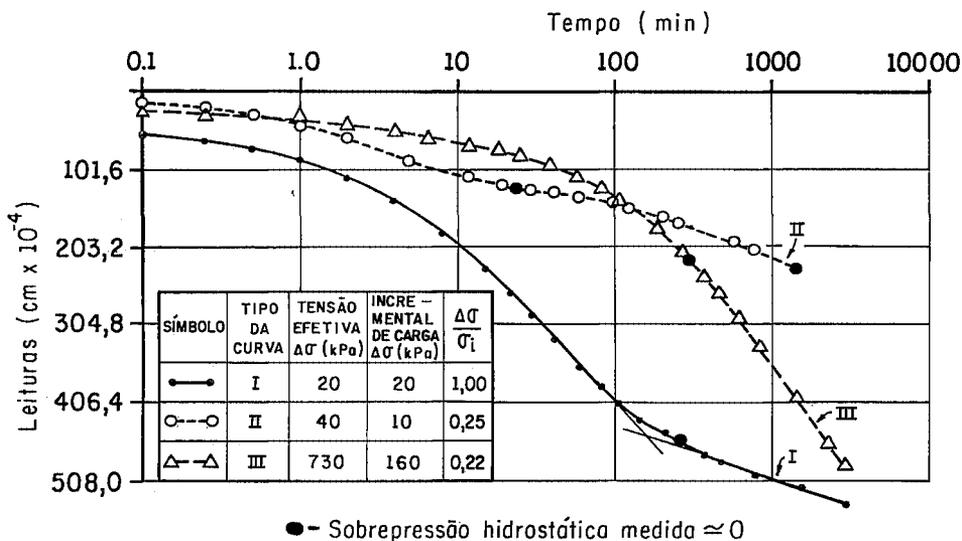


FIG. II.4 - Curvas L versus t (esc. log.)
(APUD LEONARDS e GIRAULT, 1961).

LEONARDS e ALTSCHAEFFL (1964) acrescentaram à discussão desse assunto os resultados de ensaios de adensamento com medições de sobrepressão hidrostática. Concluíram que:

- A razão $u_0/\Delta\sigma$ é essencialmente unitária para todas as condições de carregamento, desde que a amostra esteja saturada;
- A teoria de Terzaghi e Fröhlich prevê com fidelidade, conforme apresentado na figura (II.5), a velocidade de dissipação das sobrepressões hidrostáticas, se $\Delta\sigma/\sigma_i$ for suficientemente grande para produzir uma curva do tipo I;
- O valor de c_v obtido nas curvas compressão-tempo e dissipação de sobrepressão hidrostática-tempo (esc.log.) é praticamente o mesmo, se verificado o item anterior;
- Para curvas do tipo II e, especialmente, do tipo III, a teoria de Terzaghi-Fröhlich não pode prever, ainda que aproximadamente, a velocidade de dissipação das sobrepressões hidrostáticas;

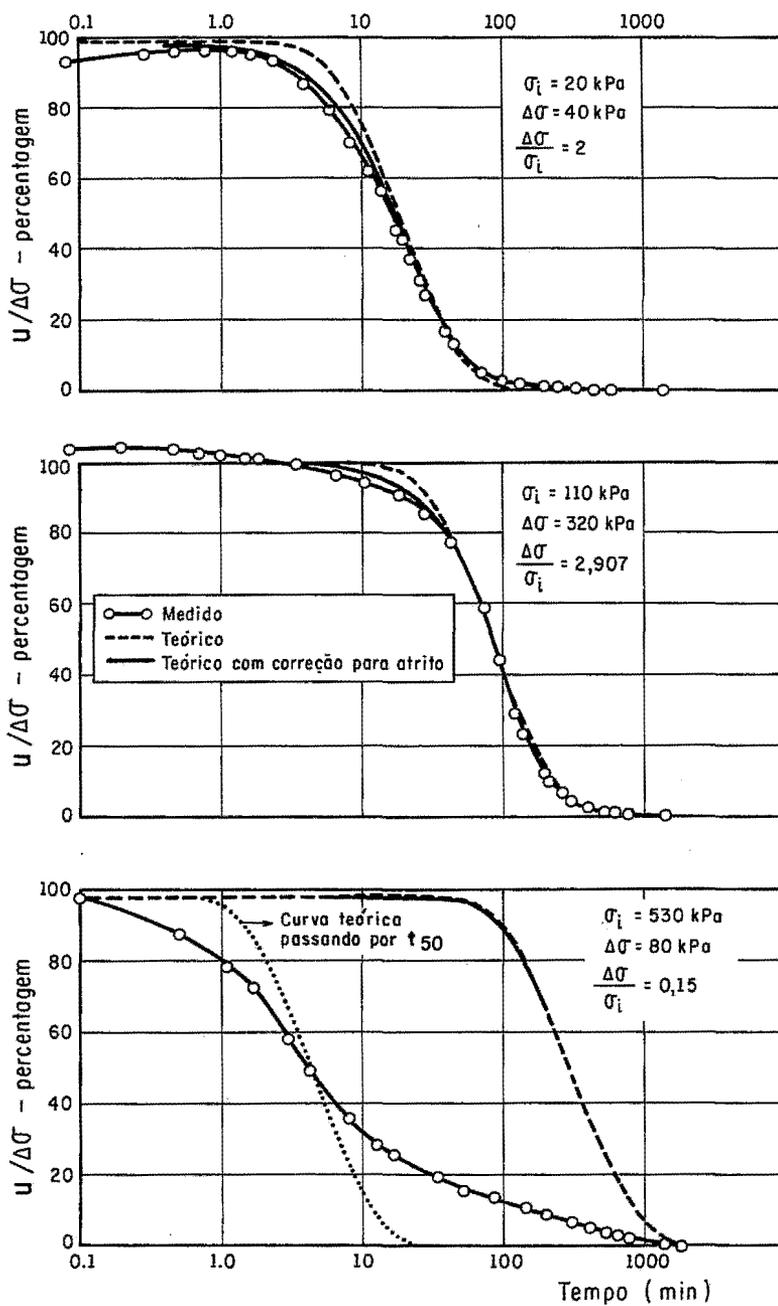


FIG. II.5 - Influência de $\Delta\sigma/\sigma_i$ na velocidade de dissipação das sobrepensões hidrostáticas.

(APUD LEONARDS e ALTSCHAEFFL, 1964)

e) Em conseqüência do exposto no item precedente, não se pode calcular c_v para curvas dos tipos II e III usando métodos de ajustamento baseados no modelo de Terzaghi-Fröhlich.

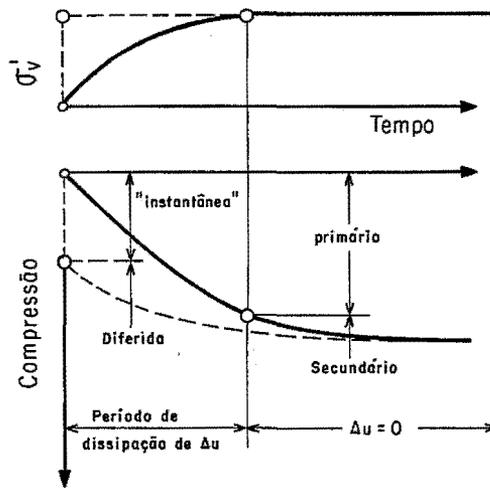
A IMPORTÂNCIA DA MAGNITUDE DA RAZÃO $\Delta\sigma/\sigma_i$.

A influência de valores baixos de $\Delta\sigma/\sigma_i$ nos resultados dos ensaios edométricos é matéria relevante para a compreensão do comportamento dos solos. TERZAGHI (1941) discutiu e reportou medições de campo que consubstanciaram sua interpretação do fenômeno relacionado com a desprezível variação de volume exibida por um depósito normalmente adensado de argila quando submetido a pequeno incremento de tensão. Comentou, ainda, que num estrato profundo de argila o acréscimo de tensão provocado por uma estrutura pode ser de tal grandeza que não resulte em compressão significativa das camadas inferiores.

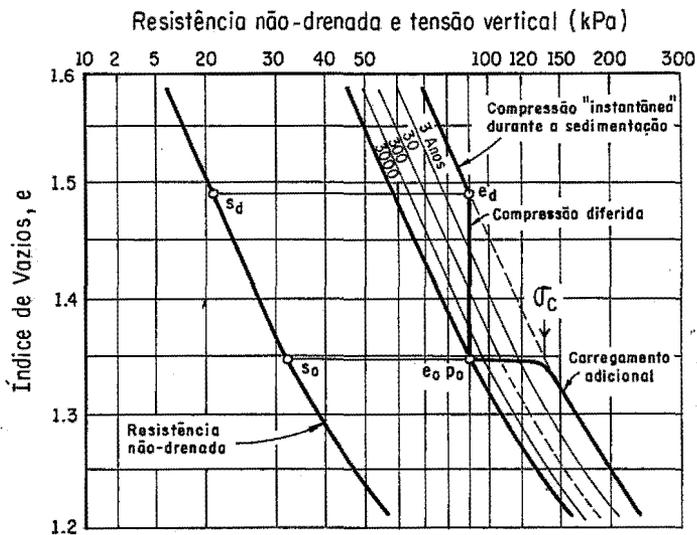
LEONARDS e RAMIAH (1959), tomando por base dados de argila amolgada submetida a ensaio incremental, em que um estágio foi mantido por 12 semanas e posteriormente o carregamento continuou com diferentes $\Delta\sigma/\sigma_i$, postularam a existência de uma tensão de quase sobreadensamento quando, após esse período de tempo, o experimento prosseguiu com uma razão $\Delta\sigma/\sigma_i$ pequena. A interpretação do que ocorre no processo de adensamento subsequente depende, de uma forma crítica, desse valor. Os autores comentaram, ainda, que MORETTO (1948) mostrara efeitos similares de sobreadensamento em ensaios de compressão simples.

LEONARDS e ALTSCHAEFFL (1964) apresentaram resultados de ensaios edométricos nos quais um incremento permaneceu 90 dias, seguindo-se aplicação de carga com $\Delta\sigma/\sigma_i$ pequeno. Confirmou-se a ocorrência de uma tensão de quase sobreadensamento, bem maior que a máxima tensão de adensamento passada.

BJERRUM (1967) denominou de tensão crítica (σ_c^*) aquela cuja grandeza caracteriza o ganho de resistência à compressão desenvolvido nas argilas que exibem adensamento secundário. Estabeleceu-se, então, um sistema de curvas, praticamente paralelas, apresentado na figura (II.6), o qual exprime as características de compressibilidade da argila e incorpora a história geológica do material para explicar o fenômeno da compressão secundária. Esta abordagem ampliou, portanto, proposta anterior de TAYLOR (1942). Verificou, ainda, o autor



(a)



(b)

FIG. II.6 - Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de uma argila exibindo compressão diferida.
(APUD BJERRUM, 1967)

dinamarquês que, em termos de compressão "instantânea", se $\Delta\sigma/(\sigma'_c - \sigma'_b)$ for inferior à unidade, a sobrepressão hidrostática se dissipará em curto período e a quantidade de água a ser expulsa será relativamente pequena. No entanto, quando a tensão efetiva supera σ'_c , o efeito hidrodinâmico passa a ter importância crescente. Resultados de campo e de laboratório mostraram que o conceito de tensão crítica permitiu avaliar coerentemente, em termos qualitativos, os recalques observados em vários prédios da cidade de Drammen, Noruega, cujo avanço dependia, essencialmente, do grau de mobilização da "resistência de reserva" da camada de argila provocado pelo assentamento de uma estrutura, ou seja, da razão $\Delta\sigma/(\sigma'_c - \sigma'_b)$.

II.3.2- EFEITOS DA AMOSTRAGEM.

A obtenção de parâmetros de compressibilidade confiáveis em laboratório está intimamente relacionada à qualidade das amostras, cuja extração com amostradores tubulares de parede fina envolve necessariamente condições de perturbação do material resultantes do "modus operandi" do equipamento, às quais se somam aquelas provocadas pelo desempenho do operador no campo e no laboratório. Entre as primeiras, incluem-se as operações de penetração e recuperação do tubo, extrusão da amostra e redistribuição do teor de umidade no tubo; entre as últimas, o manejo da aparelhagem, transporte, armazenagem, habilidade na extrusão e moldagem da amostra.

Os fatores adstritos à operação do equipamento podem ser analisados e ter sua influência minimizada, enquanto que as perturbações dependentes da capacidade dos técnicos, por sua própria natureza, não podem ser unificadas em uma abordagem racional para sua previsão. Nesse ponto, é pertinente salientar, como o fizeram BALIGH et alii (1987), que o uso da melhor aparelhagem e a adoção das mais cuidadosas técnicas não eliminam as alterações introduzidas pela amostragem, mas tão somente reduzem-nas a um mínimo ainda, possivelmente, significativo.

O amolgamento proveniente de aspectos mecânicos nas diversas etapas de preparação de um corpo-de-prova é mais pronunciado nas argilas de baixa plasticidade e sensibilidade (BJERRUM, 1973).

Ressalte-se, aqui, que o atrito desenvolvido entre a amostra e a parede do tubo faz com que a zona mais próxima a este seja mais perturbada. No núcleo central—parte menos amolgada—, devido ao alívio de tensões totais após a retirada da amostra, surgem sobrepressões hidrostáticas negativas, cujos valores são menos negativos que os calculados pela fórmula teórica de LADD e LAMBE (1963) para a amostragem perfeita. Ocorre, em seguida, uma sucção da água da zona periférica, o que acarreta um fenômeno dependente do tempo, com expansão na parte central conjugada a um adensamento na parte mais externa. Mantém-se, dessa forma, inalterado o volume. Segundo BJERRUM (1973), uma forma de evitar os efeitos danosos da redução de tensões efetivas é adensar a amostra nas mesmas condições de tensão efetiva existentes no campo, devendo decorrer um tempo mínimo entre extração e ensaio.

De acordo com JAMIOLKOWSKI et alii (1985), o amolgamento afeta a curva de compressão de ensaios em argila com consistência entre mole e rija e sensibilidade entre baixa e moderada, da forma como segue:

- a) Decresce o índice de vazios (ou aumenta a deformação específica) para uma dada tensão efetiva;
- b) Torna difícil a definição do ponto de raio mínimo e, portanto, obscurece o valor de σ_{vm} , além de, freqüentemente, reduzi-lo;
- c) Aumenta a compressibilidade no trecho de recompressão e no de compressão virgem pode diminuí-la.

A avaliação em termos quantitativos do grau de amolgamento de uma amostra é assunto que não encontrou, até o presente, uma resposta satisfatória. Qualitativamente, podem ser adotados os critérios seguintes:

- a) O uso de radiografia é idealmente adequado para selecionar os melhores materiais de uma amostragem;
- b) Medições da tensão efetiva reinante na amostra para comparar com a calculada segundo o conceito de amostragem perfeita;
- c) Analisar a forma das curvas de compressão e os parâmetros de compressibilidade;
- d) Traçar um gráfico (σ_{vm} medido / σ_{vm} —melhor estimativa) x ϵ_{vr} , usado por HOLTZ et alii (1986), onde ϵ_{vr} = deformação específica vertical correspondente a σ_{vo} . Na figura (II.7) apresenta-se um gráfico do

tipo aqui referido, no qual se observa que ϵ_{vr} não ultrapassou 1,5% para os ensaios realizados;

e) Verificar se há intersecção entre a curva $e-\sigma'_v$ (esc.log.) e a reta traçada a partir do primeiro ponto de tensão, paralelamente à reta média do laço de carga-descarga. Esta propriedade define um critério de amolgamento usado no LPC, segundo DUCASSE (1986).

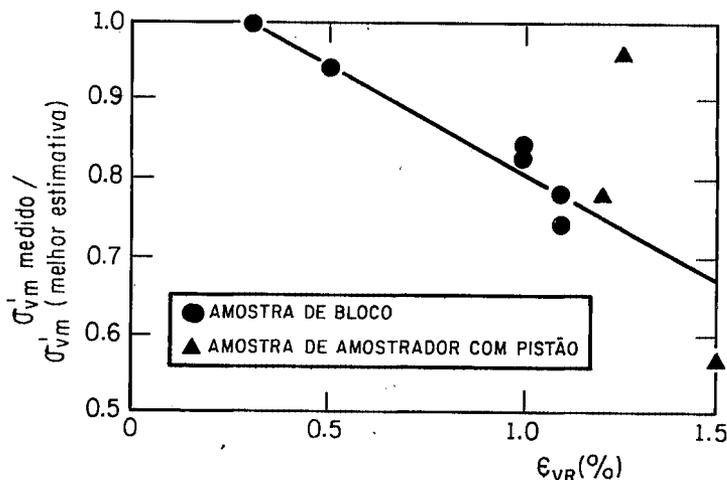


FIG. II.7 - Curva tensão de sobreadensamento normalizada - deformação específica vertical de recompressão em σ'_{v0} (ϵ_{vr}).
(APUD HOLTZ et al., 1986)

II.3.3- EFEITOS DO ATRITO ENTRE A PAREDE INTERNA DO ANEL E A AMOSTRA.

TAYLOR (1942), ao abordar esse assunto, concluiu que a força de atrito existente entre as superfícies laterais do corpo-de-prova e do anel tem intensidade maior no caso de carregamento do que no de expansão. Relatou, também, que os valores da razão ϕ entre a tensão real média atuante e a tensão aplicada variaram de 0,90 a 0,95 para amostras amolgadas e indeformadas da argila azul de Boston.

LEONARDS e GIRAULT (1961) apresentaram resultados de ensaios edométricos em corpos-de-prova de diversas alturas, em que foram

utilizados anéis de aço inoxidável revestidos ou não com teflon, com e sem lubrificação. A análise dos dados mostrou a eficácia dos anéis de teflon lubrificadas com dissulfeto de molibdênio (os valores de φ foram da ordem de 0,93). Além disso, como se observa na figura (II.8), o atrito afeta a velocidade de dissipação da sobrepressão hidrostática e tem valor alto nas leituras iniciais da compressão.

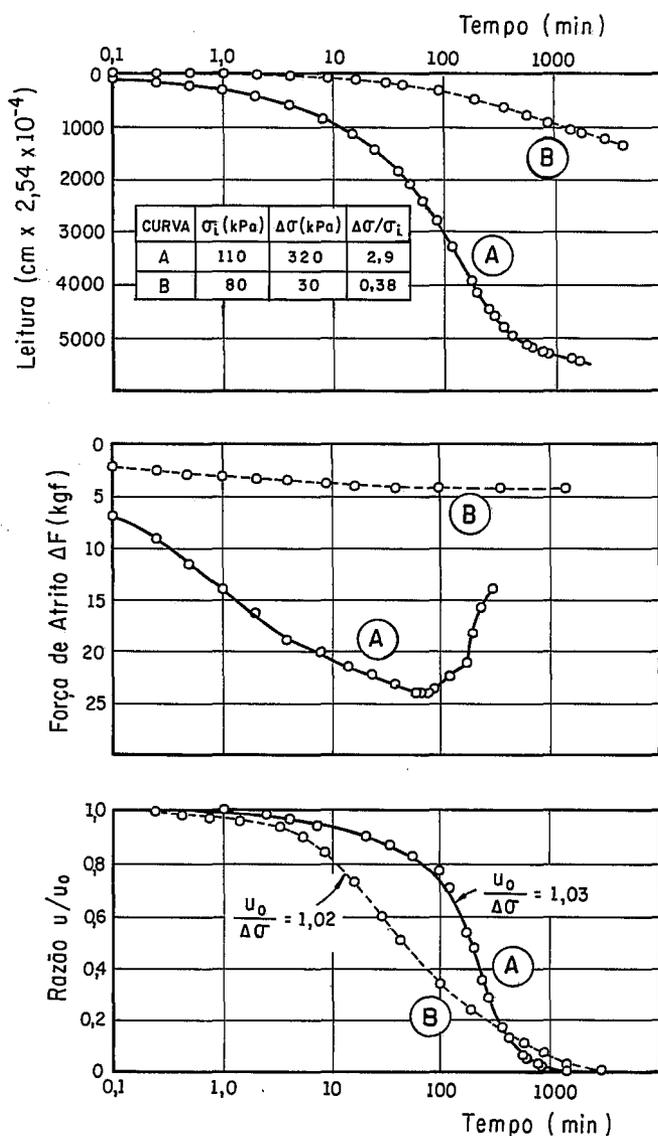


FIG. II.8 - Influência da força de atrito na velocidade de compressão.
(APUD LEONARDS e GIRAUULT, 1961)

SÄLLFORS (1975) investigou a ordem de grandeza da força de atrito em anéis de aço inoxidável recobertos ou não com teflon, lubrificados com dissulfeto de molibdênio ou graxa de silicone, usando um transdutor de força diretamente ligado ao equipamento de ensaio. As conclusões apresentadas pelo autor são as seguintes:

- a) Nos anéis de aço inoxidável, revestidos ou não com teflon, praticamente, a mesma perda de tensão por atrito é atingida, se as superfícies têm polidezes semelhantes;
- b) A graxa de silicone é mais eficaz do que o dissulfeto de molibdênio;
- c) Observa-se que a tendência geral do desenvolvimento da força de atrito (F), em termos de diminuição da carga aplicada, é de tal forma que, quando se impõe o novo incremento, F cai um pouco e volta a crescer com o tempo.

Em vista da dificuldade de quantificar a força de atrito de uma forma racional e ao mesmo tempo simples, recomendam-se procedimentos para minimizar seus efeitos, tais como o uso de anéis com relação D/H entre 3 e 4 e com superfícies internas bem polidas, além de lubrificação com graxa de silicone.

II.3.4 PARÂMETROS DO ENSAIO DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL.

Antes de iniciar o item, é necessário advertir que o cálculo do coeficiente de adensamento pelos métodos de Casagrande e Taylor não será tratado neste trabalho, pois encontra-se descrito em diversos livros de Mecânica dos Solos (e.g., TAYLOR, 1948 e HEAD, 1986). Além disso, resolveu-se limitar a abordagem à apresentação das definições dos principais parâmetros obtidos no ensaio em epígrafe.

a) Módulo edométrico (M).

$$M = \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta \epsilon_v} \quad (\text{II.4}).$$

onde:

$\Delta \sigma_v$ = variação da tensão efetiva

$\Delta \epsilon_v$ = variação da deformação específica vertical.

dimensão da grandeza: $L^{-1} M T^{-2}$.

b) Coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v).

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \sigma_v} \quad (\text{II.5}).$$

dimensão da grandeza: $L M^{-1} T^2$.

c) Coeficiente de compressibilidade (a_v).

$$a_v = - \frac{\Delta e}{\Delta \sigma_v} = (1 + e) m_v \quad (\text{II.6}).$$

dimensão da grandeza: $L M^{-1} T^2$.

d) Índice de compressão (C_c).

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (\text{II.7}).$$

Essa grandeza adimensional é obtida na curva $e - \sigma_v$ (esc.log.) e equivale ao coeficiente angular da secante à curva de compressão virgem tomada entre os pontos considerados.

e) Índice de recompressão (C_r).

$$C_r = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (\text{II.8})$$

Essa grandeza adimensional é obtida da curva $e - \sigma_v$ (esc.log.) no trecho que antecede a tensão de sobreadensamento (σ_v).

f) Razão de compressão (CR).

$$CR = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \log \sigma_v} = \frac{C_c}{(1 + e)} \quad (\text{II.9}).$$

Essa grandeza adimensional é extraída na curva $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.) no trecho virgem.

g) Razão de recompressão (RR).

$$RR = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \log \sigma_v} = \frac{C_r}{(1 + e)} \quad (\text{II.10}).$$

Essa grandeza adimensional é extraída da curva $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.) no trecho anterior a σ_{vm} .

II.4- AVALIAÇÃO CRÍTICA DO ENSAIO DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL.

Razoável experiência foi adquirida nos últimos cinquenta anos com o uso do ensaio de adensamento convencional, ao mesmo tempo em que se estabeleceram padrões para sua execução e análise de seus resultados. Não obstante a existência dessa prática bem consolidada, permanecem algumas desvantagens abaixo expostas:

- a) O método convencional produz uma curva $e - \sigma_v$ (esc.log.) com poucos pontos, particularmente na vizinhança da tensão de sobreadensamento. Como esta última grandeza é estimada por traçado gráfico, seu valor fica sujeito a um certo grau de interpretação, o que resulta em inacurácia;
- b) Em razão de se prolongar por vários dias, o ensaio torna-se dispendioso. Sua duração média é de dez dias, mas esse tempo aumenta consideravelmente quando são usados ciclos de carga e descarga;
- c) As deformações oriundas do adensamento secundário manifestam-se em magnitudes variáveis nos diferentes estágios de carregamento e podem afetar a estimativa da tensão de sobreadensamento;
- d) Executado com uma razão $\Delta \sigma / \sigma$ unitária, o ensaio submete a amostra a carregamentos instantâneos e crescentes com o desenrolar do experimento, o que induz uma distribuição acentuadamente desuniforme de sobrepressões hidrostáticas e altos gradientes hidráulicos;

e) A previsão da velocidade de dissipação da sobrepressão hidrostática só é possível se $\Delta\sigma/\sigma_1$ for suficientemente grande para produzir uma curva do tipo I de LEONARDS e GIRAULT (1961). O cálculo de c_v também está condicionado à obtenção desse modelo.

Entre as vantagens do ensaio de adensamento convencional, deve-se enunciar as seguintes:

- a) O equipamento utilizado é bastante simples e o seu manejo não exige a presença de técnico altamente especializado;
- b) Existe uma experiência prática bem estabelecida, o que torna mais fácil executar o ensaio e proceder à interpretação dos dados.

II.5- ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO NO EQUIPAMENTO TRICON.

II.5.1- INTRODUÇÃO.

Tendo verificado que a resistência ao cisalhamento dos solos de regiões extremamente secas da Austrália, em geral, superava sobremaneira o valor requerido para estabilidade de fundações de edifícios, PARRY(1960) dedicou-se, inicialmente, ao estudo das características de compressibilidade e expansão. O autor colimava obter parâmetros que permitissem adequar seus projetos à realidade local e esse propósito levou-o a realizar uma pesquisa das propriedades de solos regionais. O trabalho, por sua natureza peculiar, exigia um laboratório móvel e instrumentos compactos e versáteis. Essas qualidades foram incorporadas num pequeno edômetro especialmente desenvolvido para ensaios de adensamento e de expansão. A seguir, PARRY (1963) reuniu dados de ensaios triaxiais e de adensamento edométrico em amostras de pequenas dimensões, os quais comprovaram a eficiência de um novo aparelho que tornava possível executar aqueles dois tipos de experimento segundo métodos convencionais. Subseqüentemente, PARRY (1966) apresentou uma classificação dos solos australianos de acordo com a potencialidade de seus movimentos, tomando por base resultados obtidos no equipamento de 1960. Podia-se, assim, estimar o grau das conseqüências dos deslocamentos e definir a melhor modalidade de fundação. Finalmente, PARRY (1977) mostrou uma versão aperfeiçoada dos modelos de equipamento citados acima, o TRICON, cujos

componentes são descritos a seguir.

II.5.2- DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO.

Com o objetivo de facilitar o entendimento do memorial descritivo, dividiu-se o TRICON em cinco partes principais, apresentadas nas figuras (II.9) e (II.10) e descritas como segue abaixo:

- a) Câmara do sistema ar-água;
- b) Câmara de ensaio;
- c) Sistema de transmissão de força;
- d) Sistema de medição de deslocamentos;
- e) Célula de adensamento.

II.5.2.1- CÂMARA DO SISTEMA AR-ÁGUA.

É utilizada principalmente nos ensaios triaxiais e constitui-se das seguintes peças:

- a) Depósito de água localizado na base;
- b) Orifício para introduzir água no depósito da base, com vedação em arruela e parafuso sextavado;
- c) Canalículo que permite o fluxo da água da câmara do sistema ar-água em direção à câmara de ensaio ;
- d) Pedestal;
- e) Anel de borracha para impedir vazamento entre a parte superior da câmara do sistema ar-água e a câmara de ensaio;
- f) Quatro roscas para receber os parafusos do tipo borboleta, os quais permitem a fixação da placa da base da câmara de ensaio à câmara do sistema ar-água.

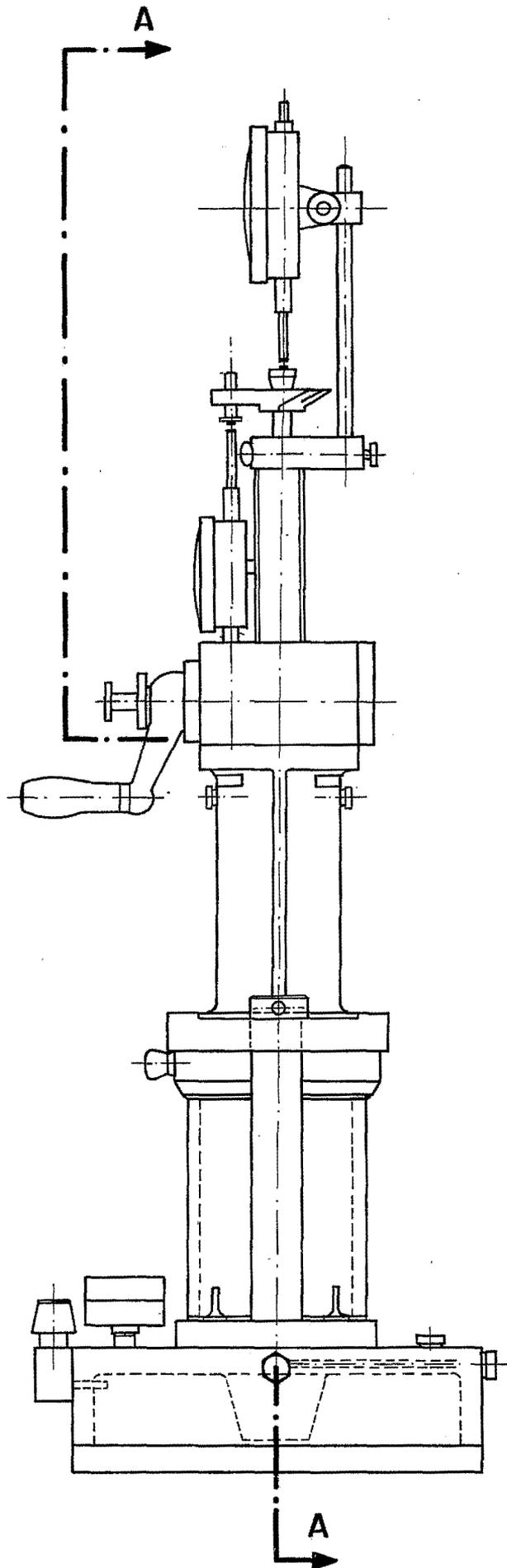


FIG. II.9 - Desenho esquemático do equipamento TRICON.

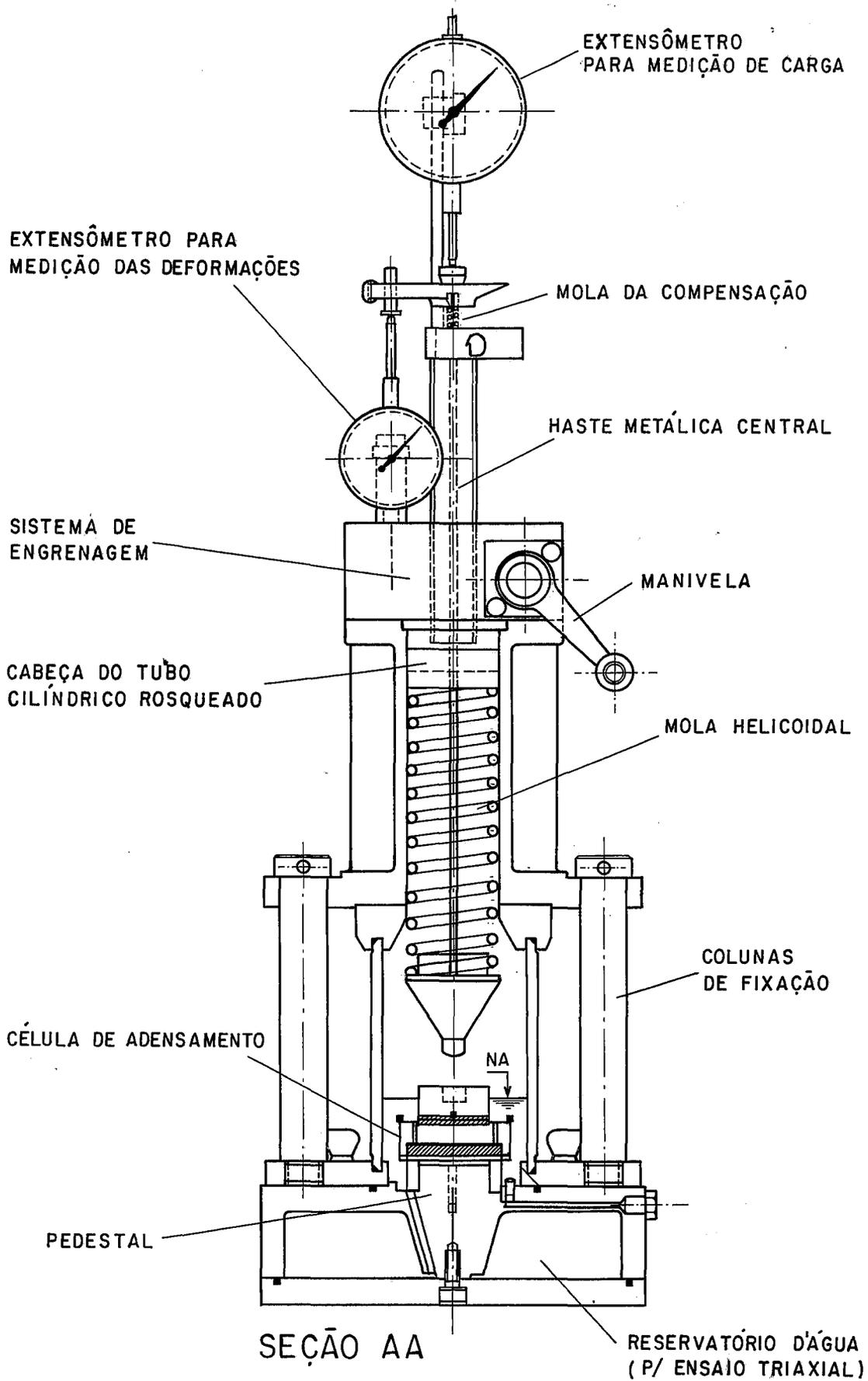


FIG. II.10 - Desenho esquemático do equipamento TRICON.

II.5.2.2- CÂMARA DE ENSAIO.

Os elementos que a constituem são:

a)Tubo cilíndrico de perspex com rebaiços nas partes externas para possibilitar o assentamento perfeito nos sulcos do colar de contenção e da placa metálica situada na região inferior. A vedação é assegurada por anéis de borracha interpostos nas reentrâncias das peças.

b)Colunas de fixação.

São em número de dois e respondem pelo travamento da câmara de ensaio, a qual fica confinada entre a base alargada do sistema de transmissão de força e a placa metálica da parte inferior. Possuem rosca na base e uma cabeça com quatro furos na parte superior. Usando-se um bastonete apropriado, faz-se o rosqueamento e trava-se o conjunto.

II.5.2.3- CÉLULA DE ADENSAMENTO.

É composta de base, pedra porosa inferior, pedra porosa superior, anel de adensamento, colar e placa de topo.

A base tem forma de um cilindro vazado, em cuja parte superior há um disco maciço. O conjunto assenta-se perfeitamente no pedestal da câmara de ensaio.

O anel de adensamento fica contido entre a pedra porosa inferior, colocada sobre a base, e um colar que possui orifícios por onde passam três parafusos dispostos segundo um triângulo equilátero. Essas peças são travadas por aparafusamento no disco da base.

A placa de topo é de acrílico e possui um rebaiço na região central para receber o pino arredondado do elemento terminal do sistema de transmissão de força. Um pino de pequena dimensão assegura o encaixe, de forma centralizada, da placa de topo na pedra porosa superior.

II.5.2.4- SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE FORÇA.

É constituído dos seguintes elementos:

a)Tubo cilíndrico vazado, com dois rasgos verticais, que forma o

- arcabouço da parte superior do equipamento;
- b)Tubo cilíndrico rosqueado na parte externa, com bucha na parte interna e terminação em uma cabeça metálica com dois orifícios;
 - c)Dois parafusos que servem de guias do dispositivo do item anterior;
 - d)Engrenagem de acionamento do cilindro rosqueado;
 - e)Manivela;
 - f)Haste metálica central com rosca nas duas extremidades. Na parte inferior é rosqueada uma peça com corpo tronco-cônico com rebaixo na parte superior para receber a mola e terminação em pino arredondado que penetra na placa de topo. Na parte superior da haste é aparafusado um cabeçote de fixação;
 - h)Mola helicoidal de 163 mm de altura e 34 mm de diâmetro interno. É fixada entre a extremidade inferior da haste metálica central e a cabeça do tubo cilíndrico rosqueado;
 - i)Mola de compensação, localizada entre a parte superior do tubo cilíndrico rosqueado e o suporte que se liga à haste do extensômetro invertido.

II.5.2.5- SISTEMA DE MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTOS.

É formado pelas seguintes partes:

- a)Extensômetro com mostrador grande, com sensibilidade de 0,01 mm, usado para medir deslocamentos da mola helicoidal. É fixado ao tubo cilíndrico rosqueado por uma braçadeira;
- b)Extensômetro invertido utilizado para medir o deslocamento vertical do topo do corpo-de-prova. Tem sensibilidade de 0,01 mm e é fixado na parte superior da caixa de engrenagem;
- c)Placa metálica para interligar a haste metálica central com o extensômetro invertido.

II.5.3- ASPECTOS GERAIS DO EQUIPAMENTO TRICON (ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO).

- a) MECANISMO DE APLICAÇÃO DE CARGA.

O TRICON dispõe de uma mola de constante elástica conhecida que

fica confinada entre uma peça de corpo tronco-cônico e a cabeça metálica do tubo cilíndrico rosqueado. No caso do aparelho existente na COPPE, as molas helicoidais para adensamento foram calibradas em um pendural, anotando-se os deslocamentos resultantes da aplicação de pesos previamente aferidos. As constantes elásticas obtidas foram 9,20 kN/m e 23,4 kN/m. Esses valores estão em consonância com os fornecidos pelo manual do fabricante.

Ao se movimentar a manivela no sentido anti-horário, aciona-se a engrenagem e dá-se início a um movimento vertical, para baixo, do tubo cilíndrico rosqueado. Este, por sua vez, deforma a mola helicoidal e transmite-se ao corpo-de-prova uma determinada força.

Com base na lei de Hooke, calcula-se a força que causou o deslocamento da mola lido no extensômetro maior.

b) MEDIÇÃO DOS DESLOCAMENTOS VERTICAIS DO TOPO DO CORPO-DE-PROVA.

É feita através das leituras acusadas pelo extensômetro menor, colocado em posição invertida, o qual está vinculado a um suporte preso a um cabeçote com frisos. Este fixa a haste metálica central que, por sua vez, passa por dentro do tubo cilíndrico rosqueado e se prende na parte inferior à rosca interna existente na peça de corpo tronco-cônico.

O arranjo segundo o qual se encontram ligados esses componentes permite o funcionamento interligado e independente do sistema de medição de deslocamentos da mola e da amostra.

c) LIMITE SUPERIOR DA TENSÃO VERTICAL.

O valor máximo da tensão vertical que pode ser aplicada a um corpo-de-prova é função da capacidade da mola e do máximo deslocamento alcançado pelo extensômetro distendido (d_{max}). No caso do equipamento existente na COPPE, $d_{max} = 50$ mm.

As molas helicoidais que integram o equipamento padrão suportam, numa faixa de trabalho admissível, tensões verticais máximas de 600 kPa e 1000 kPa.

d) AS DIMENSÕES DO CORPO-DE-PROVA.

Como a concepção do equipamento visava torná-lo tão pequeno e leve quanto possível, o tamanho da amostra utilizada compatibilizou-se com esse objetivo. Assim, o corpo-de-prova deve ser moldado com diâmetro de 38,4 mm e altura de 13,3 mm, o que proporciona uma relação $D/H = 2,89$, abaixo da usualmente aconselhada.

II.5.4- ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO REALIZADOS NO APARELHO TRICON.

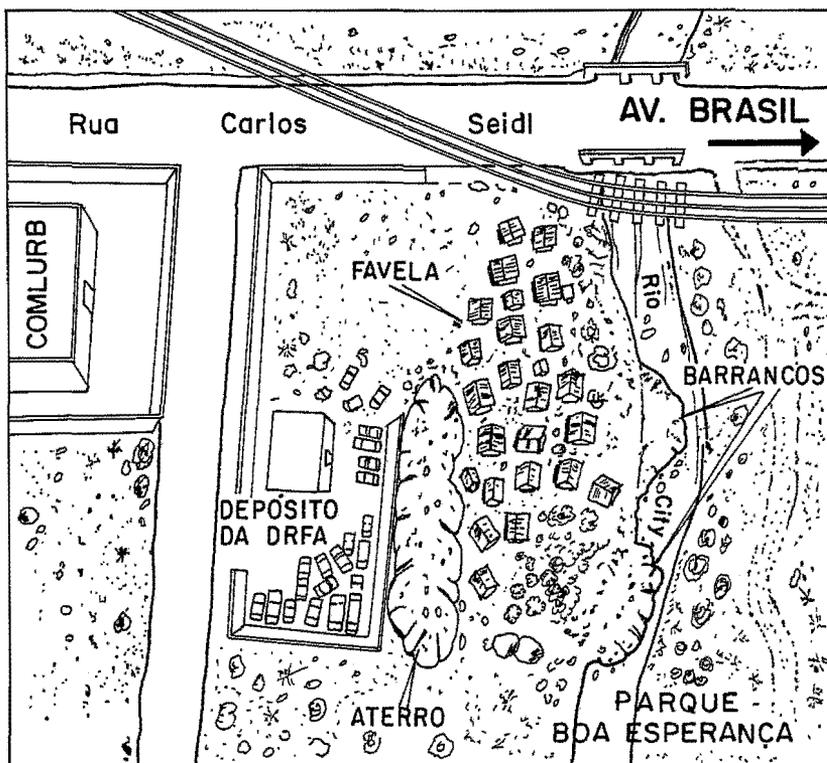
II.5.4.1- INTRODUÇÃO.

Com o objetivo de determinar a eficiência e a potencialidade do TRICON, estabeleceu-se um programa de ensaios edométricos cujos resultados foram objeto de comparação com aqueles obtidos em equipamento convencional. A seguir, descrevem-se esses experimentos.

II.5.4.2- DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS.

ARGILA DO CAJU.

As amostras do primeiro material ensaiado foram obtidas no aterro sanitário do Caju, próximo ao km 0 da Avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. Trata-se de uma argila mole, cinza, do depósito da Baixada Fluminense, com aspectos tácteis-visuais bastante semelhantes aos encontrados na argila do Sarapuí. Na figura (II.11) apresenta-se uma planta geral da região, salientando-se o local em que se procedeu à amostragem.



DETALHE DA REGIÃO ASSINALADA



FIG. II.11 - Localização do Aterro Sanitário do Caju.
(APUD CUNHA, 1988)

Conforme se pode observar na figura (II.12), o perfil geológico, na vertical sob o furo SM10-1A, é composto de um aterro sanitário com espessura aproximada de 5,5 m, assente sobre uma camada de cerca de 12,0 m de argila siltosa com matéria orgânica, cinza escura, com mica e fragmentos de valva, com consistência muito mole a mole. Subjacente a esta, há uma camada de areia fina e média com mica, cinza claro, pouco compacta a compacta. Cabe registrar, nesse ponto, que uma descrição pormenorizada das características desse depósito de argila mole e da metodologia utilizada na extração de amostras foi elaborada por CUNHA (1988).

Visando caracterizar o material, foram feitos ensaios para determinação do limite de liquidez, do limite de plasticidade, da densidade real dos grãos e da composição granulométrica. A caracterização completa das amostras extraídas em todos os perfis de sondagem foi publicada por CUNHA (1988).

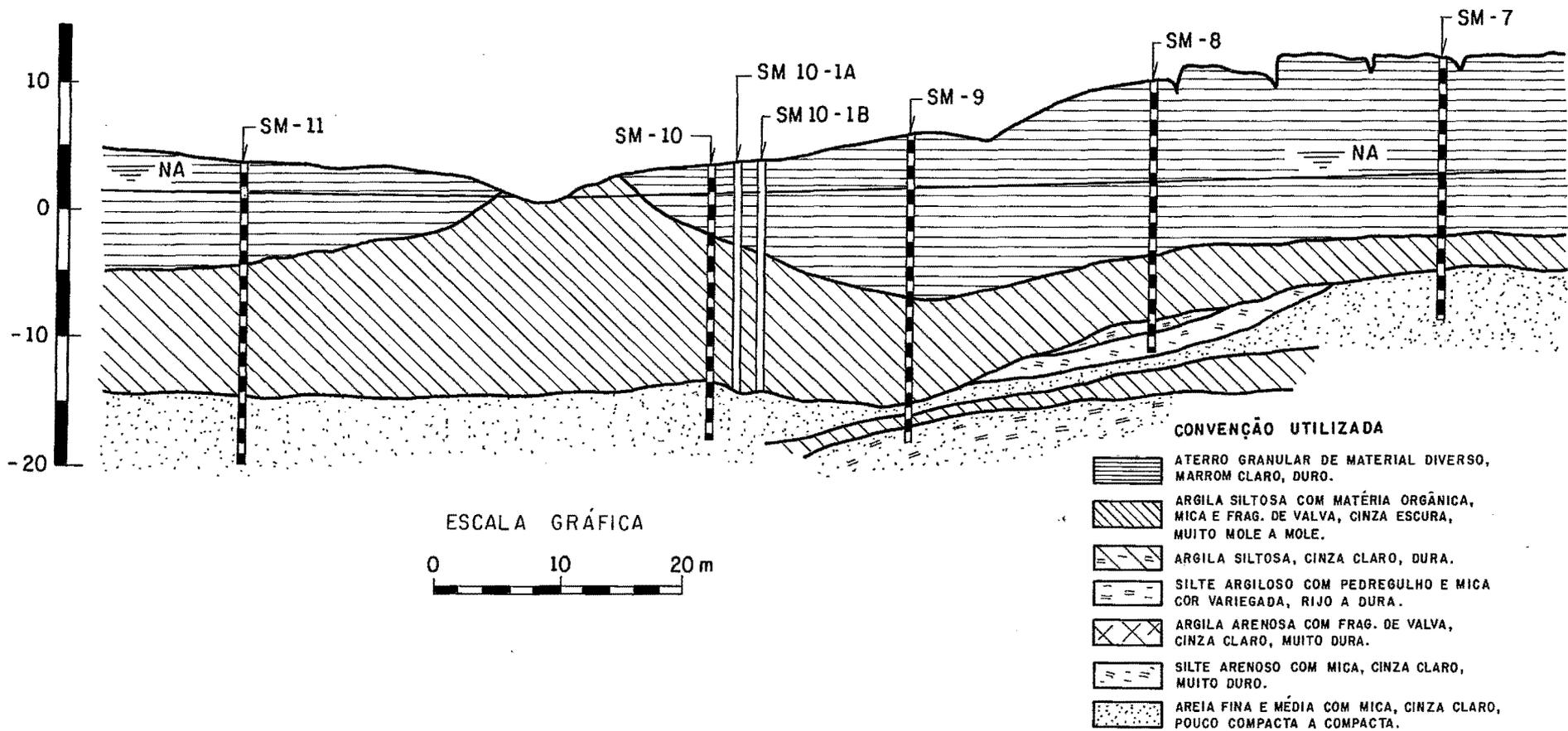


FIG. II.12 - Perfil geológico da linha de sondagem N^o1.
(APUD CUNHA, 1988)

ARGILA DO SARAPUÍ.

O segundo material ensaiado é proveniente da Baixada Fluminense, km 7,5 da rodovia BR-040, onde se encontram os aterros experimentais do IPR. Nesse local há um depósito de argila mole, de cor cinza, com teor de matéria orgânica da ordem de 5% e espessura aproximada de 11,0 m. O valor do número de golpes verificado no "SPT", geralmente, é nulo em toda a camada de argila mole. Subjacente a esta, existem sedimentos arenosos mais resistentes, com valor de "SPT", a 15,0 m de profundidade, atingindo 30 golpes/30 cm.

Visando à obtenção de amostras indeformadas, foram abertos dois furos de sondagem revestidos com tubo de aço de diâmetro interno de 152,4 mm, cuja localização é apresentada na figura (II.13). O modelo de amostrador utilizado é o de pistão estacionário com tubo de parede fina de diâmetro interno de 124 mm, comprimento de 600 mm e espessura 1,5 mm. Entre as precauções tomadas para a execução da amostragem, ressaltam-se as seguintes:

- a) Ter extremo cuidado na limpeza do furo, o que pode ser feito com o auxílio de trado;
- b) Controlar o comprimento de cravação;
- c) Manter um tempo de espera entre a cravação do tubo e a sua retirada, visando permitir boa aderência da argila à parede interna e, assim, obter boa recuperação.

Em seguida à extração, as amostras foram transportadas para a câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ e colocadas na posição vertical.

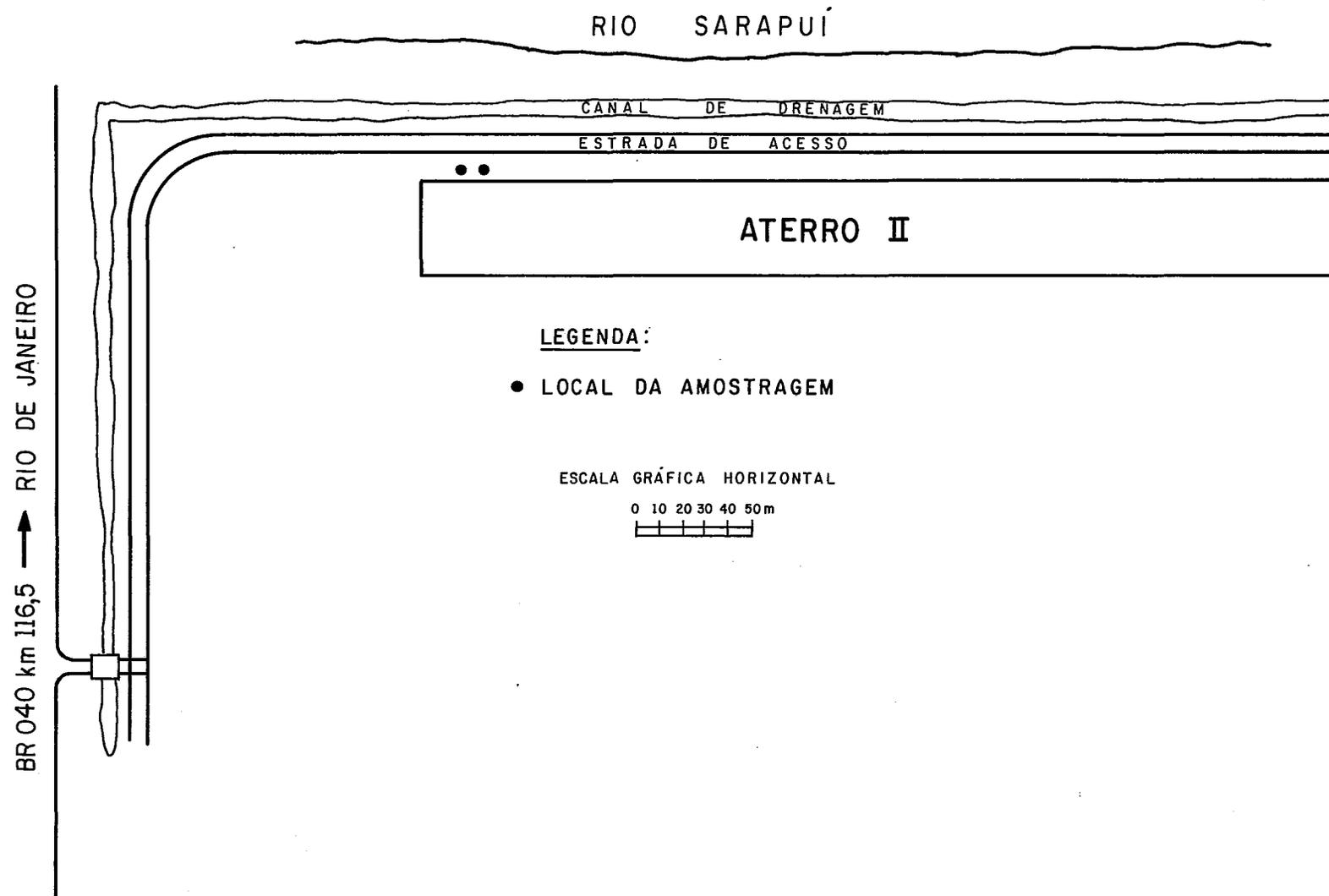


FIG. II.13 - Localização dos furos de sondagem (Argila do Sarapuí).

II.5.4.3- PROCEDIMENTOS DE ENSAIO.

a) ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO NO TRICON.

Para extrusão das amostras, instalou-se o extrator na posição vertical e colocou-se o tubo de modo que o movimento ascendente da massa de solo coincidisse com o ocorrido no processo de amostragem no campo. A expulsão do material foi executada por etapas e em cada uma delas cortou-se o excedente à volta do anel de adensamento, cuja cravação lenta e contínua era feita na parte central da amostra. Seguiu-se a recomendação de lubrificar a parede interna do anel com graxa de silicone.

A seguir, fez-se a cravação do anel, já contendo o corpo-de-prova arrasado nas duas superfícies, sobre a pedra porosa superior colocada em um suporte especial, de forma que houvesse uma pequena penetração. Tal providência evita problemas de centralização da placa de topo e, para efetivá-la, é necessário dispor as peças de acordo com o que se mostra na figura (II.14). O anel utilizado tem diâmetro interno de 38,4 mm, altura de 15 mm e espessura de 2,7 mm.

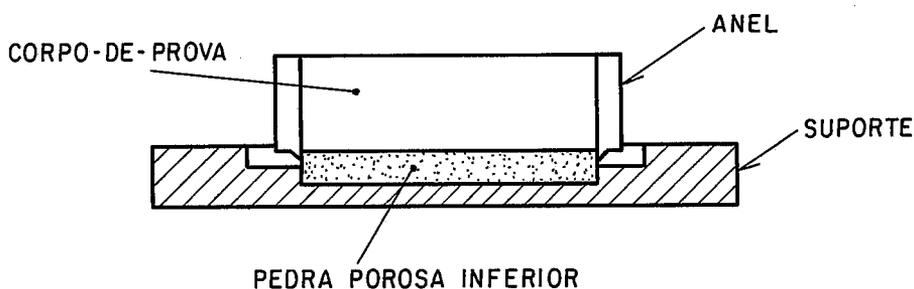


FIG. II.14 - Etapa final da moldagem do corpo-de-prova no "TRICON" (APUD PARRY, 1977).

Logo após a moldagem do corpo-de-prova, montou-se a célula de adensamento conforme apresentado na figura (II.15). Precedendo essa operação, as pedras porosas já haviam sido mergulhadas em água destilada, fervidas e resfriadas.

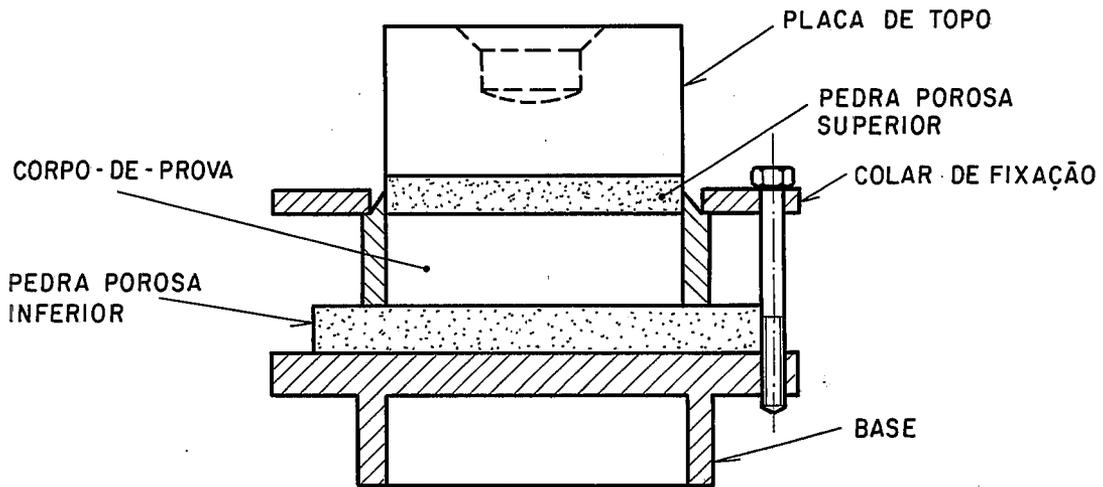


FIG. II.15 - Célula de adensamento do "TRICON" com seus principais componentes (APUD PARRY, 1977).

Girando-se a manivela no sentido anti-horário, acionava-se a engrenagem e, em movimento lento, fazia-se descer a haste metálica central. Observando-se o extensômetro maior, detectava-se o momento em que a placa de topo era tocada levemente pelo elemento terminal do sistema de transmissão de força. Efetuavam-se, então, as leituras iniciais dos dois extensômetros. Em seguida, aplicava-se a tensão total desejada, verificando-se o número de divisões acusado pelo extensômetro maior. A partir desse ponto, procedia-se às leituras de deslocamento vertical em função do tempo, consoante critérios usuais do ensaio convencional.

Para minimizar os efeitos da relaxação da mola, dois procedimentos podem ser adotados:

- 1) Ajuste do extensômetro maior, de tal forma que se mantenha fixo durante todo o ensaio o número de divisões estabelecido para a tensão total desejada;

2) Correção do valor da tensão vertical efetiva após o término do estágio de carregamento, descontando-se o percentual de perda relativo à relaxação.

Nos ensaios realizados deu-se preferência ao primeiro método, pois verificou-se que a monitoração da força imposta ao corpo-de-prova era necessária somente nos cento e vinte minutos iniciais, sendo desprezíveis os valores da perda ocorrida por relaxação após esse tempo. Essa operação não causava transtorno ao executor do ensaio porque, normalmente, já eram efetuadas diversas leituras no intervalo das duas primeiras horas, o que o obrigava a estar presente e com a atenção voltada para o equipamento nesse período. Observou-se, também, que o valor médio da perda de carga por relaxação da mola estava situado na faixa de 0,5%.

b) ENSAIOS EDOMÉTRICOS CONVENCIONAIS PARA FINS COMPARATIVOS.

Foram ensaiadas seis amostras, sendo duas na argila do aterro sanitário do Caju e quatro na argila do Sarapuí. No primeiro caso, os corpos-de-prova foram moldados em anéis de aço inoxidável com 20 mm de altura e diâmetro interno de 87,5 mm, enquanto que no segundo, essas dimensões tinham, respectivamente, valores de 30,3 mm e 100,6 mm, para as células marrom e azul, e 19,4 mm e 50,9 mm, para as células cinza.

O procedimento relativo aos ensaios na argila do aterro sanitário do Caju foi descrito por CUNHA (1988), restando a este trabalho reportar o método referente aos experimentos edométricos na argila do Sarapuí.

Quanto à extrusão do material e à moldagem de corpos-de-prova, observaram-se as normas seguintes:

- 1) Manter o extrator na vertical e fazer com que a massa de solo seja extraída em movimento de ascenso idêntico ao que ocorreu no campo;
- 2) Lubrificar o anel com graza de silicone;
- 3) Cravar o anel de adensamento de forma lenta e contínua, fazendo interrupções para cortar o material excedente.

Utilizou-se papel-filtro saturado Whatman nº 54 de permeio às superfícies inferior e superior da amostra e as pedras porosas. Estas foram previamente fervidas em água destilada e resfriadas.

A prensa para realização dos ensaios é a do tipo Bishop, com relação de braço de alavanca para aplicação de carga 1:10 ou 1:11. Este equipamento foi calibrado segundo os preceitos recomendados por HEAD (1986).

Os deslocamentos verticais foram lidos em extensômetros de sensibilidade de 0,01 mm/divisão (células marrom e azul) e 0,002 mm/divisão (célula cinza).

O controle rigoroso da temperatura foi assegurado pela realização de ensaios em um compartimento especial do laboratório, cujas paredes são revestidas com madeira e isopor para minimizar a troca de calor com o meio externo. Nesse local encontram-se instalados três aparelhos de ar condicionado que permitem manter a temperatura em $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A seqüência de carregamento obedeceu a um valor unitário da razão $\Delta\sigma/\sigma_i$, com estágios de vinte e quatro horas de duração.

II.6- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS NO TRICON E NO EQUIPAMENTO CONVENCIONAL.

Nas figuras (II.16) a (II.19) expõem-se as curvas deformação específica vertical (%) x tensão efetiva vertical (escala logarítmica).

Nas figuras (II.20) e (II.21) apresentam-se gráficos típicos deformação específica vertical (%) x tempo (esc.log.).

As curvas c_v x σ_v (esc.log.) são mostradas nas figuras (II.22) a (II.24). Os valores de coeficiente de adensamento foram obtidos pelo método de Taylor.

II.7- DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

II.7.1- ENSAIOS NA ARGILA DO ATERRO SANITÁRIO DO CAJU.

Nas duas amostras ensaiadas, extraídas nas profundidades de 11,0 m a 12,0 m e 17,0 m a 18,0 m, adotou-se uma razão $\frac{\Delta\sigma}{\sigma_i} = 0,5$ na

vizinhança da tensão de sobreadensamento, com o intuito de melhor definir esse parâmetro que caracteriza a história de tensões do solo.

Os estágios de carga foram conduzidos com a inclusão de um laço

de descarregamento e recarregamento, para que a curva virgem de campo pudesse ser estimada pelo método de SCHMERTMANN (1955). À falta do conhecimento do valor real de $\sigma_{\downarrow 0}$, esse objetivo não se concretizou.

As curvas $\epsilon_v \times \sigma_{\downarrow}$ (esc. log.) dos ensaios realizados no TRICON e no equipamento convencional caracterizam-se por apresentar fortes evidências de que o material se encontrava amolgado. A elevada declividade do trecho de recompressão e o caráter retilíneo do trecho virgem incluem-se entre os fatores conducentes a tal asseveração, segundo MARTINS (1983).

No que se refere ao coeficiente de adensamento, observa-se que as curvas $c_v \times \sigma_{\downarrow}$ (esc. log.) mostram dispersão dos resultados na faixa das tensões menores que $\sigma_{\downarrow m}$. A tendência dos valores de c_v é de declínio até a tensão de sobreadensamento e relativa constância para tensões superiores a esta. No caso dos ensaios conduzidos no equipamento TRICON, o coeficiente de adensamento, no intervalo de tensões acima de $\sigma_{\downarrow m}$, alcançou valores que estão em boa consonância com os obtidos no equipamento convencional.

Os diagramas $\epsilon_v \times t$ (esc. log.) evidenciam, conforme antecipado por LEONARDS e ALTSCHAEFFL (1964), que não se obtêm as curvas previstas pela Teoria de Terzaghi-Fröhlich quando $\Delta\sigma/\sigma_i$ não é suficientemente elevado (no caso, seu valor é 0,5). Em vista disso, o método de Casagrande, que faz uso do gráfico $\epsilon_v \times t$ (esc. log.), não pôde ser adotado para estimar c_v nos estágios de carregamento inferiores a 40 kPa.

II.7.2— ENSAIOS NA ARGILA DO SARAPUÍ.

Os ensaios edométricos convencionais e os executados no TRICON, em amostras coletadas nas profundidades de 4,0 m a 4,5 m e 7,0 m a 7,5 m, apresentam curvas $\epsilon_v \times \sigma_{\downarrow}$ (esc. log.) concordantes em um grau bastante razoável. O material utilizado exhibe um trecho virgem que não é retilíneo e pequena declividade no trecho de recompressão, aspectos estes que indicam sua boa qualidade.

Os gráficos $\epsilon_v \times \sigma_{\downarrow}$ (esc. log.) dos ensaios executados no TRICON, em geral, situam-se ligeiramente acima dos correspondentes aos mesmos experimentos em equipamento convencional. As razões que podem ser apontadas para esse fenômeno são as seguintes:

- a) As deformações do solo na compressão induzem uma relaxação da mola;
b) A relação D/H (2,89) é ligeiramente menor que a encontrada usualmente (entre 3 e 4), o que pode aumentar o atrito entre a amostra e a parede lateral do anel de adensamento.

As curvas $\epsilon_v \times t$ (esc. log.) mostram-se compatíveis com o modelo previsto pela teoria de Terzaghi-Fröhlich. Por essa razão, pode-se empregar o método de Casagrande para determinação de t_{50} e c_v .

Os diagramas do coeficiente de adensamento \times tensão vertical efetiva (esc. log.), no trecho de tensões acima de σ'_{vm} , mostram valores coerentes com as faixas encontradas por COUTINHO (1976) e DUARTE (1977). Houve grande concordância dos valores de c_v obtidos no TRIGON com os provindos do equipamento convencional.

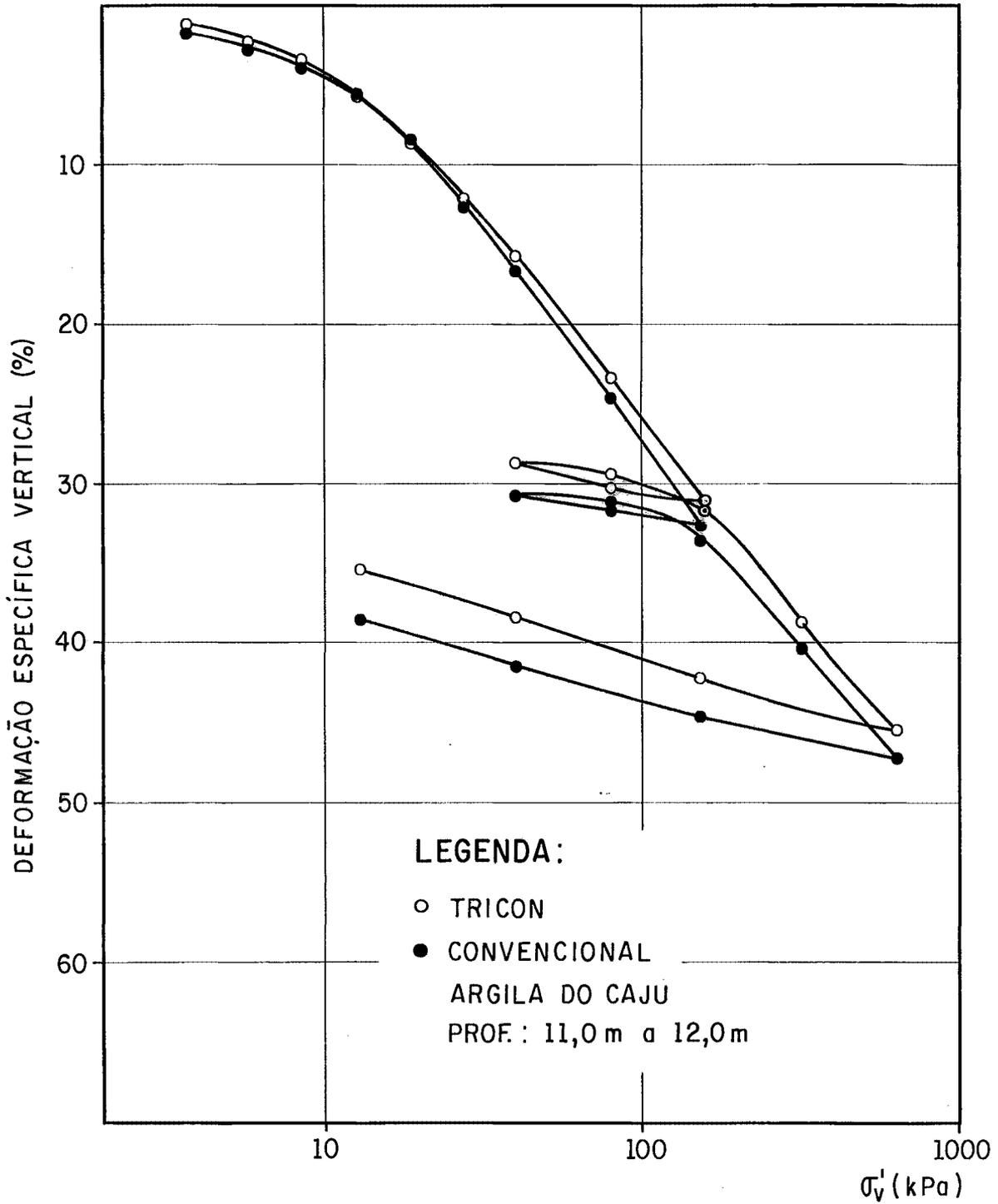


FIG. II.16 - Curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc. log.) de ensaios edométricos.

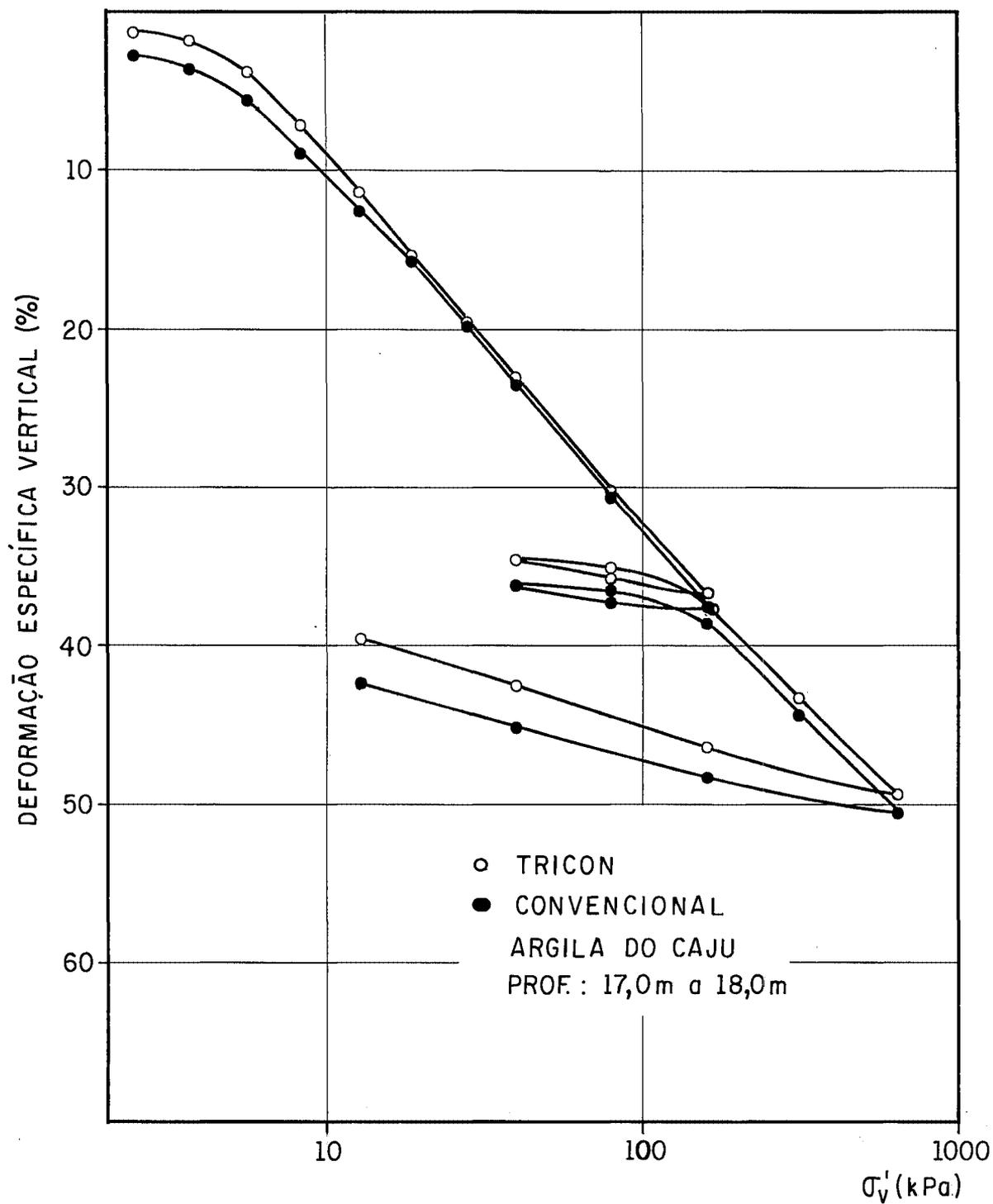


FIG. II.17 - Curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc. log.) de ensaios edométricos.

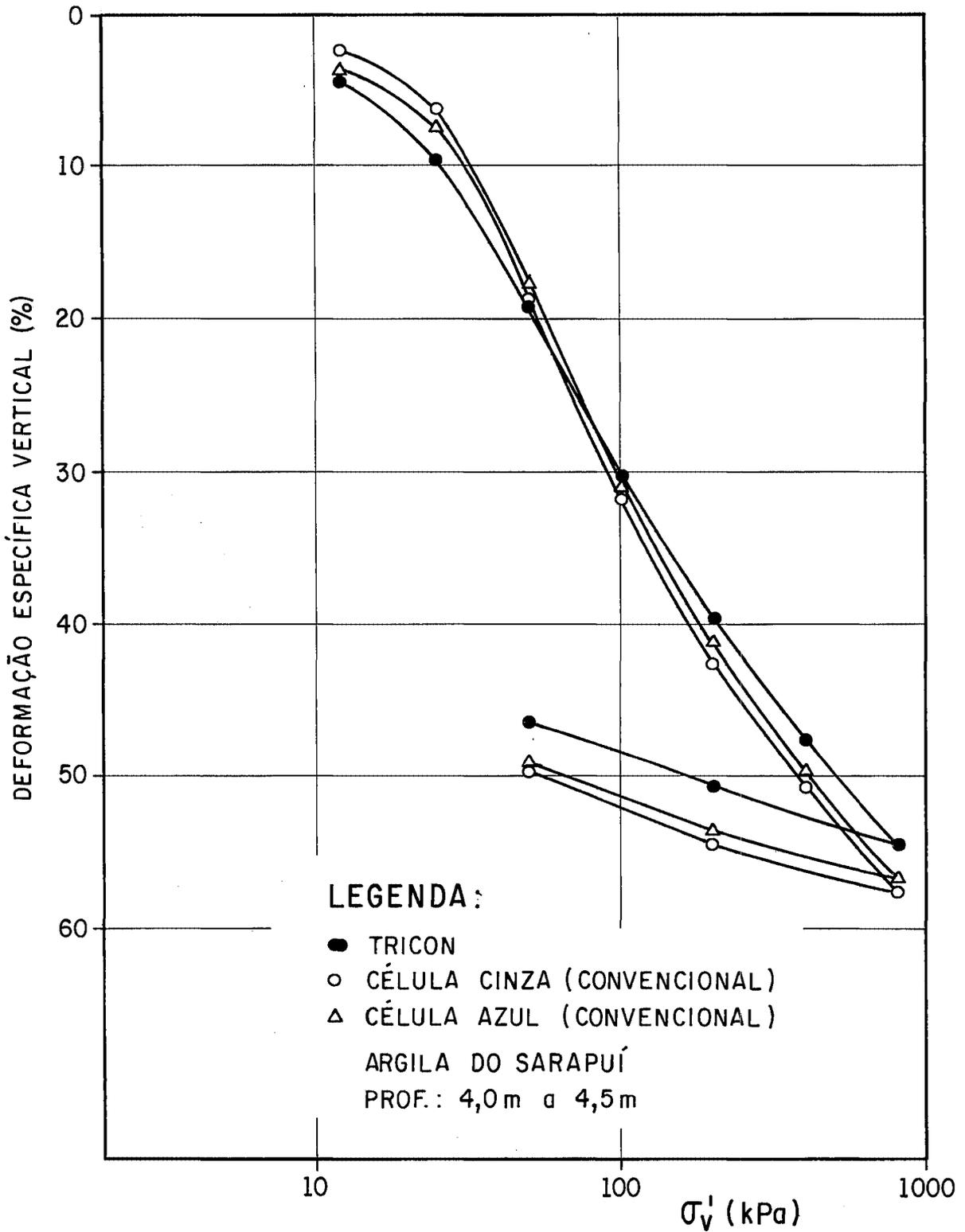


FIG. II.18 - Curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc. log.) de ensaios edométricos.

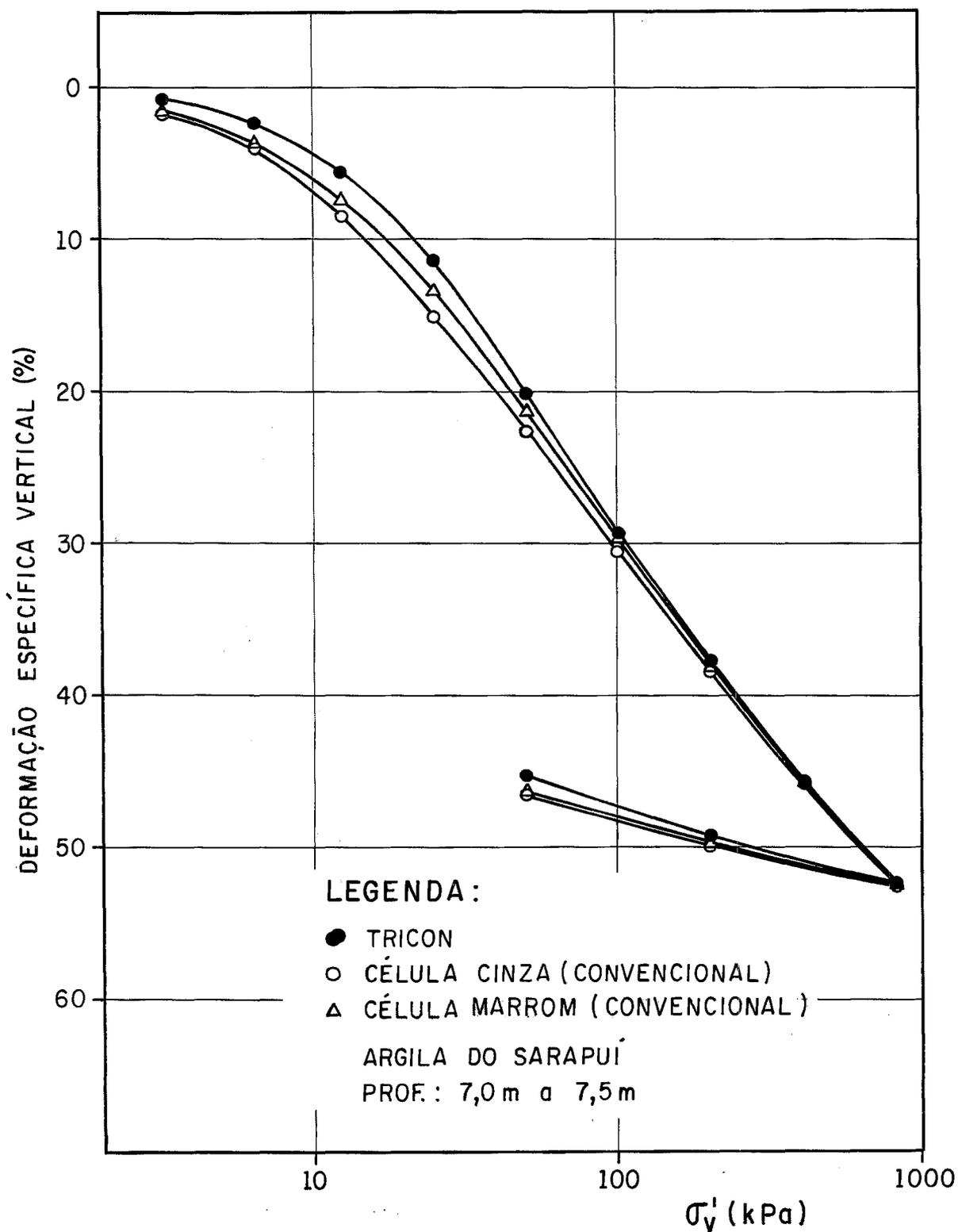


FIG. II.19 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) de ensaios edométricos.

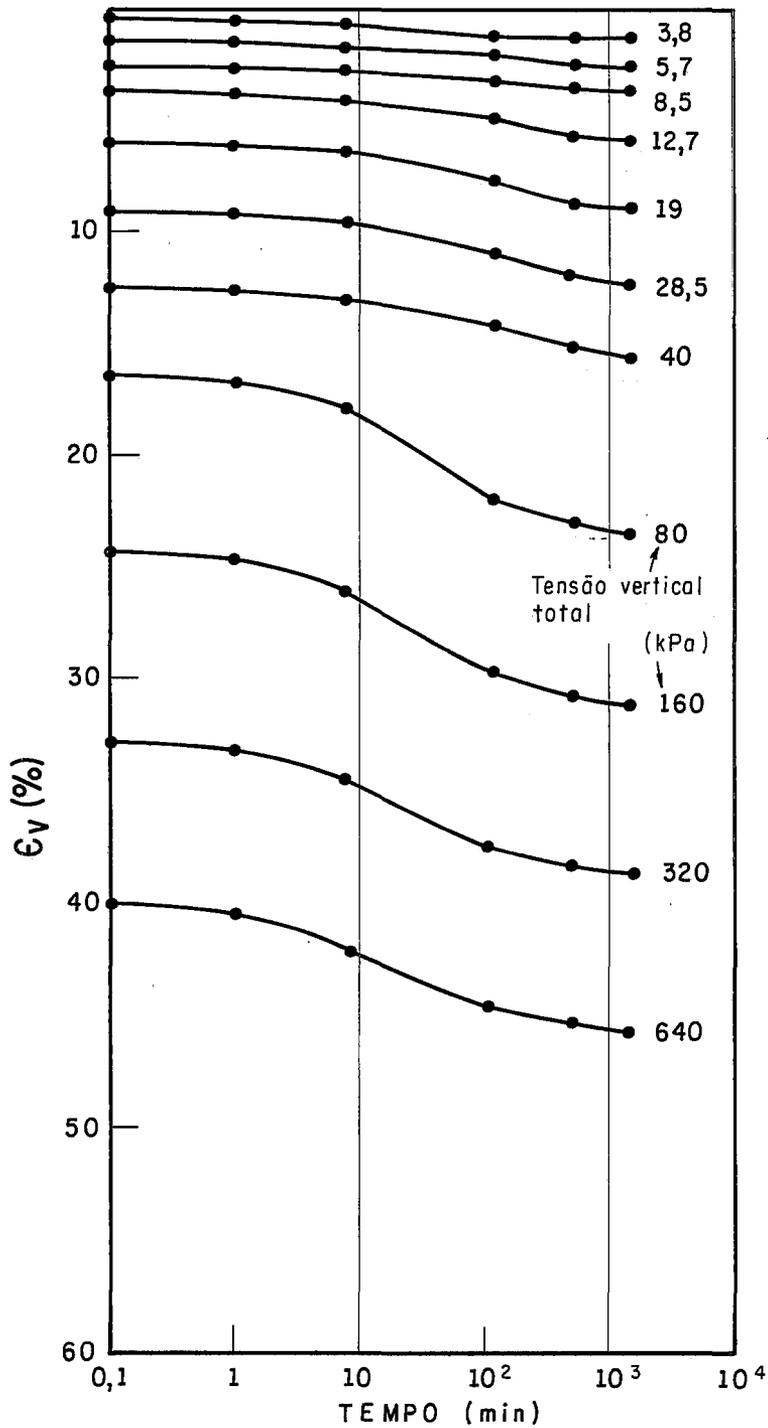


FIG. II.20 - Curvas deformação específica vertical x tempo do ensaio de adensamento no "TRICON" Argila do aterro sanitário do Caju - Prof.: 11,0 m a 12,0 m.

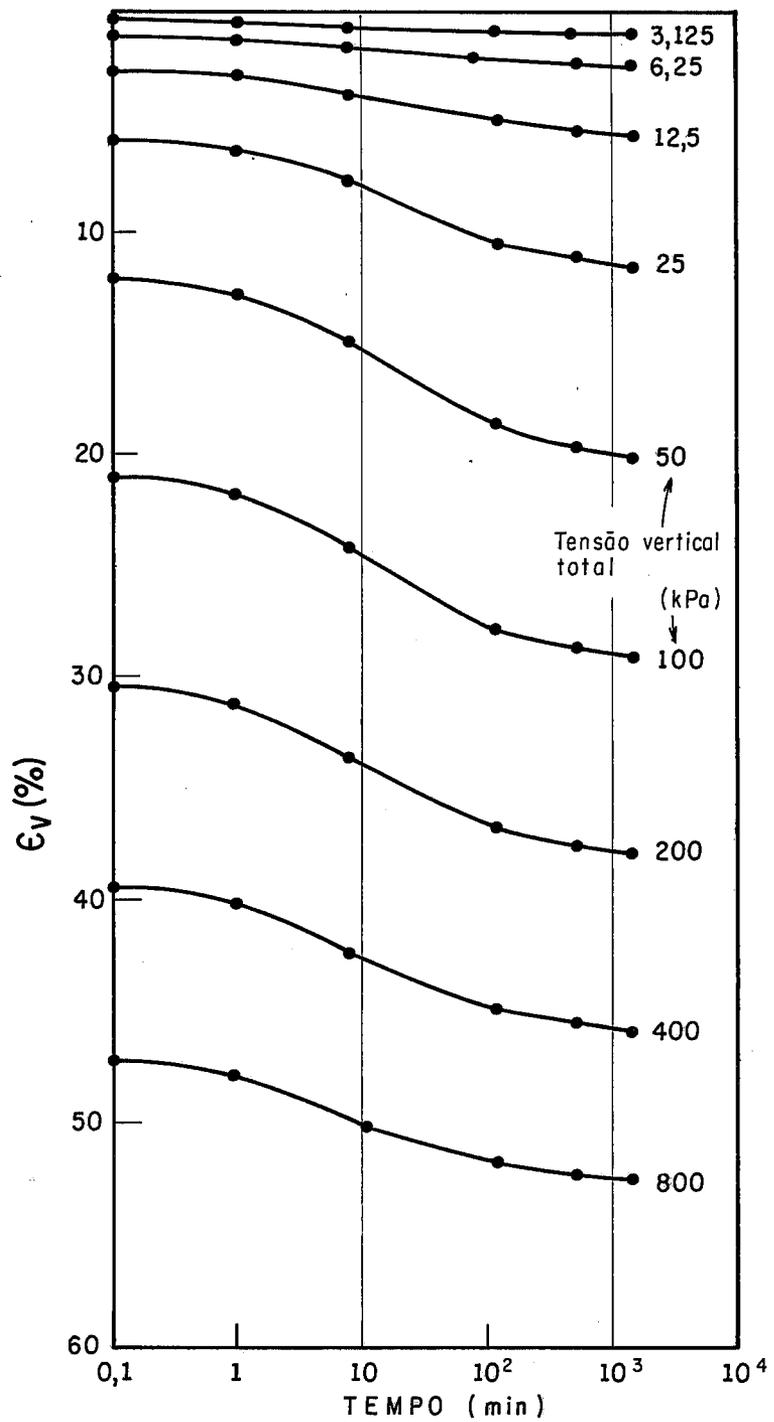


FIG. II. 21 - Curvas deformação específica vertical x tempo do ensaio de adensamento no "TRICON".
Argila do Sarapuí - Prof. : 7,0 m a 7,5 m

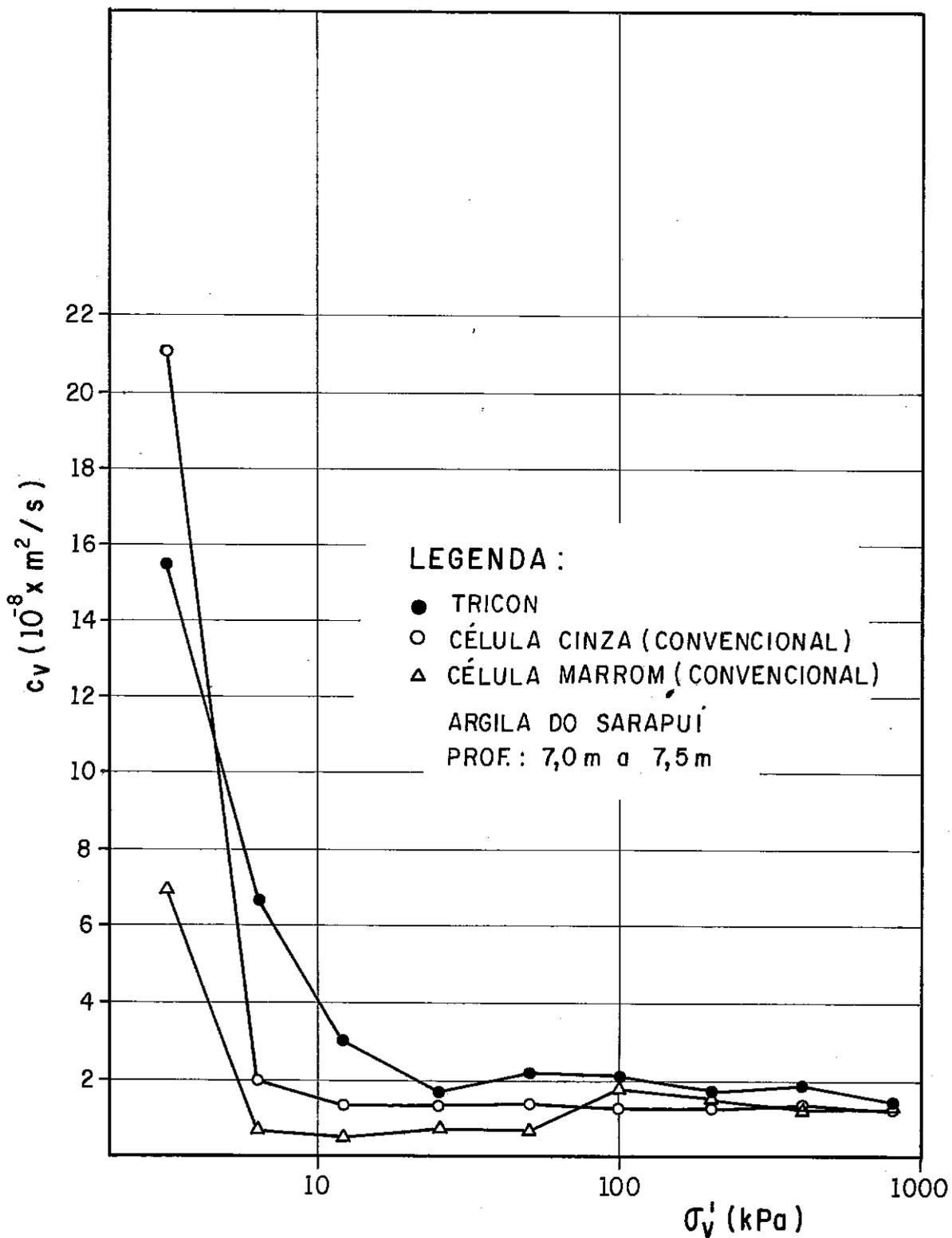


FIG. II.22 - Curvas $c_v - \sigma_v'$ (esc. log.) de ensaios edométricos.

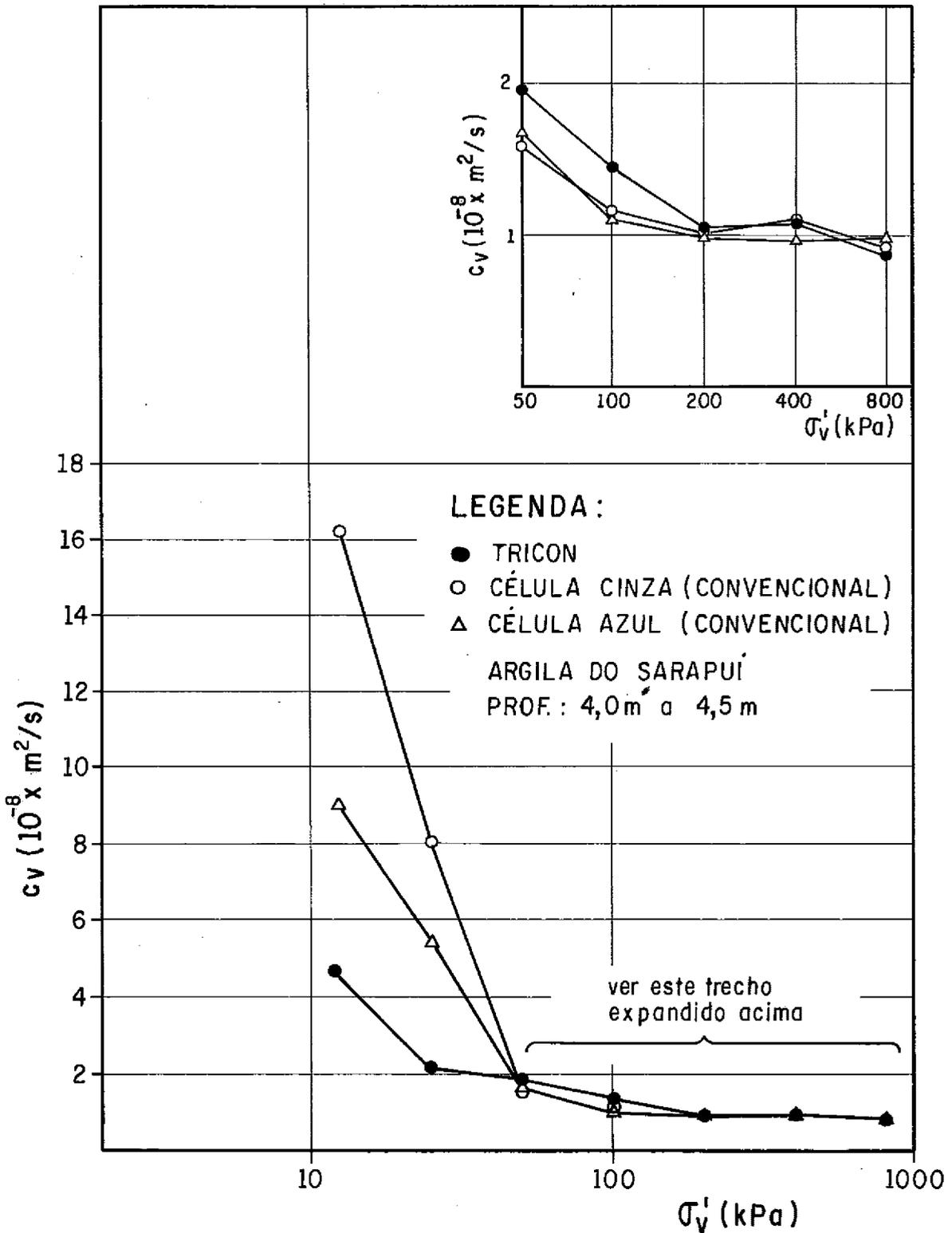
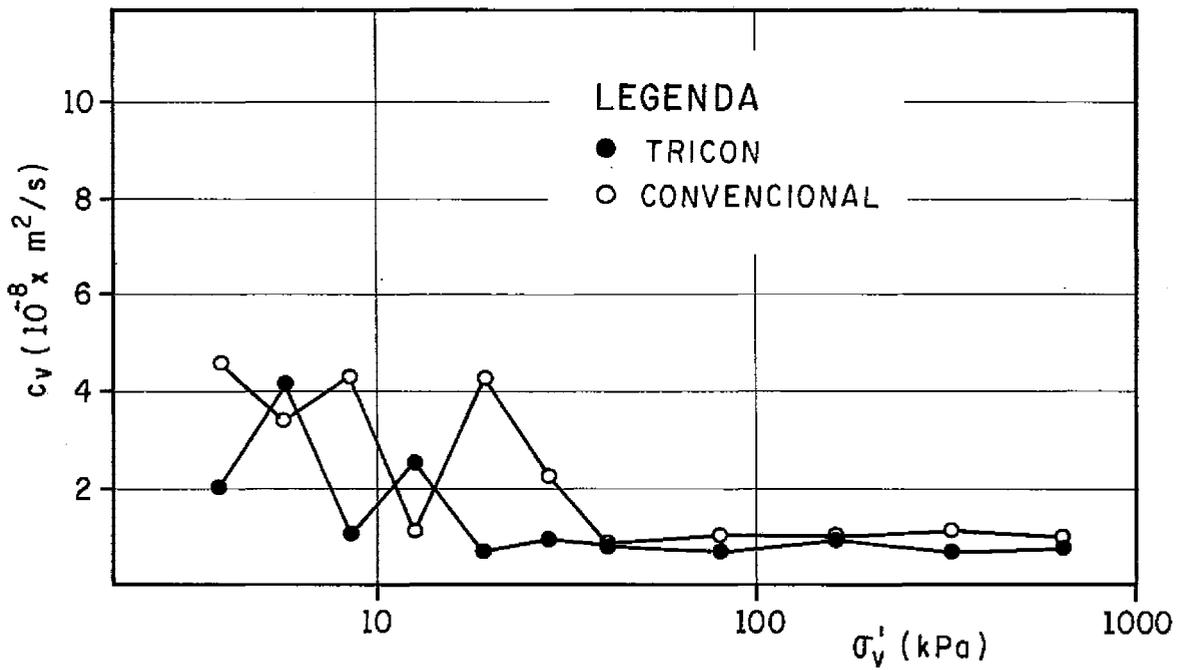
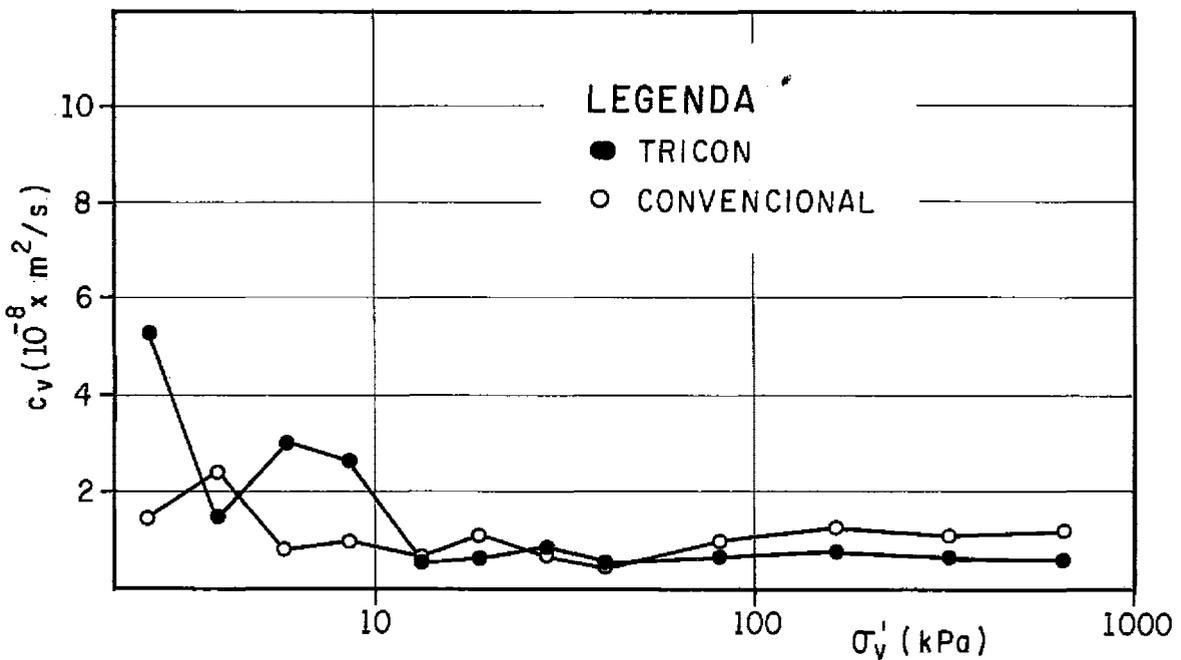


FIG. II.23 - Curvas $c_v - \sigma_v'$ (esc. log.) de ensaios edométricos.



(a) Prof. : 11,0 a 12,0 m



(b) Prof. : 17,0 a 18,0 m

FIG. II.24 - Curvas $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log.) de ensaios edométricos - Argila do Caju - SMIO - IA.

II.8- ANÁLISE CRÍTICA DO TRICON, NO QUE SE REFERE A ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO.

A concepção desse aparelho, cujo nome deriva das iniciais em língua inglesa de experimentos triaxiais e de adensamento, tomou por base a necessidade de construir um equipamento versátil e de pequeno porte para uso no campo, em unidades laboratoriais móveis. Dessa forma, busca-se reduzir o manuseio dos materiais obtidos na amostragem e o tempo entre sua coleta e a execução do ensaio.

Em decorrência dos objetivos que fundamentaram o projeto do TRICON, tornou-se necessário usar amostras bem menores que as aconselhadas para os ensaios de adensamento edométrico convencionais. Tal fato resultou em algumas limitações, a seguir citadas:

- a) A razão entre o diâmetro e a altura do anel de adensamento é relativamente inferior à recomendada, o que pode introduzir erros maiores que os usuais, em virtude da ocorrência mais acentuada de atrito entre a amostra e a parede interna;
- b) O grau de amolgamento de um corpo-de-prova com D/H pequeno pode ser maior que o encontrado naqueles em que essa razão é grande;
- c) A mola se deforma quando a amostra se comprime ou se expande, o que provoca perda da tensão total aplicada.

Quanto à relaxação da mola, pode-se dizer que seus efeitos são reduzidos a um mínimo com o procedimento do item II.5.4.3 a.

Entre as vantagens do TRICON em relação à aparelhagem convencional de ensaio de adensamento edométrico, podem ser alinhadas as seguintes:

- 1) A versatilidade é a principal característica desse equipamento, o qual reúne a um só tempo as qualidades de ser portátil e totalmente desmontável;
- 2) Os aspectos do item anterior particularizam o TRICON e podem ser confirmados pela simples observação de que todas as suas peças são acondicionadas em uma maleta de 50 cm x 27 cm x 32 cm e têm massa total de cerca de 10 kg;
- 3) Os custos envolvidos são inferiores;
- 4) O TRICON é bastante adequado para finalidades didáticas, podendo ser

levado a uma sala de aula, já que não utiliza pesos aferidos na aplicação de carga e tem dimensões reduzidas;

- 5) Os experimentos podem ser realizados no campo em uma unidade móvel e no laboratório, o espaço ocupado é reduzido;
- 6) Nos laboratórios de campo, dadas as suas peculiaridades, é necessário trabalhar com aparelhos compactos. O TRICON preenche muito bem esse requisito, o que tem motivado a sua utilização, por exemplo, em investigações geotécnicas realizadas na costa oceânica.

CAPÍTULO III.

ENSAIOS ESPECIAIS DE ADENSAMENTO
UNIDIMENSIONAL.

III.1— INTRODUÇÃO.

Depois de mais de meio século de uso, o ensaio de adensamento edométrico convencional não sofreu acentuadas alterações nos procedimentos experimentais e no método de análise, os quais obedecem a normas já padronizadas na maioria dos laboratórios. É, ainda, largamente utilizado nos dias atuais porque reúne duas qualidades atraentes: simplicidade de execução e uma metodologia bem definida para interpretar os resultados.

Visando superar a principal deficiência detectada no ensaio convencional—o dispêndio excessivo de tempo—, foram desenvolvidos diversos equipamentos e técnicas nos últimos vinte e cinco anos. Os avanços alcançados na consecução desse objetivo são fruto, principalmente, do desenvolvimento da Eletrônica, da Informática e das indústrias de bens de capital. Quanto à primeira, é de se registrar o progresso substancial, em matéria de rapidez, resolução e eficiência, representado pelos transdutores elétricos; quanto à segunda, deve-se dizer que a aquisição e o processamento automático de dados permitiram a realização de ensaios especiais de adensamento em condições de economia de tempo e ampliação de horizontes na análise de resultados; por fim, é preciso assinalar a importância dos aperfeiçoamentos introduzidos pelo emprego dos diafragmas rolantes de borracha (e.g., do tipo "Bellofram"), de servo-mecanismos no controle dos processos de ensaio e de peças para carregamento hidráulico e pneumático.

Os pesquisadores da área de Geotecnia que têm envidado esforços na busca desses métodos e aparelhagens inovadoras aspiram ao conhecimento aprofundado das relações tensão-deformação-tempo dos solos, procurando determinar de forma econômica, confiável e rápida os parâmetros intervenientes no fenômeno do adensamento. Surgiram, assim, variados modelos de experimento nesse campo da Mecânica dos Solos, cuja descrição, restrita aos casos de carregamento continuamente crescente com o tempo, faz-se a seguir.

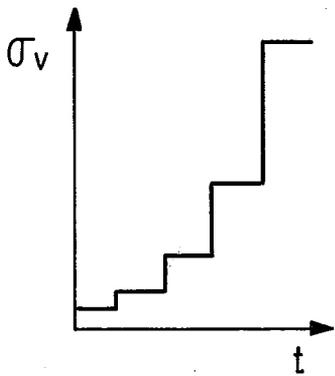
III.2- PRINCÍPIOS GERAIS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM CARREGAMENTO CONTINUAMENTE CRESCENTE COM O TEMPO

Na figura (III.1) são apresentados, sinoticamente, os padrões de carregamento característicos desses ensaios e, também, o procedimento convencional de aplicação de carga por incrementos.

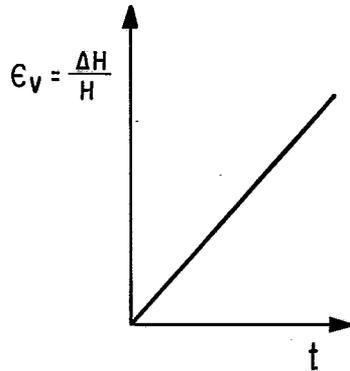
Os ensaios de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo exigem células especiais e medições de sobrepressões hidrostáticas, em geral, efetuadas na base. Usualmente, a drenagem se processa na extremidade superior. Os outros parâmetros medidos são: a força aplicada, o deslocamento da superfície de topo e, eventualmente, o volume de fluido drenado.

No que se refere ao tipo de corpo-de-prova, pode-se dizer que suas dimensões são equivalentes às normalmente recomendadas para ensaios de adensamento convencionais.

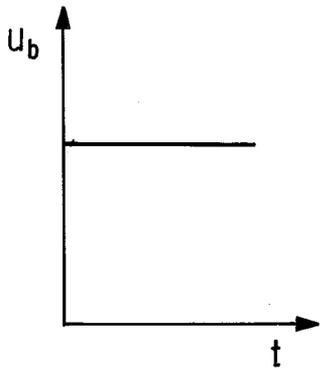
Segundo ALMEIDA (1988), para executar esses ensaios especiais, pode-se prescindir de registro automático de dados, porém, é desejável tê-lo à disposição. Convém, ainda, salientar que nos casos mais sofisticados há necessidade de automação completa tanto da parte operacional quanto do sistema de aquisição de dados.



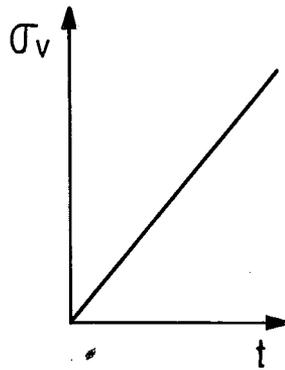
(a) Ensaio edométrico convencional.



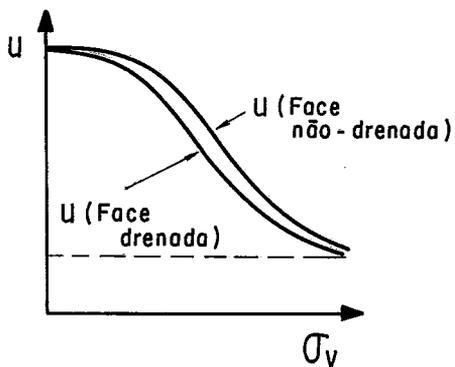
(b) Ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.



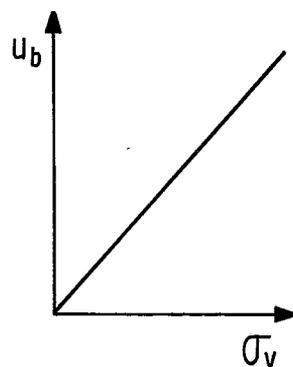
(c) Ensaio com gradiente controlado.



(d) Ensaio com velocidade de carregamento constante.



(e) Ensaio com fluxo restringido.



(f) Ensaio com razão $u_b/\sigma_v = \text{constante}$.

FIG. III.1 - Tipos de ensaios de adensamento.
(APUD HEAD, 1986).

III.3— ENSAIO DE ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.

Como essa modalidade de experimento será objeto de minudente estudo nos capítulos IV, V, VI e VII, apresenta-se aqui somente um epítome dos aspectos mais importantes, a fim de garantir a inteireza da abordagem do tema relativo a ensaios de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo.

Releva registrar que, entre os ensaios de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo, o que mantém $\dot{\epsilon}_v =$ constante foi um dos primeiros propostos na literatura técnica, tendo, originalmente, o objetivo de conferir rapidez à estimativa da tensão de sobreadensamento (HAMILTON e CRAWFORD, 1959). A partir de então, foram criados diversos equipamentos e técnicas para sua execução e cálculo, devendo-se citar os trabalhos de SMITH e WAHLS (1969), WISSA et alii (1971) e GORMAN et alii (1978). Sua aplicação a materiais argilosos muito moles (rejeitos e lama) foi relatada por UMEHARA e ZEN (1980) e ZNIDARCIC et alii (1986).

III.3.1— A INTERPRETAÇÃO DO ENSAIO.

O primeiro desenvolvimento teórico, apresentado por SMITH e WAHLS (1969), guiou-se por uma formulação simplificada que levou em conta os conceitos de deformações finitas.

A seguir vieram a lume os artigos de WISSA et alii (1969, 1971). Neste último foi proposta uma extensa e completa análise, lastreada em deformações infinitesimais.

Soluções para o adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, à luz dos preceitos que envolvem deformações finitas, foram reportadas por UMEHARA e ZEN (1980), LEE (1981) e ZNIDARCIC et alii (1986).

III.3.2— O CÁLCULO DOS PARÂMETROS.

Durante o ensaio são efetuados registros intermitentes da força aplicada ao corpo-de-prova, da sobrepressão hidrostática na base e do deslocamento da placa de topo. Estes últimos podem ser cotejados com os valores da variação

de volume.

Com base nas leituras dessas grandezas e nas teorias mencionadas no item anterior, calculam-se o coeficiente de adensamento, o módulo edométrico, índice de vazios e deformação específica vertical. Desse modo, podem ser traçados gráficos representativos do ensaio, definindo-se curvas com um número suficiente de pontos para reduzir a um mínimo a interferência de fatores subjetivos na interpretação dos resultados.

III.3.3- COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO ENSAIO.

Balizando-se em dados expostos por diversos pesquisadores (e.g. CRAWFORD, 1964; SMITH e WAHLS, 1969; WISSA et alii, 1971; SÄLLFORS, 1975; GORMAN et alii, 1978; LEROUEIL et alii, 1983, LEROUEIL et alii, 1985; SILVESTRI et alii, 1986; SANDBAEKEN e LACASSE, 1986; LARSSON e SÄLLFORS, 1986 e LEROUEIL et alii, 1988), pode-se ressaltar o seguinte:

- a) Esse experimento tem sido cada vez mais utilizado porque permite obter parâmetros de compressibilidade dos solos em um intervalo de tempo bastante inferior ao usualmente gasto no ensaio edométrico convencional;
- b) Através de uma prensa mecânica, usualmente utilizada em ensaios triaxiais, pode-se aplicar tensão total a um corpo-de-prova, de forma que se mantenha uma taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo no ensaio edométrico aqui tratado;
- c) O fato citado no item anterior torna o equipamento necessário para realizar esse experimento um dos mais simples entre os vários tipos de ensaio de adensamento com carregamento continuamente crescente com o tempo que têm sido propostos;
- d) O ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ produz resultados de c_v tão confiáveis quanto os do convencional (OLSON, 1986);
- e) As curvas $\epsilon_v - \sigma_v$ permitem avaliar de maneira mais precisa as relações tensão-deformação-tempo, na medida em que se pode estudar a influência da velocidade de ensaio;
- f) A escolha da velocidade de ensaio é o ponto essencial a ser decidido previamente e ainda não existem critérios completos e bem definidos.

III.4- ENSAIO DE ADENSAMENTO COM GRADIENTE CONTROLADO.

III.4.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS.

De acordo com LOWE III et alii (1969), a concepção desse ensaio tomou por base a necessidade de atingir, precipuamente, três metas:

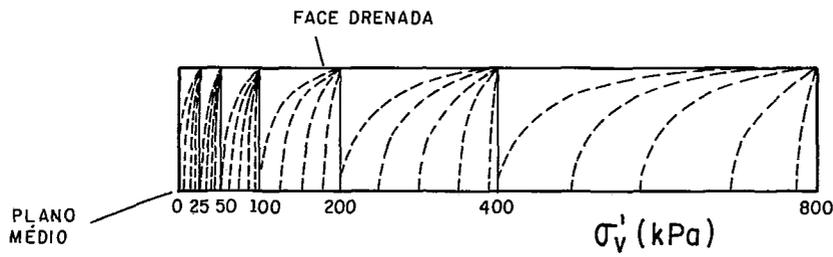
- 1) Estabelecer uma distribuição de tensões ao longo da amostra tão uniforme quanto possível;
- 2) Ter uma velocidade de ensaio baixa o suficiente para que se possa ajustá-la com facilidade no desenrolar da tarefa de manter constante a sobrepressão hidrostática na base;
- 3) Permitir a realização de ensaios com baixa $\dot{\epsilon}_v$, de modo que os dados assim obtidos possam ser extrapolados para a situação observada no campo, na qual os valores da taxa de deformação específica realcionada ao tempo são diminutos.

Definidos esses objetivos, criou-se o ensaio de adensamento unidimensional com gradiente controlado, cujas características mais importantes são:

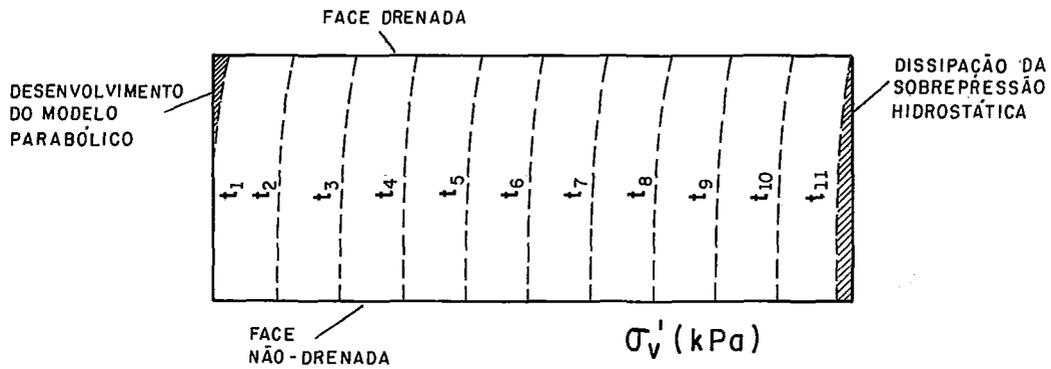
- a) Na face inferior é mantido uma sobrepressão hidrostática constante e pequena, aplicando-se gradualmente a tensão total ao corpo-de-prova;
- b) A sobrepressão hidrostática distribui-se segundo uma parábola e varia do valor estável gerado na base até zero na face drenada;
- c) A distribuição do item anterior, conforme mostra a figura (III.2), é independente do tempo e permanece inalterada durante todo o ensaio, à exceção de um curto período de transição no começo da aplicação do carregamento e no final, quando cessam os incrementos de carga e continua a dissipação das sobrepressões hidrostáticas;
- d) Adotando-se a técnica de interrupção do experimento em diferentes níveis de tensão total, obtêm-se informações a respeito da compressão secundária;
- e) A saturação do corpo-de-prova é feita por contrapressão.

III.4.2— A CONCEPÇÃO TEÓRICA DO ENSAIO.

A formulação teórica fundamenta-se na validade de todas as hipóteses simplificadoras da Teoria de Adensamento de Terzaghi e Fröhlich—à exceção de $\partial\sigma_v/\partial t = 0$ —e no fato de que durante o carregamento com gradiente controlado $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$. Posto isso, e considerando as condições de fronteira pertinentes ao ensaio, pode-se demonstrar as expressões matemáticas a seguir.



(a) Isócronas do ensaio convencional.



(b) Isócronas do ensaio com gradiente controlado.

FIG. III.2 - Comparação das sobrepressões hidrostáticas durante os ensaios convencional e com gradiente controlado.

(APUD LOWE III et al.,1969).

A sobrepressão hidrostática em toda a amostra distribui-se segundo um modelo parabólico definido pela equação:

$$u = u_b \left[1 - \left(\frac{z^2}{H^2} \right) \right] \quad (\text{III.1}).$$

O valor do coeficiente de adensamento é dado por:

$$c_v = \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t} \frac{H^2}{2u_b} \quad (\text{III.2}).$$

A equação de continuidade reduz-se a:

$$- \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (\text{III.3}).$$

III.4.3- COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO ENSAIO.

Analisando o ensaio de adensamento com gradiente controlado à luz dos resultados expostos em diversos trabalhos (GORMAN et alii, 1978; LEROUEIL et alii, 1985; SILVESTRI et alii, 1986), pode-se alinhar as seguintes conclusões:

- a) A realização de ensaios com distintos valores de sobrepressão hidrostática mantida na base permite verificar a influência de $\dot{\epsilon}_v$ no adensamento do solo;
- b) As taxas de deformação específica relacionadas ao tempo obtidas são baixas, mas ainda maiores que as verificadas no campo;
- c) O coeficiente de adensamento é obtido diretamente da equação (III.2), não sendo necessário recorrer a métodos de ajustamento de curvas;
- d) O ensaio fornece dados relevantes sobre a compressão primária e a secundária;
- e) Os gradientes hidráulicos e a sobrepressão hidrostática gerados são bem menores que os do ensaio convencional, como se vê na figura (III.2);
- f) A automação do processamento e da aquisição de dados possibilita que se obtenham curvas com um maior número de pontos e, portanto, mais bem definidas;
- g) O ensaio exige equipamento sofisticado, pois é preciso dispor de um mecanismo automático de retroalimentação que assegure um ajuste contínuo e gradual do carregamento, de forma a proporcionar a

permanência de uma sobrepressão hidrostática constante na base;

h) O valor da sobrepressão hidrostática face não-drenada deve ser baixo o suficiente para que as hipóteses admitidas no item (III.4.2) não sejam invalidadas, garantindo-se, assim, índices de vazios ao longo da altura do corpo-de-prova o mais uniforme possível.

III.5- ENSAIO COM VELOCIDADE DE CARREGAMENTO CONSTANTE.

III.5.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Esse ensaio tem como princípio básico a aplicação de carga axial à amostra, de tal forma que se mantenha constante a derivada da tensão total em relação ao tempo.

O equipamento utilizado pode ser o mesmo dos ensaios com gradiente controlado ou com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, permitindo-se a drenagem apenas em uma face da amostra e medindo-se a sobrepressão hidrostática na base (face não-drenada).

III.5.2- A CONCEPÇÃO TEÓRICA.

A formulação teórica proposta por ABOSHI et alii (1970) baseia-se na validade das seguintes hipóteses:

- a) A permeabilidade é constante;
- b) O coeficiente de adensamento é constante;
- c) As deformações são infinitesimais;
- d) A relação entre as variações do índice de vazios e da tensão efetiva é linear.

Considerando esses itens, a equação de continuidade reduz-se a:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad (\text{III.4}).$$

Levando em conta que $\partial \sigma / \partial t$ é constante e as condições de contorno

$$u = 0 \text{ para } z = 0;$$

$$\partial u / \partial z = 0 \text{ para } z = H;$$

$$u = 0 \text{ para } t = 0;$$

demonstra-se que existe uma relação única entre u_b / σ_v e o

fator-tempo (T_v). Como u_b é a sobrepressão hidrostática medida na face não-drenada, para cada tempo obtém-se no ensaio o valor de u_b/σ_v e determina-se o fator-tempo correspondente. De posse do valor de T_v , calcula-se o coeficiente de adensamento de acordo com a equação (II.3).

A tensão efetiva média atuante no corpo-de-prova em um dado tempo é deduzida a partir da relação entre o grau de adensamento médio e o fator-tempo.

III.5.3- COMENTÁRIOS SOBRE O ENSAIO.

Analisando-se os vários aspectos envolvidos na execução e nos resultados desse ensaio, pode-se concluir:

- a) A principal questão a resolver é a relativa à escolha de uma velocidade de carregamento compatível com o material a ser ensaiado, pois, ainda, não há critérios bem estabelecidos;
- b) A velocidade de carregamento definida por experimentação para um determinado solo deve ser suficientemente baixa para garantir uma distribuição de sobrepressões hidrostáticas a mais uniforme possível e com valores ainda mensuráveis;
- c) O ensaio necessita de um mecanismo automático de retroalimentação, o que é um fator de encarecimento do custo da aparelhagem.

III.6- ENSAIO DE ADENSAMENTO COM FLUXO RESTRINGIDO.

III.6.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Não é propriamente um ensaio com carregamento continuamente crescente com o tempo, mas será mencionado aqui por se incluir no conjunto de experimentos especiais de adensamento de que trata este capítulo, notadamente quanto aos aspectos do item (III.2).

As características fundamentais do ensaio com fluxo restringido, idealizado por LEE (1977), podem ser descritas como segue:

- a) Medem-se as sobrepressões hidrostáticas nas superfícies drenada (superior) e não-drenada (inferior);
- b) O estágio inicial do ensaio consiste em aplicar, lentamente ou por incrementos, a tensão total ao topo do corpo-de-prova através de ar comprimido ou pelo braço de alavanca do ensaio convencional,

- mantendo-se impedida a drenagem;
- c) Attingido o nível desejado de tensão total, é permitido o fluxo de água na face superior a uma velocidade controlada por um restritor;
- d) Aberta a drenagem, são feitos registros intermitentes da tensão total, do deslocamento vertical e do decréscimo das sobrepressões hidrostáticas no topo e na base, resultando em curvas como as da figura (III.3);
- e) O restritor de fluxo, que é composto de um conjunto de discos de papel-filtro (do tipo "Millipore"), deve ter uma permeabilidade efetiva bem menor que a do material ensaiado de modo a assegurar uma diferença pequena entre as sobrepressões hidrostáticas no topo e na base da amostra.

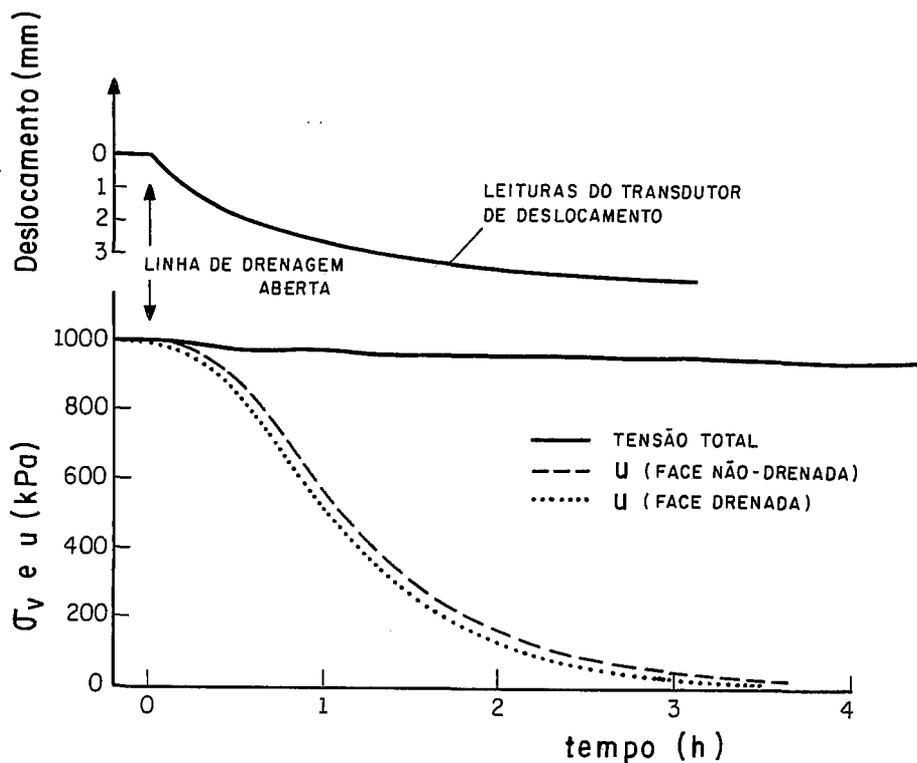


FIG. III.3 - Resultados típicos de um ensaio com fluxo restringido (APUD SILLS et al., 1986).

III.6.2- A CONCEPÇÃO TEÓRICA DO ENSAIO.

A base teórica do ensaio está estribada nas hipóteses abaixo:

- a) Validade do princípio das tensões efetivas;
- b) A distribuição das sobrepressões hidrostáticas é admitida parabólica.

Conquanto SILLS et alii (1986) não mencionem o cálculo de m_v e c_v , é possível obter esses parâmetros admitindo-se como válido o seguinte:

- a.1) O coeficiente de compressibilidade volumétrica e o coeficiente de adensamento são constantes;
- a.2) As deformações são infinitesimais.

Considerando-se o item (III.6.2.b), demonstra-se que a sobrepressão hidrostática média (\bar{u}) é igual à soma de 2/3 do valor na face não-drenada e de 1/3 do valor na face drenada.

O coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) é definido pela equação (II.5).

Levando em conta as hipóteses (III.6.2.a.1) e (III.6.2.a.2), pode-se demonstrar que:

$$c_v = \frac{H^2}{2u_b} \frac{\Delta \sigma_v'}{\Delta t} \quad (\text{III.5}).$$

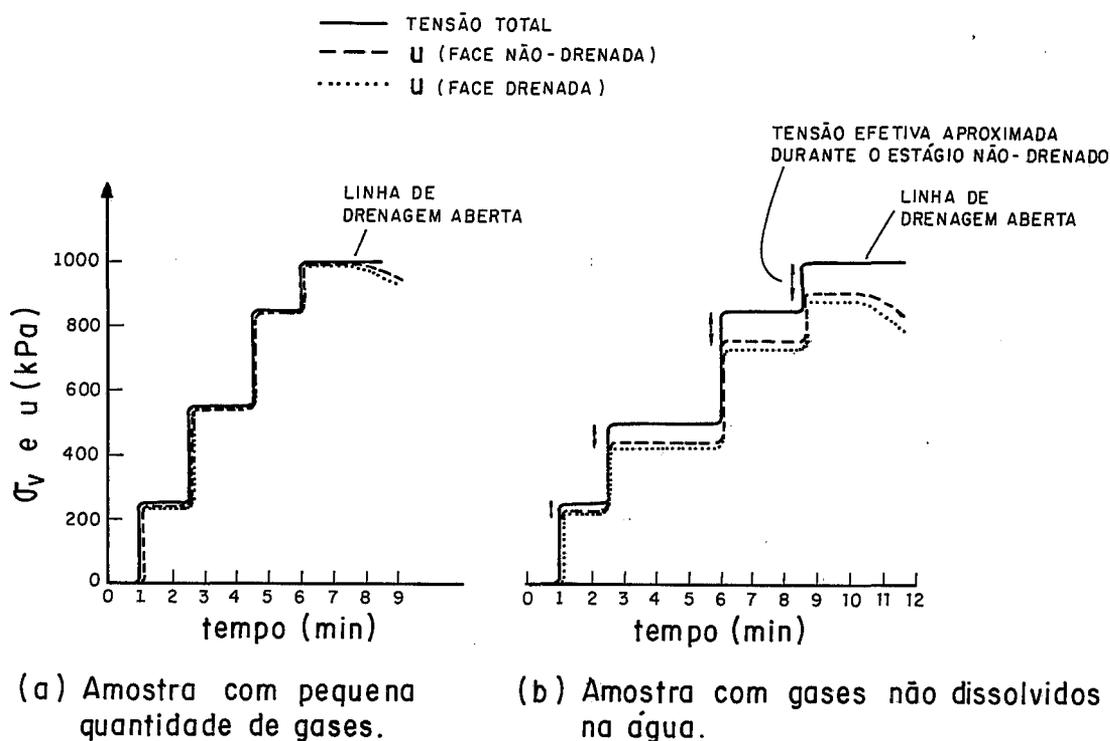
III.6.3- COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO ENSAIO.

Procedendo-se a uma análise crítica do ensaio de adensamento com fluxo restringido, pode-se concluir:

- a) O experimento é executado sem o emprego de mecanismo de retroalimentação, o que simplifica sobremaneira o equipamento necessário;
- b) A obtenção de bons resultados está condicionada à eficácia do restritor de fluxo;
- c) É preciso escolher um número de discos de papel-filtro compatível com o tipo de solo a ser ensaiado e não se dispõe de critérios bem definidos para resolver essa questão;
- d) O exame da possível dependência das propriedades do solo em relação ao tempo e ao nível de tensão pode ser feito variando-se $d\sigma_v'/dt$ ou $d\epsilon_v/dt$ em diversos ensaios, o que requer alterações no grau de restrição de fluxo;
- e) Níveis diferentes de tensão efetiva podem ser atingidos usando-se combinações de valores de sobrepressão hidrostática e tensão total e

aplicando-se contrapressão em todo o estágio de carregamento. Essas operações são realizadas sem utilização de controle por computador;

f) Na fase não-drenada, se houver bolhas de ar, o acréscimo de tensão efetiva não será nulo, razão pela qual se deve monitorar todo esse estágio para não se perder a parte inicial da curva índice de vazios- σ_v (na figura III.4 são apresentados os vários estágios de carga para um solo parcialmente saturado).



III.7- ENSAIO DE ADENSAMENTO COM CARREGAMENTO CONTÍNUO.

III.7.1- CONSIDERAÇÕES GERAIS.

A razão constante entre as derivadas, em relação ao tempo, da

sobrepressão hidrostática na base e da tensão total ($\lambda = \frac{du_b}{d\sigma_v}$) caracteriza, na sua essência, esse ensaio proposto por JANBU et alii (1981). São, ainda, aspectos dignos de nota:

- a) Na face inferior há um transdutor de pressão ligado à pedra porosa;
- b) Registram-se leituras de tensão total, deslocamento do topo da amostra, sobrepressão hidrostática na base impermeável e as derivadas de cada um desses parâmetros tomadas em relação ao tempo;
- c) O fator $\lambda = \frac{du_b}{d\sigma_v}$ varia da condição drenada ($\lambda = 0$), resultante de carregamento suficientemente lento ou da ocorrência de alta permeabilidade, até a situação totalmente não-drenada e sem mudança de volume ($\lambda = 1$);
- d) A variação de λ em ensaios de um mesmo material dá meios de analisar a influência da velocidade de carregamento nos parâmetros σ_v , c_v e M e na definição das curvas $\dot{\epsilon}_v - \sigma_v$;
- e) A tensão de sobreadensamento pode ser avaliada em um ou em todos os gráficos traçados em escala aritmética ($\epsilon_v - \sigma_v$, $M - \sigma_v$, $c_v - \sigma_v$ e $\dot{\delta} - \sigma_v$, sendo $\dot{\delta}$ a derivada do deslocamento em relação ao tempo), tal como se observa na figura (III.5).

Segundo JANBU et alii (1981), a importância desse ensaio reside, essencialmente, em dois pontos:

- a) A influência da velocidade de aplicação de carga na tensão de sobreadensamento pode ser estudada;
- b) As soluções deduzidas para interpretação dos resultados são acuradas, escapam às restrições impostas aos ensaios com gradiente controlado, com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, com velocidade de carregamento constante e independem do tipo de carregamento continuamente crescente com o tempo aplicado.

III.7.2- A CONCEPÇÃO TEÓRICA.

A fundamentação teórica do ensaio está alicerçada nas seguintes hipóteses:

- a) É válida a lei de Darcy;
- b) As deformações são infinitesimais;
- c) A permeabilidade é constante com a profundidade;

d) A distribuição da sobrepressão hidrostática é dada por $f(\xi, \lambda) = \frac{u}{u_b}$,

sendo $\xi = \frac{z}{H}$;

g) $\lambda = \frac{du_b}{d\sigma_v}$ é constante.

Com base nesses itens, a equação que define o carregamento contínuo fica:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \left[\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \right] \quad (\text{III.6}).$$

Considerando as condições de contorno

$$f = 0 \text{ para } \xi = 1$$

$$f' = 0 \text{ para } \xi = 0$$

$$f = 1 \text{ para } \xi = 0$$

demonstra-se que:

$$c_v = \alpha_c \frac{H^2}{2u_b} \frac{d\sigma_v}{dt} \quad (\text{III.7}).$$

$$k = \alpha_k \frac{\gamma_w H}{2u_b} \frac{d\delta}{dt} \quad (\text{III.8}).$$

$$m_v = \frac{\frac{d\delta}{dt}}{H \alpha_m \frac{d\sigma_v}{dt}} \quad (\text{III.9}).$$

Os coeficientes adimensionais α_c , α_k e α_m só dependem do valor constante de λ , consoante as seguintes equações:

$$\alpha_m = \frac{\text{tgh } a}{a} \quad (\text{III.10}).$$

$$\alpha_k = \frac{2 (\cosh a - 1)}{a \sinh a} \quad (\text{III.11}).$$

$$\alpha_c = \frac{2 (\cosh a - 1)}{a^2 \cosh a} \quad (\text{III.12}).$$

$$\text{onde } a = \text{arc cosh} \left[\frac{1}{1 - \lambda} \right]$$

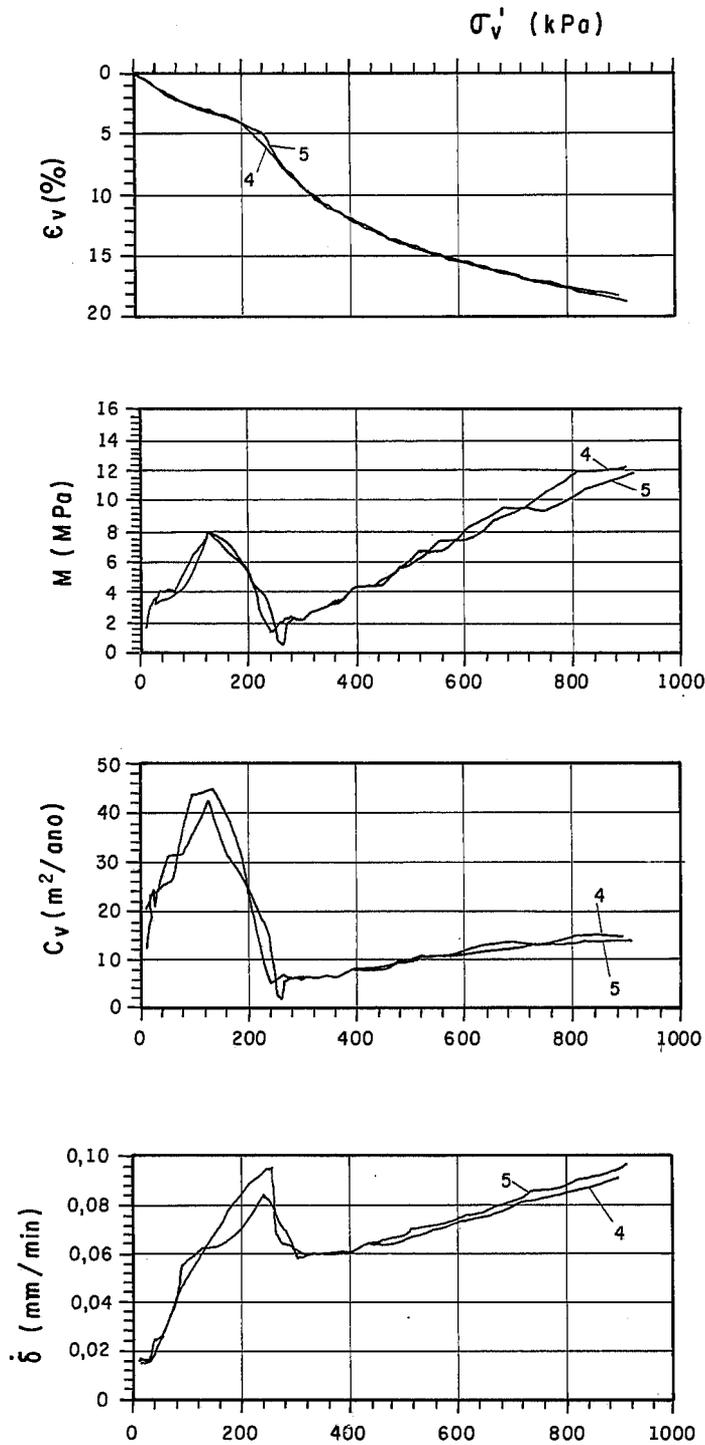


FIG. III.5 - Resultados dos ensaios nº 4 e 5 na argila de Risvollan com $\lambda = 0,3$.
(APUD JANBU et al., 1981)

III.7.3— COMENTÁRIOS SOBRE O DESEMPENHO DO ENSAIO.

Fazendo-se uma análise global do ensaio de adensamento com carregamento contínuo, com base nas observações de vários autores, pode-se comentar o seguinte:

- a) O equipamento necessário é muito complexo e deve possuir, obrigatoriamente, um sistema automático de retroalimentação que permita variar a velocidade de carregamento de forma que se mantenha $\lambda = \text{constante}$;
- b) JANBU et alii (1981) postularam que o ensaio podia ser realizado com valores de $\dot{\epsilon}_v$ tão altos quanto $1,39 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $3,78 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ para a maioria das argilas (no material por eles ensaiado, com $0,35 \leq \lambda \leq 0,60$, a duração do experimento foi inferior a uma hora nas argilas sobreadensadas e menos de duas horas e meia nas normalmente adensadas);
- c) CRAWFORD (1986) argumentou que ensaios tão rápidos quanto os do item precedente dariam resultados insatisfatórios em argilas muito sensíveis;
- d) A faixa de valores de λ a ser empregada em vários ensaios de um mesmo material precisa ser definida e não há critérios bem estabelecidos;
- e) A condição $\lambda = \text{constante}$ implica que as equações deduzidas por JANBU et alii (1981) não são válidas sob condições de fluxo transiente (OLSON, 1986);
- f) As velocidades de carregamento devem ser mantidas baixas o suficiente para que não se viole a hipótese de permeabilidade constante no interior do corpo-de-prova.

III.8— COMENTÁRIOS FINAIS.

Considerando-se todas as observações feitas nos itens anteriores deste capítulo, pode-se concluir que os ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo e os com fluxo restringido requerem, entre todos os propostos, os mecanismos mais simples para aplicar carga, não havendo necessidade de sistemas de retroalimentação.

Em razão dessa vantagem, de grande relevância para as condições de trabalho em um país como o Brasil, é que o laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ deliberou investir seus esforços somente na utilização desses dois tipos de experimento.

CAPÍTULO IV.

ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO COM TAXA
CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA
AO TEMPO.

IV.1- INTRODUÇÃO.

Neste capítulo apresenta-se, inicialmente, uma revisão bibliográfica das pesquisas relativas ao ensaio de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo. A seguir, aborda-se a análise teórica utilizada neste trabalho para interpretação dos resultados deste tipo de experimento. Finalmente, descrevem-se os critérios existentes para escolha da velocidade de ensaio a ser empregada.

IV.2- ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICO COM TAXA
CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA
AO TEMPO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

HAMILTON e CRAWFORD (1959) estão entre os primeiros que aludiram a esse tipo de experimento (aqui, por concisão, será denominado ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$), cuja execução teve o objetivo inicial de buscar rapidez em obter a tensão de sobreadensamento. Como parte integrante de um extenso programa de pesquisa destinado a avaliar as discrepâncias existentes entre os recalques observados e os previstos para edificações construídas sobre a argila de Leda, leste do Canadá, os autores procederam a ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ para uma faixa de magnitude deste último parâmetro entre $8,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $2,5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

Os resultados obtidos mostraram que às taxas de deformação específica relacionadas ao tempo mais elevadas correspondiam os maiores valores da tensão de sobreadensamento. As curvas $\Delta e - \sigma_v$ dos ensaios convencionais apresentaram uma maior conformidade com aquelas oriundas de experimentos conduzidos na faixa de valores mais baixos da taxa de deformação específica relacionada ao tempo ($\dot{\epsilon}_v$).

Posteriormente, CRAWFORD (1964) aduziu novos argumentos ao estudo da influência de $\dot{\epsilon}_v$, apoiando-se em dados advindos de ensaios nos quais se adotaram para esse último parâmetro os valores de $1,94 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e

$3,88 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, dependendo da espessura da amostra da argila de Leda. A sobrepressão hidrostática atingiu valores máximos de 5% a 8% da tensão vertical e as curvas $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc. log.) mostraram-se praticamente idênticas. Observou, ainda, o articulista que a $\dot{\epsilon}_v$ da amostra em laboratório pode alcançar um patamar de alguns milhões de vezes superior ao do campo, tornando a extrapolação dos resultados às situações reais uma tarefa que envolve grandes riscos, se aquela grandeza realmente afeta a compressibilidade do solo.

Dando continuidade a esse trabalho, CRAWFORD (1965) relatou resultados de ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ nos quais se registrou, para um intervalo desse último parâmetro entre $4,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $2,22 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, uma sobrepressão hidrostática máxima de 15% da tensão vertical aplicada. O autor ainda concluiu que a estrutura do solo desempenha um papel importante na compressão, na medida em que é responsável por uma resistência variável com o tempo ao desenvolvimento desse fenômeno.

WAHLS e DEGODOY (1965) realizaram em amostras amolgadas ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ em que foram medidas sobrepressões hidrostáticas máximas na base (u_b) entre 25% e 75% da tensão vertical atuante, para uma faixa da taxa de deformação específica relacionada ao tempo entre $8,8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $3,83 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Verificou-se uma diminuição de u_b com o decréscimo de $\dot{\epsilon}_v$, conforme já havia sido observado por CRAWFORD (1965).

Baseando-se em dados de diversos ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, nos quais esse parâmetro situou-se na faixa de $4,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $4,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, SMITH e WAHLS (1969) afirmaram que, para os materiais por eles utilizados, o limite superior da relação u_b/σ_v devia ser fixado em 50% (onde u_b = sobrepressão hidrostática na base e σ_v = tensão total atuante). Acima desse valor, as sobrepressões hidrostáticas na base são elevadas e não se pode assegurar uma distribuição aproximadamente uniforme da tensão efetiva ao longo do corpo-de-prova. As amostras foram reconstituídas em laboratório, no caso da caulinita e cálcio-montmorilonita, e extraídas com amostradores de tubo de parede fina, no caso da argila de Massena. As curvas $\Delta e \times \sigma_v$ evidenciaram que no primeiro material não houve intensos efeitos de $\dot{\epsilon}_v$; no segundo, ocorreu pronunciada influência, mas é questionável o cálculo da tensão efetiva média quando u_b/σ_v supera 50%; e, no último, a dependência em relação a $\dot{\epsilon}_v$ foi pequena. Os gráficos $\Delta e \times \sigma_v$ (esc. log.) dos ensaios convencionais apresentaram boa

concordância com os correspondentes aos experimentos com valores mais baixos de $\dot{\epsilon}_v$.

TRABALHOS DE 1971 ATÉ 1980.

WISSA et alii (1971) expuseram um amplo trabalho a respeito do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. O material objeto da experimentação, a argila azul de Boston, foi reconstituído em laboratório. Os corpos-de-prova, após saturados a volume constante com contrapressão de 500 kPa, foram submetidos a valores de $\dot{\epsilon}_v$ de $1,6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $8,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. As tensões efetivas atingiram o valor de 2600 kPa e em apenas um ensaio não houve ciclo de carga e descarga.

As curvas $e-\sigma'_v$ (esc.log.) desses ensaios apresentaram boa concordância com as oriundas do experimento convencional e não foram apreciavelmente influenciadas pela magnitude de $\dot{\epsilon}_v$, ainda que a razão entre a máxima e a mínima taxa de deformação específica relacionada ao tempo tenha sido igual a cinco. Os valores de c_v mostraram razoável concordância com os obtidos pelos métodos de Taylor e Casagrande para ensaios edométricos convencionais. Os gráficos $M \times \sigma'_v$, conforme proposição de JANBU (1969), indicaram claramente a tensão de sobreadensamento.

Em um ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ interrompido por 24 horas na tensão efetiva média de 50 kPa, com posterior prosseguimento até $\sigma'_v = 2600 \text{ kPa}$, houve manifesto delineamento da tensão de quase sobreadensamento, como previsto por LEONARDS e RAMIAH (1959) e LEONARDS e ALTSCHAEFFL (1964).

Os autores recomendaram que a relação u_b/σ'_v tivesse o valor máximo de 5%, a fim de que os gradientes hidráulicos na amostra não fossem altos e, portanto, pouco representativos das condições de campo.

SÄLLFORS (1975) apresentou uma circunstanciada investigação da eficácia dos ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. O material ensaiado foi a argila de Bäckebol e a faixa de valores de $\dot{\epsilon}_v$ ficou compreendida entre $5,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $1,67 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

As curvas $\epsilon_v-\sigma'_v$ mostraram-se bem definidas—duzentos pontos foram utilizados para traçá-las—e equivalentes às do ensaio incremental, quando a magnitude de $\dot{\epsilon}_v$ impunha um intervalo de 24 horas para completar o experimento.

O exame da faixa de tensões de sobreadensamento revela que esta grandeza é dependente do tempo, tornando-se menor à medida que decresce $\dot{\epsilon}_v$.

As curvas $u_b - \sigma'_v$ indicaram dependência posicional com $\dot{\epsilon}_v$, parâmetro a cuja magnitude se associa o valor da sobrepressão hidrostática na base. Notou-se, ainda, que havia uma mudança brusca nesses gráficos ao se atingir a tensão de sobreadensamento, conforme mostra a figura (IV.1).

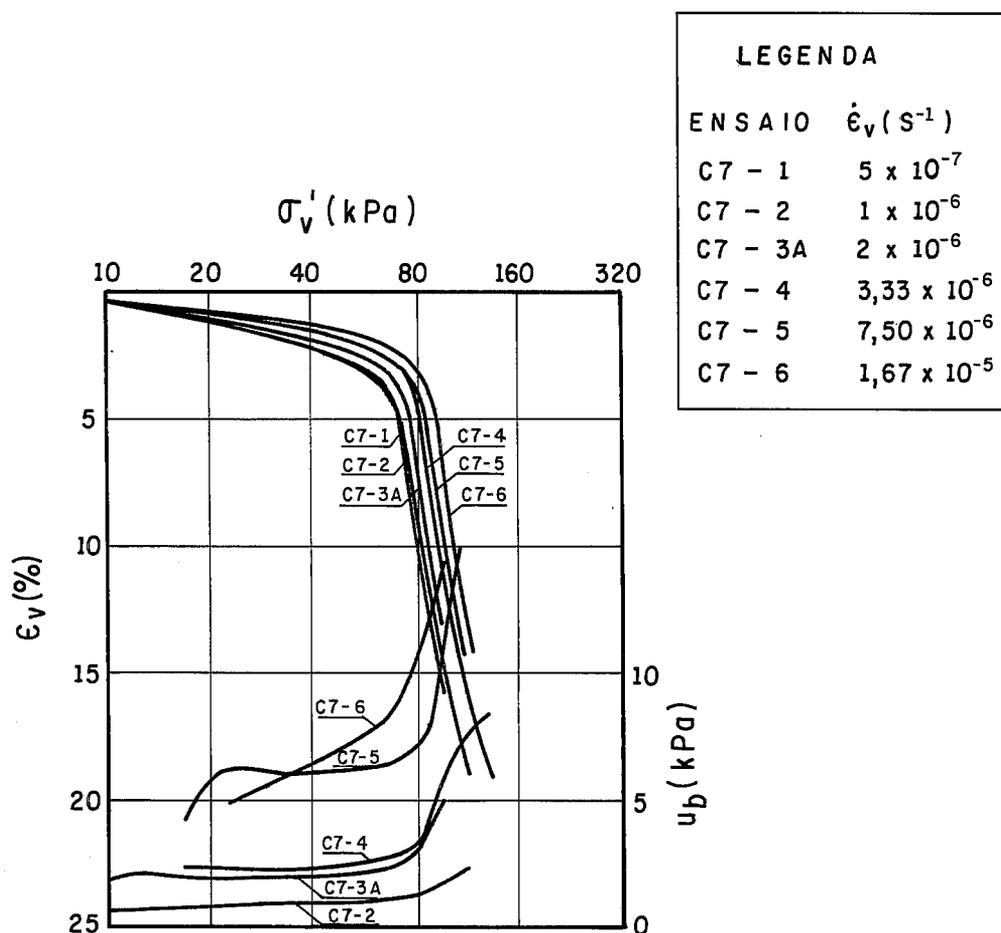


FIG. IV.1 - Curvas $\epsilon_v \times \sigma'_v$ e $u_b \times \sigma'_v$ de ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. (APUD SÄLLFORS, 1975)

O módulo edométrico, para tensões efetivas abaixo de σ'_{vm} , aumentou com o acréscimo de $\dot{\epsilon}_v$, porém, parece independer desta última

quando se ultrapassa a tensão de sobreadensamento. A figura (IV.2) esclarece esse ponto.

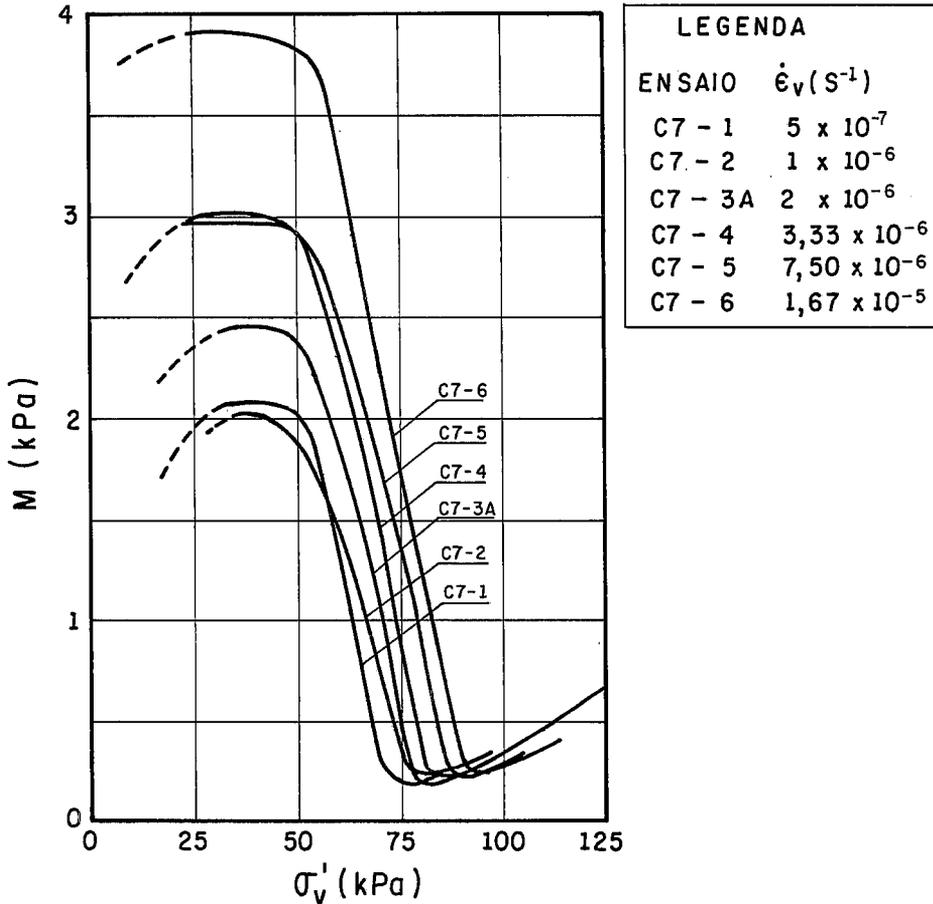


FIG. IV.2 - Variação do módulo edométrico com a tensão efetiva em ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.
(APUD SÄLLFORS, 1975)

O atrito entre a parede lateral do anel e a amostra foi medido com um transdutor de força especialmente instalado na base para tal fim. Registrou-se uma perda de tensão total de 5% a 8% no caso de anéis de aço inoxidável lubrificadas com graxa de silicone. Esses valores são inferiores aos encontrados para o ensaio edométrico convencional.

É relevante, ainda, comentar que o cotejo dos resultados obtidos no laboratório com os provenientes de ensaios de campo, feitos em dois tanques e um aterro instrumentado, mostrou boa consonância entre as duas situações

experimentais, se considerados os experimentos com menor $\dot{\epsilon}_v$.

GORMAN et alii (1978), visando determinar a exeqüibilidade do uso de ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ em investigações rotineiras, realizaram um vasto programa de pesquisa que incluiu solos do estado de Kentucky, E.U.A., com uma gama de propriedades geotécnicas consideravelmente diversificada. Os corpos-de-prova foram saturados com contrapressão de 69 kPa e submetidos a $\dot{\epsilon}_v$ variando de $6,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $1,45 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. O valor máximo de u_b/σ_v atingiu 32%.

Da comparação dos resultados de ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ com os dos convencionais emergiram as conclusões dos autores, a seguir expostas:

- a) Houve boa concordância dos valores de c_v nas duas situações, para tensões efetivas acima da tensão de sobreadensamento;
- b) Os valores de CR do primeiro tipo de experimento foram ligeiramente inferiores aos obtidos no segundo;
- c) A razão u_b/σ_v deve situar-se entre 30% e 50% e ser de tal grandeza que gere uma sobrepressão hidrostática na base de no mínimo 7 kPa.

TRABALHOS DE 1980 ATÉ OS DIAS ATUAIS.

LEROUEIL et alii (1983) selecionaram cinco modalidades de ensaio, além do convencional, com o propósito de determinar os valores das tensões de sobreadensamento sob o centro do aterro experimental de Gloucester, Canadá, e compará-los com os mobilizados no campo. Foram coletadas três séries de amostras, sendo duas com o amostrador Geonor modificado, de 70 mm de diâmetro interno, e uma com o do tipo Sherbrooke, de 300 mm de diâmetro interno.

No tocante aos experimentos com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, inferiu-se dos resultados que os efeitos do valor dessa taxa sobre a compressibilidade aparentemente não se manifestaram conforme o previsto por Sällfors (1975), o qual encontrara, para o trecho sobreadensado, uma relação entre o aumento da compressibilidade e o decréscimo de $\dot{\epsilon}_v$. Maior evidência de como $\dot{\epsilon}_v$ influencia a curva $\epsilon_v - \sigma_v$ deu-se na faixa normalmente adensada, onde a tensão efetiva, para uma dada deformação específica vertical, aumentou diretamente com a diminuição do tempo de ensaio.

A tensão de sobreadensamento mostrou-se significativamente relacionada com $\dot{\epsilon}_v$, fazendo com que aos ensaios mais lentos (convencionais com $\Delta\sigma/\sigma_1 = 0,5$ e recarregamento a cada 24 horas) correspondessem valores

de σ'_{vm} menores que os observados em experimentos nos quais a taxa de deformação específica relacionada ao tempo foi controlada entre $6,67 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ e $8,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Como a $\dot{\epsilon}_v$ "in situ" é muito baixa, nos ensaios convencionais a magnitude da tensão de sobreadensamento aproximou-se mais da encontrada no campo, o que é observado nas figuras (IV.3) e (IV.4).

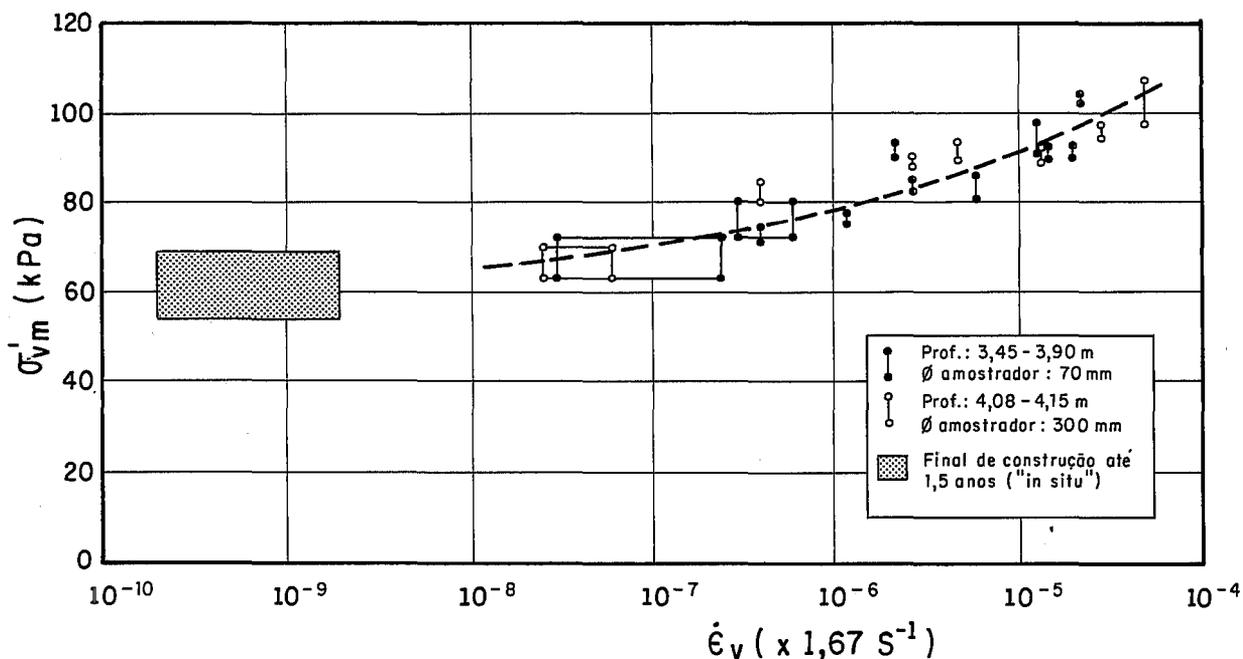


FIG. IV.3 - Variação da tensão de sobreadensamento com a taxa de deformação específica relacionada ao tempo no laboratório e no campo.
(APUD LEROUEIL et al., 1983)

Em vista da unicidade das relações $\sigma'_{vm}-\dot{\epsilon}_v$, os autores sugeriram que pode ser feita uma correção dos valores σ'_{vm} medidos em ensaios rápidos por um fator representativo da relação existente entre a $\dot{\epsilon}_v$ utilizada e a de campo.

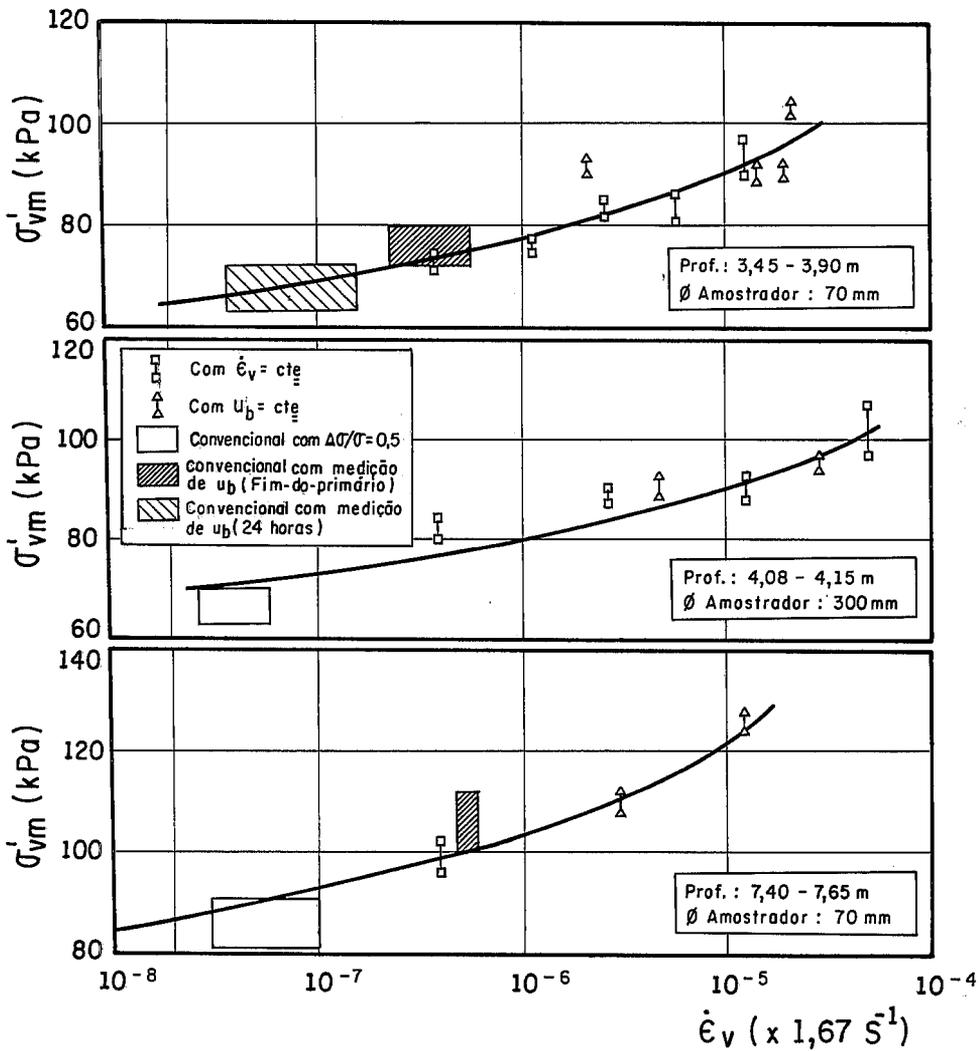


FIG. IV.4 - Variação da tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) com a taxa de deformação específica relacionada ao tempo ($\dot{\epsilon}_v$).
 (APUD LEROUÉIL et al., 1983)

LEROUÉIL et alii (1985), com o objetivo de estabelecer um modelo reológico para as argilas do Leste do Canadá, realizaram diversos tipos de ensaios de adensamento edométrico, tais como o convencional com $\Delta\sigma/\sigma_i = 0,5$ e carregamento a cada 24 horas ou ao final do primário, o de gradiente controlado, o incremental com estágio de longa duração e o de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

No caso do último, a taxa de deformação específica relacionada ao tempo variou de $1,67 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ a $4,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Os autores chamaram a atenção para o fato de que os valores da sobrepressão hidrostática na base,

para $\dot{\epsilon}_v = 5,0 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, eram tão pequenos que não houve condições de medi-los.

As curvas $\epsilon_v - \sigma_v^i$ foram influenciadas pela $\dot{\epsilon}_v$, à semelhança das observações de CRAWFORD (1965), SÄLLFORS (1975) e LEROUEIL et alii (1983). Notou-se, também, que a normalização das tensões efetivas, tomando como referência a tensão de sobreadensamento característica de cada $\dot{\epsilon}_v$, resultava em curvas $\epsilon_v - [\sigma_v^i / \sigma_{vm}^i (\dot{\epsilon}_v)]$ situadas numa estreita faixa, a exemplo do que se vê na figura (IV.5).

Fundamentando-se na boa conformidade dos resultados dos diversos tipos de ensaios, os articulistas formularam um modelo reológico, aplicável ao trecho normalmente adensado, que pode ser descrito por duas equações:

$$\sigma_{vm}^i = f(\dot{\epsilon}_v) \quad (\text{IV.1.})$$

$$\frac{\sigma_v^i}{\sigma_{vm}^i} = g(\dot{\epsilon}_v) \quad (\text{IV.2.})$$

Conhecidas essas relações, pode-se, então, estabelecer a seguinte equação geral:

$$\dot{\epsilon}_v = f^{-1} \left[\frac{\sigma_v^i}{g(\dot{\epsilon}_v)} \right] \quad (\text{IV.3.})$$

Para uma argila cuja tensão de sobreadensamento varie com $\dot{\epsilon}_v$ segundo uma relação conhecida, é possível definir através de um ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ como se relacionam os parâmetros tensão-deformação-taxa de deformação específica relacionada ao tempo desse solo, a exemplo do que se vê na figura(IV.6).

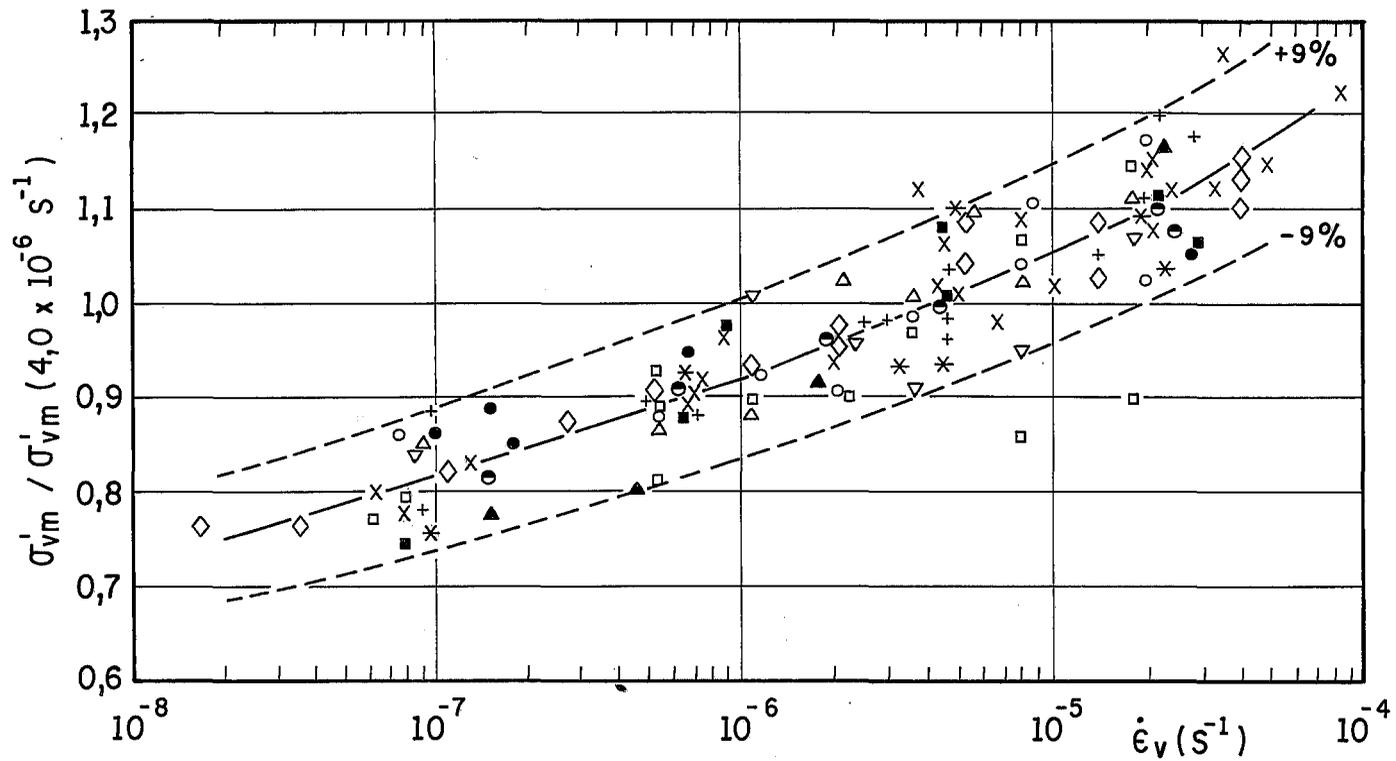


FIG. IV. 5 - Variação da tensão de sobreadensamento normalizada com a taxa de deformação específica relacionada ao tempo para argilas de Champlain.

(APUD LEROUEIL et al. 1985)

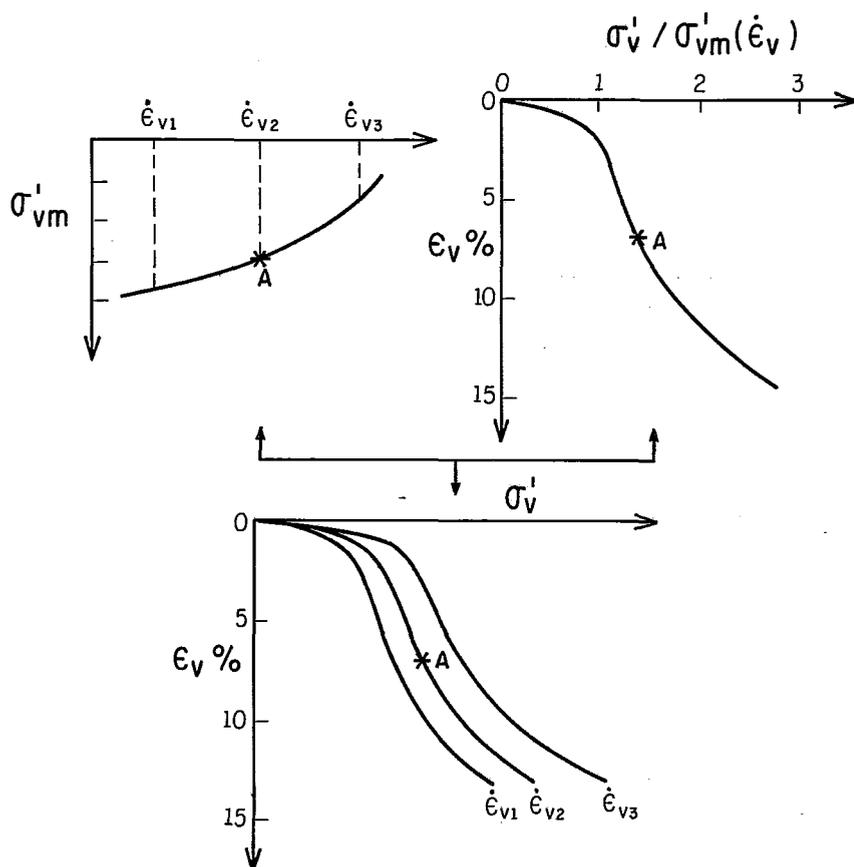


FIG. IV.6 - Modelo reológico sugerido por LEROUÉIL et al. (1985).

LEROUÉIL et alii (1988) promoveram uma exaustiva disquisição da validade das relações $\sigma'_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ obtidas em laboratório—únicas para uma argila sob adensamento unidimensional a uma dada profundidade—, confrontando-as com as observadas no campo, em três aterros, sendo dois no Canadá e um na Suécia. Foram realizadas várias séries de ensaios edométricos (incrementais com medida de sobrepressão hidrostática, com estágio de longa duração e com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$) em amostras extraídas no meio de subcamadas bem definidas, cujo comportamento, em termos de relações tensão-deformação-taxa de deformação específica relacionada ao tempo, era conhecido.

As principais conclusões expendidas pelos autores foram as seguintes:

- a) Para elevados valores de ϵ_v , quando a argila já perdeu sua estrutura original, houve boa concordância do modelo $\sigma_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ de laboratório com o comportamento verificado "in situ";
- b) Conforme mostra a figura (IV.7), a situação descrita no item precedente implica dizer que o solo atinge "in situ" deformações específicas verticais ao final do primário maiores que as previstas pelos ensaios convencionais, sob a mesma tensão efetiva;

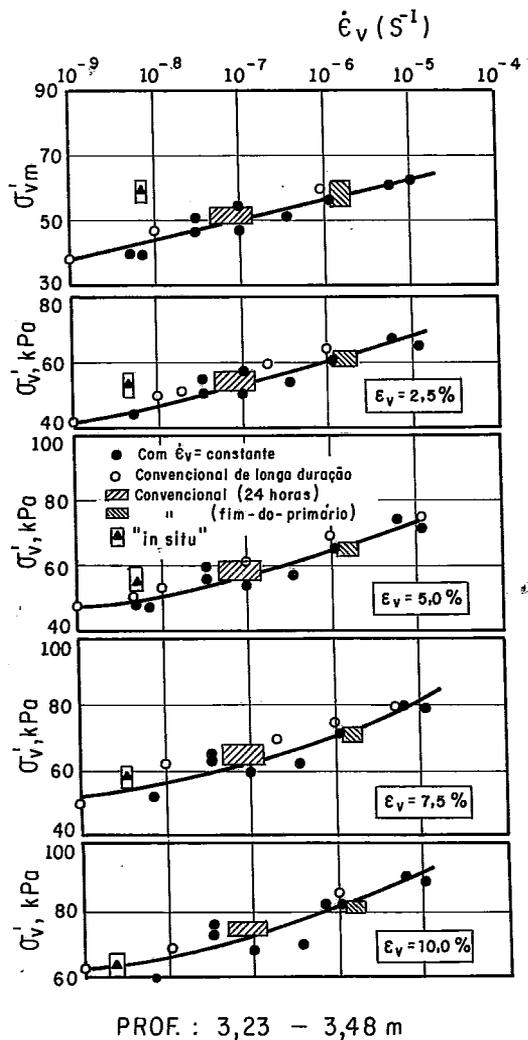


FIG. IV.7 - Comparação das curvas $\sigma_v^i - \dot{\epsilon}_v$ de campo com as de laboratório, para vários níveis de deformação específica vertical da argila de Berthierville.
(APUD LEROUEIL et al., 1988)

- c) Para baixos valores de ϵ_v , a tensão efetiva "in situ" excede a

observada no laboratório, na mesma $\dot{\epsilon}_v$, conforme ilustrado na figura (IV.8);

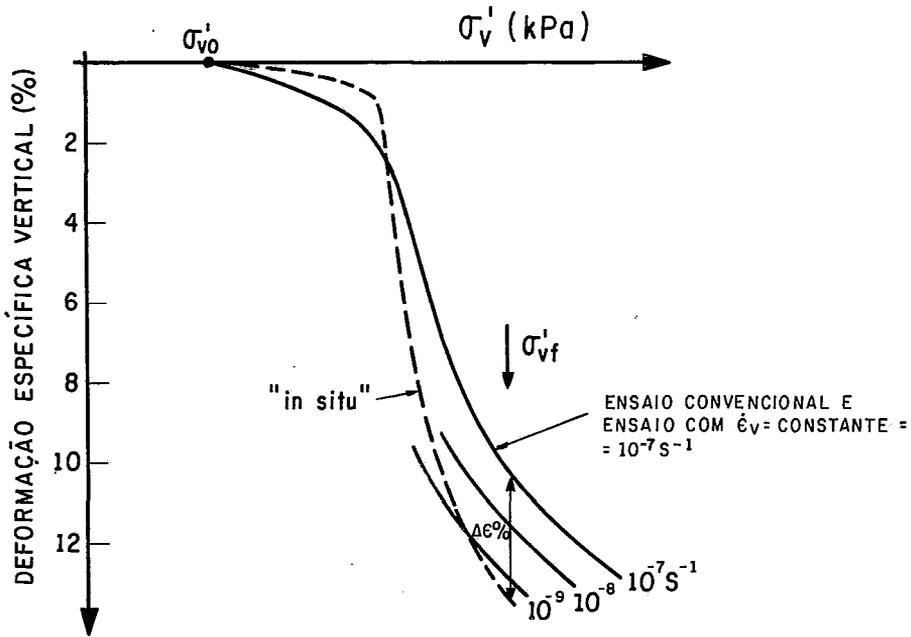


FIG. IV.8 - Comparação das curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$ de campo com as de laboratório. (APUD LEROUEIL et al., 1988)

- d) O fenômeno relatado no item c) pode ser explicado pelos diferentes caminhos de tensão seguidos nos dois casos e por efeitos de amolgamento, ainda que o material tenha sido coletado com o amostrador de Laval, de 200 mm de diâmetro interno;
- e) As taxas de deformação específica relacionadas ao tempo são bem menores que as dos ensaios de laboratório de acordo com a figura (IV.9).

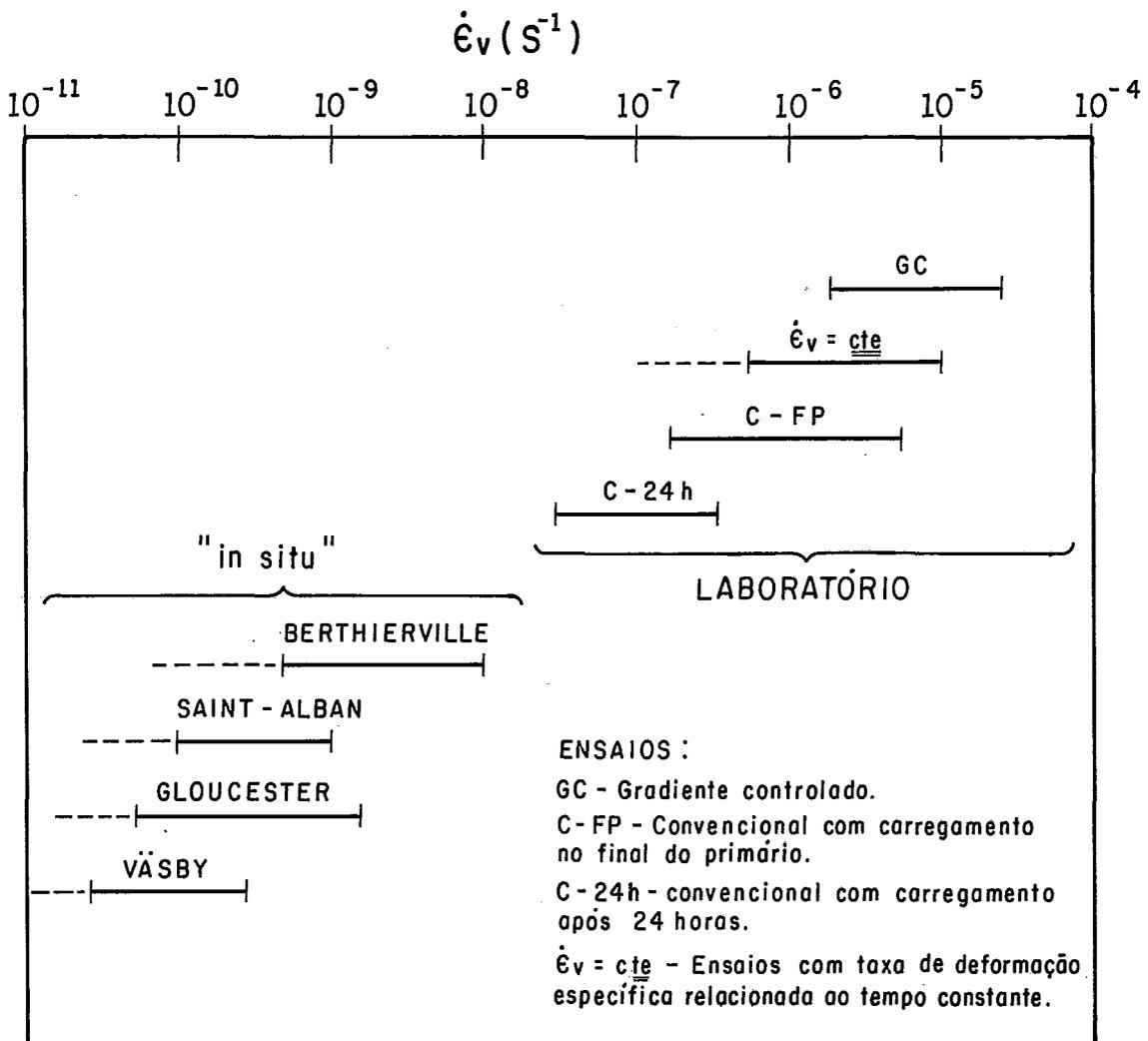


FIG. IV.9 - Faixas de taxas de deformação específica relacionadas ao tempo ($\dot{\epsilon}_v$) "in situ" e em ensaios de adensamento edométrico de laboratório (APUD LEROUEIL et al. 1988).

IV.3- ANÁLISE TEÓRICA DO ENSAIO ATRAVÉS DO MÉTODO DE WISSA et alii (1971).

No presente trabalho só será discutido o desenvolvimento teórico proposto por WISSA et alii (1971), por ser o único que se restringe a considerar deformações infinitesimais na interpretação do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ (ZNIDARCIC et alii, 1984).

Buscando resolver o problema sem excessivas dificuldades matemáticas, os autores admitiram como válidas as hipóteses simplificadoras da Teoria de Adensamento de Terzaghi e Fröhlich citadas no item (II.2), do capítulo II, à exceção das três últimas que se referem, respectivamente, à constância de k e M , à inalterabilidade de $\partial\sigma_v/\partial t$ e à relação linear entre os acréscimos de "e" e σ_v . Consideraram, também, que o coeficiente de adensamento é constante e não impuseram a k ou m_v qualquer relação particular com as tensões e deformações. A razão entre k e m_v é independente de z e t .

Levando em conta as considerações mencionadas, pode-se enunciar a equação do adensamento deduzida por MIKASA (1965):

$$c_v \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} \quad (\text{IV.4})$$

onde z = coordenada vertical do ponto.

Sejam $X = \frac{z}{H}$, $T_v = \frac{c_v t}{H^2}$ e $V = \frac{\delta}{H}$. Os dois primeiros parâmetros adimensionais já foram definidos no item (II.2), do capítulo II e a variável δ que figura no último refere-se a deslocamento positivo para baixo.

Define-se, então:

$$\epsilon_v = - \frac{\partial V}{\partial X} \quad (\text{IV.5})$$

A equação (IV.4) pode ser expressa por:

$$\frac{\partial^3 V}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v} \quad (\text{IV.6})$$

Com as condições de contorno

$$V(1, T_v) = V(X, 0) = \frac{\partial^2 V(1, T_v)}{\partial X^2} = 0 \quad (\text{IV.7})$$

Aqui deve-se observar que a equação (IV.4) teve o seu grau aumentado

para três devido ao fato de que as condições de fronteira só podem ser estabelecidas em termos de deslocamento.

No apêndice A.1 resolve-se a equação (IV.6) com as condições de contorno (IV.7), por via diversa da apresentada por WISSA et alii (1971).

A solução de (IV.6) é:

$$V(X, T_v) = - \frac{r H^2}{c_v} \left[T_v(X-1) + \frac{1}{6} (X^2 - 3X^2 + 2X) - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen}(n\pi X)}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \right]. \quad (\text{IV.8})$$

onde $r = \dot{\epsilon}_v$ = taxa de deformação específica relacionada ao tempo.

\exp = função exponencial de base $e = 2,718...$

Logo as deformações específicas verticais, de acordo com (IV.5), são dadas por:

$$\epsilon_v(X, T_v) = \frac{r H^2}{c_v} \left[T_v + \frac{1}{6} (3X^2 - 6X + 2) - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi X)}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \right]. \quad (\text{IV.9})$$

Pode-se analisar o que ocorre no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, observando-se o membro direito da equação (IV.9). A parcela $\frac{r H^2}{c_v} \left[T_v + \frac{1}{6} (3X^2 - 6X + 2) \right]$ corresponde ao regime permanente, que é

atingido para valores de T_v muito elevados. A parcela $\frac{r H^2}{c_v} \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi X)}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v)$ está associada ao regime transiente, que

tende a zero à medida que T_v cresce. Isto acontece porque, para valores altos de T_v , a distribuição de ϵ_v com a profundidade é parabólica, ao passo que no início do processo ($T_v = 0$) ela é uniforme.

Mostra-se (ver apêndice A.1) que, para valores de $T_v \geq 0,35$, desprezando-se a parcela correspondente ao regime transiente, comete-se um erro relativo máximo no cálculo do valor de ϵ_v de 1,0%.

A partir daqui far-se-ão análises relativas aos regimes permanente e transiente.

IV.3.1-REGIME PERMANENTE.

Essa condição foi definida por WISSA et alii (1971) como sendo aquela que se estabelece num tempo t muito grande, quando a parcela representativa da fase transiente desaparece. Neste texto considera-se regime permanente aquele que ocorre a partir de um tempo t tal que $T_v \geq 0,35$.

IV.3.1.1-CÁLCULO DE c_v e k NO REGIME PERMANENTE.

Já que a equação (IV.6) foi resolvida em termos de deslocamentos e , por conseqüência, em termos de deformações específicas verticais, faz-se necessário admitir hipóteses quanto às relações tensão-deformação do solo para calcular os coeficientes de adensamento e permeabilidade. Assim, nos itens que seguem, apresentam-se equações para o cálculo de c_v e k segundo a relação admitida como válida entre ϵ_v e σ'_v .

MATERIAL COM COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA (m_v) CONSTANTE.

Como, por hipótese, admite-se a constância de m_v e c_v , o coeficiente de permeabilidade k é obrigatoriamente constante.

Tomando-se da expressão (IV.8) a parcela referente aos deslocamentos no regime permanente, tem-se:

$$\begin{aligned} \delta(X, T_v) &= H.V(X, T_v) = \\ &= -\frac{r H^3}{c_v} \left[T_v (X-1) + \frac{1}{6}(X^3 - 3X^2 + 2X) \right] \end{aligned} \quad (IV.10)$$

sendo δ o deslocamento vertical.

Como a variação de volume por unidade de tempo do parte do corpo-de-prova compreendida entre $X = X_0$ e $X = 1$ é igual ao volume de água por unidade de tempo que atravessa a seção para a qual $X = X_0$, escreve-se:

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = H \frac{\partial V}{\partial t} = k i \quad (IV.11)$$

como:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = r(1 - X) = r \left[1 - \frac{z}{H} \right] \quad (IV.12)$$

tem-se:

$$H r \left[1 - \frac{z}{H} \right] = k i \quad (\text{IV.13})$$

Como k é constante, conclui-se que o gradiente hidráulico i é uma função do primeiro grau em z , ou seja,

$$i = \frac{r H}{k} \left[1 - \frac{z}{H} \right] \quad (\text{IV.14})$$

Lembrando agora que, por definição, $i = \frac{1}{\gamma_a} \frac{\partial u}{\partial z}$, pode-se escrever:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{r \gamma_a H}{k} \left[1 - \frac{z}{H} \right] \quad (\text{IV.15})$$

Integrando a equação (IV.15), obtém-se:

$$u = \frac{r \gamma_a H z}{k} - \frac{r \gamma_a z^2}{2k} + f(T_v) \quad (\text{IV.16})$$

Como na face drenante ($z = 0$) a sobrepressão hidrostática é igual a zero, tem-se que $f(T_v) = 0$. Logo a distribuição das sobrepressões hidrostáticas é dada por:

$$u = \frac{r \gamma_a H}{k} \left[z - \frac{z^2}{2H} \right] \quad (\text{IV.17})$$

Já que no ensaio em questão mede-se a sobrepressão hidrostática na base (u_b), nível ao qual corresponde $z = H$, pode-se calcular o coeficiente de permeabilidade por:

$$k = \frac{r \gamma_a H^2}{2u_b} \quad (\text{IV.18})$$

É importante notar que no caso em análise, como m_v é considerado constante, a distribuição das sobrepressões hidrostáticas é independente do tempo. Assim, pelo princípio das tensões efetivas ($\sigma_v' = \sigma_v - u_b$), tem-se que $\frac{du}{dt} = 0$. Portanto, pode-se escrever:

$$\frac{d\sigma_v}{dt} = \frac{d\sigma_v}{dt} \quad (\text{IV.19})$$

Levando em conta que no regime permanente $\frac{d\epsilon_v}{dt} = \dot{\epsilon}_v = r$, o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) pode ser escrito:

$$m_v = \frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\sigma_v} = r \frac{\Delta t}{\Delta\sigma_v} \quad (\text{IV.20})$$

Como conseqüência do exposto em (IV.18) a (IV.21), pode-se calcular o coeficiente de adensamento por:

$$c_v = \frac{H^2}{2u_b} \left[\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right] \quad (\text{IV.21})$$

Finalmente deve-se notar que à deformação específica vertical média $\epsilon_v = rt$ corresponde a tensão efetiva média $\bar{\sigma}'$ dada por:

$$\bar{\sigma}' = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (\text{IV.22})$$

Este valor médio de σ_v é o utilizado no traçado gráfico de curvas do tipo $\epsilon_v - \sigma_v$ ou $e - \sigma_v$.

MATERIAL COM COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VOLUMÉTRICA (m_v) VARIÁVEL.

Pode-se escolher aqui, para representar m_v , qualquer função que relacione as deformações específicas verticais com as tensões verticais efetivas. WISSA et alii (1971) selecionaram um m_v tal que

$$- \frac{de}{d \log \sigma_v} = C_c \quad (\text{IV.23})$$

onde C_c é o índice de compressão.

Para pequenas deformações a equação (IV.23) é equivalente a:

$$- \frac{d\epsilon_v}{d \log \sigma_v} = \frac{C_c}{1 + e} \quad (\text{IV.24})$$

Notando que são conhecidos os valores das tensões verticais total e efetiva e da sobrepressão hidrostática no topo e na base do corpo-de-prova, a

equação (IV.24) pode ser aproximada a:

$$\frac{\epsilon_v(0,t) - \epsilon_v(H,t)}{\log(\sigma_v) - \log(\sigma_v - u_b)} = \frac{C_c}{1 + e} \quad (\text{IV.25})$$

Observando-se a equação (IV.8), conclui-se de imediato que, para qualquer tempo t , a diferença entre os valores de ϵ_v no topo e na base é dada $\Delta\epsilon_v = \frac{1}{2} \frac{r H^2}{c_v}$. Substituindo esse resultado em (IV.25), vem:

$$-\frac{r H^2}{2 c_v \log\left[\frac{\sigma_v - u_b}{\sigma_v}\right]} = \frac{C_c}{1 + e} \quad (\text{IV.26})$$

Conclui-se, também, da expressão (IV.8) que em qualquer ponto z a diferença entre as deformações específicas verticais medidas nos tempos t_1 e t_2 ($t_2 \geq t_1$) vale $\Delta\epsilon_v = r(t_2 - t_1)$. Assim, levando em consideração o ponto situado no topo do corpo-de-prova, onde $\sigma_v' = \sigma_v$, pode-se escrever para dois instantes t_1 e t_2 que:

$$\frac{r \Delta t}{\log\left[\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right]} = \frac{C_c}{1 + e} \quad (\text{IV.27})$$

onde σ_{v1} e σ_{v2} são as tensões totais nos tempos t_1 e t_2 , respectivamente, e $\Delta t = t_1 - t_2$.

Combinando as equações (IV.26) e (IV.27), obtém-se:

$$c_v = \frac{H^2 \log\left[\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right]}{2 \Delta t \log\left[1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right]} \quad (\text{IV.28})$$

O coeficiente de compressibilidade é dado por:

$$m_v = \frac{0,434 C_c}{(1 + e) \sigma_v'} \quad (\text{IV.29})$$

O coeficiente de permeabilidade é expresso por:

$$k = c_v m_v \gamma_a \quad (\text{IV.30})$$

Finalmente, deve-se observar que à deformação específica vertical média ($\epsilon_v = rt$) corresponde uma tensão efetiva média dada por:

$$\bar{\sigma}_v = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{IV.31}).$$

Este valor médio de σ_v é o que deve ser usado para traçar um gráfico $\epsilon_v - \sigma_v$ ou $e - \sigma_v$.

Para encerrar este item, deve-se atentar para o fato de que, embora a distribuição das deformações específicas verticais seja sempre parabólica, as tensões efetivas e sobrepressões hidrostáticas distribuem-se segundo um padrão dependente da hipótese adotada para o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v). Assim sendo, a assunção de uma dada relação hipotética para este último parâmetro afetará, não só o valor do coeficiente de adensamento, como também os gráficos $\epsilon_v - \sigma_v$ e $e - \sigma_v$, uma vez que são traçados em termos de valores médios de σ_v e ϵ_v .

IV.3.2.—REGIME TRANSIENTE.

Independentemente do tipo de relação $\epsilon_v - \sigma_v$, pode-se mostrar facilmente, com base na equação (IV.9), que $\frac{\epsilon_v(0, T_v)}{\epsilon_v(1, T_v)} = F(T_v)$. Pode-se, então, traçar um gráfico de $F(T_v)$ e com ele calcular o valor de c_v para a fase transiente.

Neste trabalho o procedimento sobredito não foi levado em conta porque, para o solo ensaiado, a argila do Sarapuí, os valores do coeficiente de adensamento na fase inicial do ensaio—trecho em que o material se encontra sobreadensado—são suficientemente altos para que o regime permanente seja atingido num intervalo de tempo da ordem de grandeza de um minuto.

Ao leitor interessado em uma descrição pormenorizada sobre o cálculo de c_v , aconselha-se o artigo de WISSA et alii (1971).

IV.4— COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE O MÉTODO DE INTERPRETAÇÃO DE WISSA et alii (1971).

BYRNE (1972) assinalou que a equação (IV.4) circunscrevia o fenômeno do adensamento a um universo do qual os efeitos do tempo sobre a compressibilidade estavam excluídos. Portanto, WISSA et alii (1971), ao asseverarem que essa expressão fora deduzida sem impor quaisquer restrições à forma da curva $\epsilon_v - \sigma_v$, deveriam ter acrescentado, à guisa de clareza, que tal generalização só seria verdadeira, se não houvesse dependência do tempo nas relações tensão—deformação. Os autores expressamente reconheceram a

procedência das considerações de BYRNE (1972), quando do fechamento da discussão (WISSA et alii, 1973). Sugeriram, no entanto, que o ensaio proposto era um instrumento valioso para determinação das curvas $\epsilon_v - \sigma_v$ correspondentes a taxas de deformação específica relacionadas ao tempo pré-determinadas.

EVANGELISTA e VIGGIANI (1973) mostraram que a hipótese de não-linearidade coaduna com o aumento da sobrepressão hidrostática verificado durante o ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

ZNIDARCIC et alii (1984) reconheceram que a análise elaborada por WISSA et alii (1971) era coerente do ponto de vista teórico, porém, algumas hipóteses não seriam sempre justificadas: a primeira é a que se refere ao caráter constante do coeficiente de adensamento em todo o ensaio, o que raramente ocorre nos solos; a segunda é a que trata m_v ou C_c como invariável. Entenderam que não há justificativa para o uso do modelo linear e quanto ao não-linear, a concordância com a situação real não é boa, especialmente para argilas moles, cujos índices de compressão variam muito [Aliás, considerar C_c constante foge bastante à realidade que se encontra em amostras indeformadas de boa qualidade, como ressaltado por MARTINS (1983)]. Finalmente, asseguraram que admitir c_v constante é menos restritivo durante o regime permanente, caso se observem variações incrementais no comportamento do solo.

O autor deste trabalho manifesta a opinião de que WISSA et alii (1971) desenvolveram uma pesquisa muito bem fundamentada cujo corpo principal é integrado por quatro elementos:

- a) Uma teoria lastreada em uma formulação matemática para interpretar o fenômeno físico do adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$;
- b) Um equipamento para executar o ensaio e obter as propriedades constitutivas do solo;
- c) Um procedimento de ensaio;
- d) Um método para interpretação dos resultados.

As críticas de ZNIDARCIC et alii (1984) ganham mais força somente se inseridas num contexto mais amplo de análise do adensamento—o das deformações finitas—, razão por que não diminuem o mérito das proposições de WISSA et alii (1971), pois estes, explicitamente, fixaram a condição prévia de que tratariam apenas de deformações infinitesimais.

IV.5- CRITÉRIOS PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ENSAIO.

Identifica-se na taxa de deformação específica relacionada ao tempo um aspecto de extrema relevância na técnica do ensaio de adensamento, já que na avaliação de determinados parâmetros é necessário considerar a influência do tempo. CRAWFORD (1988) caracterizou bem essa situação ao argumentar que os efeitos hidrodinâmicos preponderam nos primeiros estágios do adensamento primário, mas, quando a sobrepressão hidrostática se dissipa, a resistência estrutural à deformação torna-se, em termos relativos, mais importante, sendo virtualmente o único fator influenciando a velocidade com que se processa o fenômeno. Aditou, ainda, a esse pensamento a afirmação de que: *"there is no reason to believe that the influence of structure is not occurring during all stages of virgin consolidation"*.

O ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ permite estudar como este parâmetro mantido invariável influencia as relações $\epsilon_v - \sigma_v$. É possível conduzir esse tipo de experimento com velocidades altas, visando à determinação rápida da curva $\epsilon_v - \sigma_v$, dos parâmetros de compressibilidade e da tensão de sobreadensamento. É razoável considerar, no entanto, que há um limite superior para a velocidade, acima do qual as sobrepressões hidrostáticas na base atingem valores elevados o suficiente para que haja um desvio considerável da hipótese de m_v constante e, por conseguinte, da distribuição parabólica da tensão vertical efetiva ao longo da altura do corpo-de-prova. Isto ocorre porque, sob altas velocidades, as variações de tensão num mesmo intervalo de tempo são maiores. Assim, o erro em aproximar o trecho (arco) da curva $\epsilon_v - \sigma_v$ à corda torna-se tanto maior quanto mais elevada for a velocidade.

A escolha da velocidade adequada é uma tarefa em que se deve levar em conta os objetivos do ensaio e as limitações teóricas impostas à análise dos resultados. Assim sendo, esse parâmetro deve ter um valor tal que a sobrepressão hidrostática gerada na base esteja situada entre um mínimo, definido pela acurácia do respectivo transdutor e pela necessidade de obter coeficientes de adensamento realísticos e um máximo, determinado pelo limite a partir do qual as suposições admitidas para a relação $\epsilon_v - \sigma_v$ passam a ser questionáveis.

IV.5.1— O CRITÉRIO DE SMITH e WAHLS (1969).

Esses autores, ao interpretarem o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, propuseram a seguinte expressão empírica para o cálculo de δ :

$$\delta = \frac{c_v C_c}{m^2 H (1 + e_0)} \left[\frac{u_b / \sigma_v}{1 - 0,7(u_b / \sigma_v)} \right] \quad (\text{IV.32}).$$

onde

δ = velocidade (derivada da função deslocamento δ em relação ao tempo).

m = coeficiente de proporcionalidade que corresponde à percentagem de H encontrada no momento de valor máximo de u_b / σ_v (varia entre 0,6 e 0,8).

H = altura inicial do corpo-de-prova.

Impondo-se um valor para u_b / σ_v , estima-se δ pela seleção dos valores correspondentes de c_v , C_c e m . Inicialmente, o arbitramento pode ser feito à luz da experiência com o material a ser ensaiado ou através de correlações entre LL , c_v e C_c .

A confiabilidade do valor de δ depende criticamente da escolha dessas três grandezas e, evidentemente, após realizar um ensaio, é possível fazer melhores estimativas.

Além da equação (IV.32), sugeriu-se que u_b / σ_v tivesse um valor máximo de 50%.

IV.5.2— O CRITÉRIO DE WISSA et alii (1971).

Como a razão u_b / σ_v está intimamente ligada à taxa de deformação específica relacionada ao tempo, esses autores fixaram um intervalo de 2% a 5% para a primeira, visando estabelecer um nível de sobrepressão hidrostática na base que permitisse simultaneamente obter a curva $\epsilon_v - \sigma_v$ e calcular c_v segundo padrões confiáveis. Dessa forma, mantém-se no ensaio um gradiente hidráulico relativamente baixo e as hipóteses admitidas na teoria adequam-se melhor ao comportamento do material.

Essas recomendações fundamentaram-se na comparação de valores de c_v calculados supondo relações lineares ou não-lineares entre ϵ_v e σ_v . Verificou-se, então, que para u_b / σ_v acima de 5% havia grande discrepância entre os resultados nas duas situações consideradas.

IV.5.3- O CRITÉRIO DE GORMAN et alii (1978).

Segundo esses autores, o limite inferior da sobrepressão hidrostática desenvolvido no ensaio devia ser de 7kPa. Abaixo desse valor, a determinação de c_v ficaria prejudicada, pois u_b é fator integrante do denominador da equação desse parâmetro. Quanto ao limite superior de u_b , os ensaios realizados demonstraram que a razão u_b/σ_v não devia superar 32%.

Essas conclusões foram provenientes de uma extensa experimentação em materiais bastante díspares do ponto de vista das propriedades geotécnicas, comparando-se a sobrepressão hidrostática mantida baixa no ensaio de gradiente controlado com o valor máximo de u_b/σ_v encontrado em experimentos nos quais a $\dot{\epsilon}_v$ foi controlada em um valor situado no intervalo das observadas no primeiro tipo de experimentação.

IV.5.4- O CRITÉRIO DA ASTM.

A norma ASTM D4186-82 (1982) fixou procedimentos para execução do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ e estabeleceu valores para este parâmetro, tomando por base uma correlação com o limite de liquidez elaborada por GORMAN et alii (1978).

Na tabela (IV.1) apresentam-se os valores de $\dot{\epsilon}_v$ sugeridos pela ASTM em 1982.

No que tange à razão u_b/σ_v , fixou-se que o valor máximo admissível está situado na faixa entre 3% e 20%.

LL (%)	$\dot{\epsilon}_v$ (S ⁻¹)
até 40 %	$6,67 \times 10^{-6}$
40 - 60	$1,67 \times 10^{-6}$
60 - 80	$6,67 \times 10^{-7}$
80 - 100	$1,67 \times 10^{-7}$
100 - 120	$6,67 \times 10^{-8}$
120 - 140	$1,67 \times 10^{-8}$

TABELA IV. 1 - Correlação entre LL e $\dot{\epsilon}_v$ para ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v =$ constante.

IV.5.5— O CRITÉRIO UTILIZADO NA SUÉCIA.

LARSSON e SÄLLFORS (1986) expenderam a opinião de que o ponto crucial do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo era determinar quão rápido ele podia ser realizado e ainda produzir resultados que possibilitassem a avaliação do comportamento a longo prazo da argila.

Para as argilas da Suécia esse valor limite deve ser $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, conforme mostrado na figura (IV.10), e a razão u_b/σ_v não deve exceder 15%.

LEGENDA

- Ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$
- "gyttja" argilosa de Vallda
 - Argila de Bäckebol
 - ┌ Ensaio convencional
 - └ "gyttja" argilosa de Vallda
- σ'_{vp} = Tensão de sobreadensamento para $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

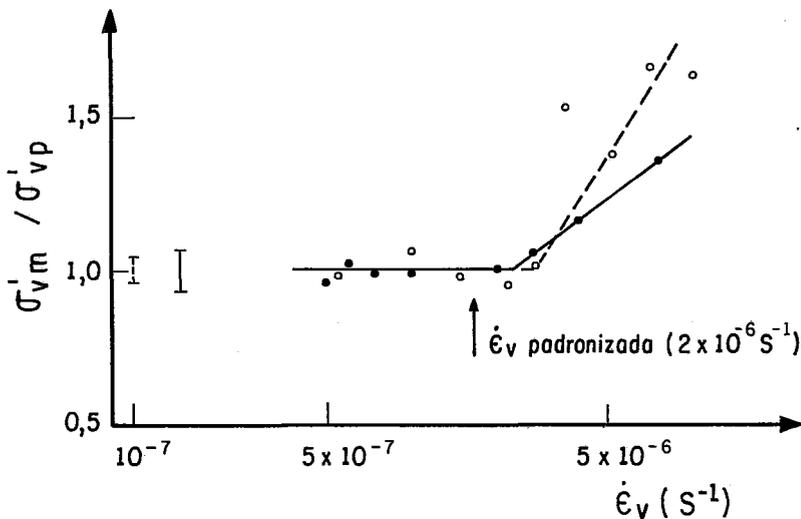


FIG. IV.10 - Tensão de sobreadensamento normalizada versus taxa de deformação específica relacionada ao tempo ($\dot{\epsilon}_v$).

(APUD LARSSON E SÄLLFORS, 1986)

Esses procedimentos aconselhados originaram-se de evidências empíricas, consolidadas ao longo de ensaios efetuados desde 1971, segundo os quais havia equivalência entre as curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$, características de várias taxas de deformação específica relacionadas ao tempo, se não se ultrapassar um determinado valor crítico desse último parâmetro. Convém salientar que os efeitos da velocidade de ensaio são eliminados por uma correção desenvolvida no S.G.I., levando-se em conta que a distribuição parabólica das tensões efetivas é afetada na vizinhança da tensão de sobreadensamento pela abrupta mudança do módulo edométrico. Tal fato enfatiza a necessidade de se ter baixos valores de sobrepressão hidrostática, a fim de reduzir ao máximo o intervalo de tensões efetivas cujo média possa não ser fielmente traduzida pela equação (IV.22).

Releva, ainda, assinalar que a aplicação desse método sueco a outras argilas produziu resultados semelhantes aos aqui descritos. Por exemplo, para

a argila de Gloucester, Canadá, há indicação na figura (IV.11) da existência de uma faixa ideal da velocidade de ensaio.

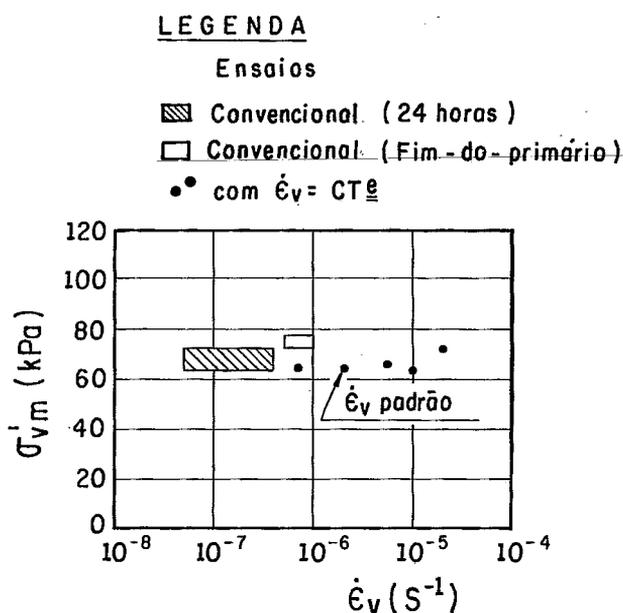


FIG. IV.11 - Tensão de sobreadensamento de ensaios convencionais e com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ (argila de Gloucester, profundidade de 3,4 a 3,9 m).

(APUD LARSSON E SÄLLFORS, 1986)

IV.5.6- O CRITÉRIO DO INSTITUTO DE GEOTECNIA DA NORUEGA (N.G.I.).

Apoiando-se na experiência adquirida com ensaios de adensamento com carregamento continuamente crescente com tempo em argilas norueguesas, SANDBAEKKEN et alii (1986) comentaram que uma taxa de deformação específica relacionada ao tempo entre $1,39 \times 10^{-6} s^{-1}$ e $2,78 \times 10^{-6} s^{-1}$ era adequada para manter u_b/σ_v entre 2 e 7%. Recomendaram, ainda, que essa razão não deve ficar acima de 5 a 10%.

IV.5.7- O CRITÉRIO DE ARMOUR E DRNEVICH.

ARMOUR e DRNEVICH (1986) apresentaram um método para

selecionar a taxa de deformação específica relacionada ao tempo, o qual se baseia na formulação teórica de WISSA et alii (1971). Assim sendo, para um material não-linear ($\Delta \epsilon_v \propto \Delta \log \sigma'_v$), pode-se escrever:

$$r = \frac{-2 \sigma_v k}{\gamma_a 0,434 H^2} \log[1 - (u_b/\sigma_v)] \quad (\text{IV.33}).$$

onde $r = \dot{\epsilon}_v$.

As grandezas σ'_v , k , u_b/σ_v e H variam durante um ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo. Como a razão de u_b/σ_v pode ser fixada num máximo desejado, é preciso saber que valores σ'_v , k e H assumirão no instante do ensaio correspondente a esse limite superior. Foi proposto considerar a variação de k e H entre o início do experimento e aquele ponto. Quanto à tensão efetiva, cuja magnitude provavelmente está associada ao tipo de solo, ao módulo edométrico e ao grau de amolgamento, preferiu-se tratá-la de uma forma geral que reunisse todos esses fatores. Desse modo, transforma-se a equação (IV.33) numa empírica:

$$r = \frac{-C P_a k_i}{\gamma_a H^2} \log[1 - (u_b/\sigma_v)_{\text{máx.}}] \quad (\text{IV.34}).$$

onde

C = coeficiente que depende das propriedades do solo.

P_a = pressão atmosférica (incluída para manter a homogeneidade da equação).

k_i = permeabilidade no começo do ensaio.

$\frac{u_b}{\sigma_v}$ = máximo valor da razão entre a sobrepressão

hidrostática na base e a tensão total.

Define-se o coeficiente C como:

$$C = \exp(8 - 3IL) \quad (\text{IV.35}).$$

onde

IL = índice de liquidez = $\frac{h - LP}{LL - LP}$, sendo h = teor de

umidade natural

Levando em (IV.33), tem-se:

$$r = \frac{-[\exp(8 - 3IL)] P_a k_i \log[1 - (u_b/\sigma_v)_{\text{máx.}}]}{\gamma_a H^2} \quad (\text{IV.36}).$$

Para determinar os parâmetros que integram a equação (IV.36), é conveniente, segundo os autores, distinguir os seguintes aspectos:

- a) A permeabilidade (k_v) deve ser medida no próprio equipamento de ensaio;
- b) O máximo valor admissível para u_b/σ_v deve ser 40% ou 50%, se relações não-lineares são utilizadas no cálculo do coeficiente de adensamento;
- c) O coeficiente (C) correlaciona-se de forma exponencial com o índice de liquidez (IL), o que é representado na equação (IV.35).

IV.5.8— O CRITÉRIO DE ESCOLHA DE VELOCIDADE UTILIZADO NESTE TRABALHO.

IV.5.8.1— CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Tendo em vista que a argila do Sarapuí apresenta elevada compressibilidade e valores de limite de liquidez entre 150% e 100%, respectivamente, para as profundidades de entre 3,0 m e 8,0 m, as taxas de deformação específica relacionadas ao tempo prescritas na norma ASTM.D.4186-82 para esse tipo de solo tornariam inexequível o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. A título de ilustração da impropriedade do uso da correlação $LL-\dot{\epsilon}_v$, tome-se uma amostra, à profundidade de 4,0 m a 4,5 m, com $LL = 130\%$, cuja deformação específica vertical atinja 55% a uma tensão total máxima de 800 kPa. Nesse caso, haveria necessidade de o ensaio prolongar-se por 12 meses e 22 dias!

Discrepâncias grandes entre as taxas de deformação específica relacionadas ao tempo reais de ensaio, para um valor máximo de u_b/σ_v de 20%, e as sugeridas pela tabela (IV.1) foram reportadas por ARMOUR e DRNEVICH (1986). Esses autores chamaram a atenção para o fato de que o método da ASTM não considera os efeitos do sobreadensamento, o que leva estimativas errôneas de $\dot{\epsilon}_v$; maiores que as recomendáveis, no caso de solos sobreadensados, e menores, no de normalmente adensados.

Como os critérios de seleção de velocidade de ensaio apresentados nos itens anteriores envolviam experiência adquirida com solos regionais ou implicavam modificações no equipamento existente na COPPE (célula universal do M.I.T.), optou-se por desenvolver um método simples que incorporasse a prática já acumulada de ensaios convencionais de adensamento na argila do Sarapuí e fosse compatível com as peculiaridades desse material. Assim sendo, procurou-se fazer uma análise do fenômeno físico do adensamento, à luz das condições impostas pelos dois procedimentos de ensaio, para identificar em que circunstâncias o experimento executado com número mínimo de incrementos de tensão total poderia ser usado como instrumento de

previsão do que ocorre quando se estende infinitamente a quantidade desses acréscimos, a uma taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo.

IV.5.8.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL E COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$ EM CORPOS-DE-PROVA DE MESMA ALTURA H E SOMENTE UMA FACE DRENANTE.

O critério de velocidade consiste em adotar para o ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ a mesma velocidade observada no topo do corpo-de-prova num estágio do ensaio convencional para um dado grau de adensamento. Assim, o que teoricamente se está fazendo é igualar os gradientes hidráulicos na face drenante de ambos os experimentos num determinado instante! Isto porque a distribuição das sobrepressões hidrostáticas num ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ independe do tempo, o que não acontece num ensaio convencional. Pode-se, então, a partir de resultados deste último experimento escolher um valor de $\dot{\epsilon}_v$ tal que no primeiro se tenha uma sobrepressão hidrostática pré-estabelecida.

A idéia acima pode ser posta em prática da maneira que segue: levando-se em conta corpos-de-prova com mesma altura e somente uma face drenante, as distribuições da sobrepressão hidrostática para ambos os ensaios apresentam-se como na figura (IV.12).

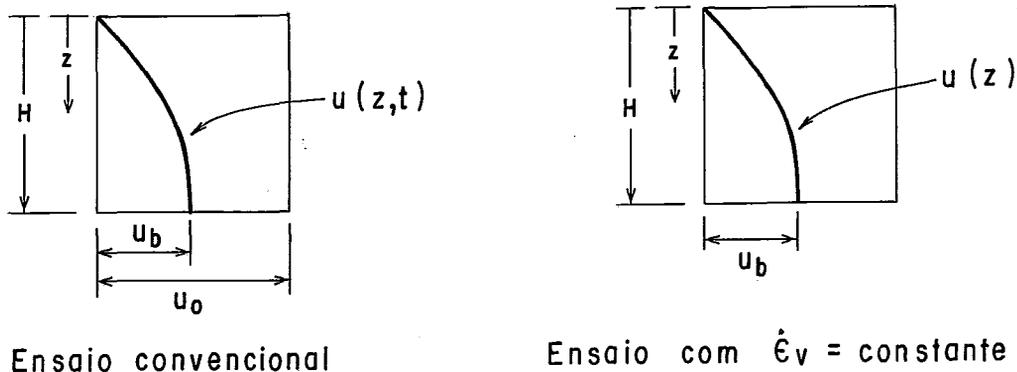


FIG. IV.12 - Distribuição das sobrepressões hidrostáticas no ensaio convencional e no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

No caso do ensaio convencional, a expressão matemática de u é a seguinte:

$$u(z,t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4 u_0}{(2n+1)\pi} \operatorname{sen}(2n+1) \frac{\pi z}{2H} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.37})$$

Para o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, u é dado por:

$$u(z) = \frac{r \gamma_a H}{k} \left[z - \frac{z^2}{2H} \right] \quad (\text{IV.38})$$

Igualar as velocidades do topo dos corpos-de-prova nos dois ensaios significa que os gradientes hidráulicos nas faces drenantes serão considerados idênticos, haja vista a igualdade dos coeficientes de permeabilidade. Assim, $\frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0}$ no ensaio convencional é igual a $\frac{du}{dz} \Big|_{z=0}$ no ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Logo, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \frac{2 u_0}{H} \sum_{n=0}^{\infty} \cos(2n+1) \frac{\pi z}{2H} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \Big|_{z=0} &= \\ &= \frac{r \gamma_a H}{k} \left[1 - \frac{z}{H} \right] \Big|_{z=0} \end{aligned} \quad (\text{IV.39})$$

Desenvolvendo a expressão acima, tem-se:

$$\frac{2 u_0}{H} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} = \frac{r \gamma_a H}{k} \quad (\text{IV.40})$$

Assim, a velocidade a ser adotada no ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ será dada por:

$$r H = \frac{2k u_0}{\gamma_a H} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.41})$$

A sobrepressão hidrostática na base do corpo-de-prova no ensaio de

adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ fica:

$$u_b = \frac{r \gamma_a H^2}{2k} = u_o \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.42})$$

IV.5.8.3- ENSAIO DE ADENSAMENTO CONVENCIONAL COM DUAS FACES DRENANTES E ENSAIO DE ADENSAMENTO COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$ EM CORPOS-DE-PROVA COM A MESMA ALTURA H.

Igualando-se as velocidades do topo dos corpos-de-prova de ambos os ensaios, chega-se a:

$$r H = \frac{8k u_o}{\gamma_a H} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.43})$$

e

$$\frac{u_b}{4} = \frac{r \gamma_a H^2}{8k} = u_o \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.44})$$

O exame das expressões (IV.42) e (IV.44) permite concluir que, caso se queira realizar um ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ com um determinado valor de u_b , basta fazer um estágio de carregamento no ensaio convencional e escolher um T_v tal que as equações (IV.42) e (IV.44) sejam atendidas. Alternativamente, como o grau de adensamento médio é função somente de T_v , pode-se tomar, no ensaio convencional, a velocidade correspondente a um determinado \bar{U} e adotá-la no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

Deve-se observar que o critério aqui apresentado lastreia-se na validade da hipótese da constância de k e m_v , portanto, teoricamente, qualquer estágio de carregamento do ensaio convencional pode ser utilizado na previsão de velocidade. Entretanto, sabe-se que esses parâmetros variam com as tensões efetivas. Assim sendo, parece conveniente valer-se de um estágio de carga $\sigma - \sigma_o = u_o$ tal que σ seja a tensão a partir da qual se quer, no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, uma sobrepressão hidrostática na base menor ou igual àquela pré-estabelecida. Considerando esse raciocínio a equação (IV.44)

pode ser assim expressa:

$$\frac{u_b}{\sigma - \sigma_o} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.45})$$

Alternativamente, também, pode-se escrever:

$$\frac{u_b}{\sigma} = 4 \left[1 - \frac{\sigma_o}{\sigma} \right] \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{IV.46})$$

CAPÍTULO V.

METODOLOGIA EMPREGADA NOS ENSAIOS DE
ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO
ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.

V.1- DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.

Utilizou-se o aparelho WF24650 (foto V.1), fabricado pela Wykeham Farrance Engineering LTD., cuja concepção foi baseada no modelo desenvolvido por WISSA et alii (1969, 1971).

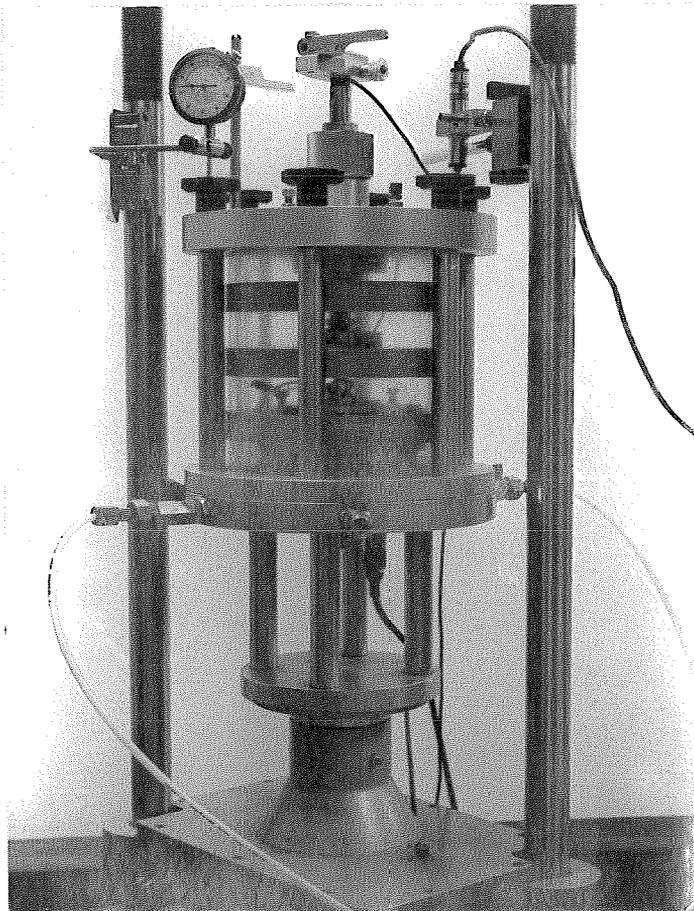


FOTO V.1-VISTA GERAL DO APARELHO WF24650.

À guisa de facilitar a intelecção do seu funcionamento, pode-se dividi-lo em duas partes principais, que são isoladas hidraulicamente por um diafragma rolante de borracha: câmara de ensaio e célula de adensamento (foto V.2).

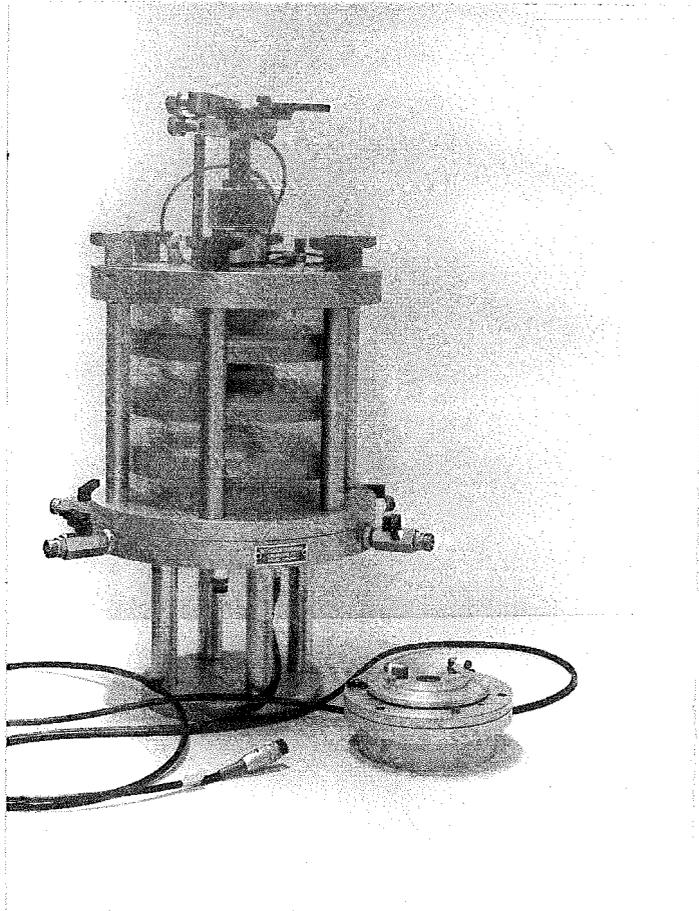


FOTO V.2-CÂMARA DE ENSAIO E CÉLULA DE ADENSAMENTO.

Seus componentes, a seguir descritos, são esquematicamente apresentados na figura (V.1) e na foto (V.1).

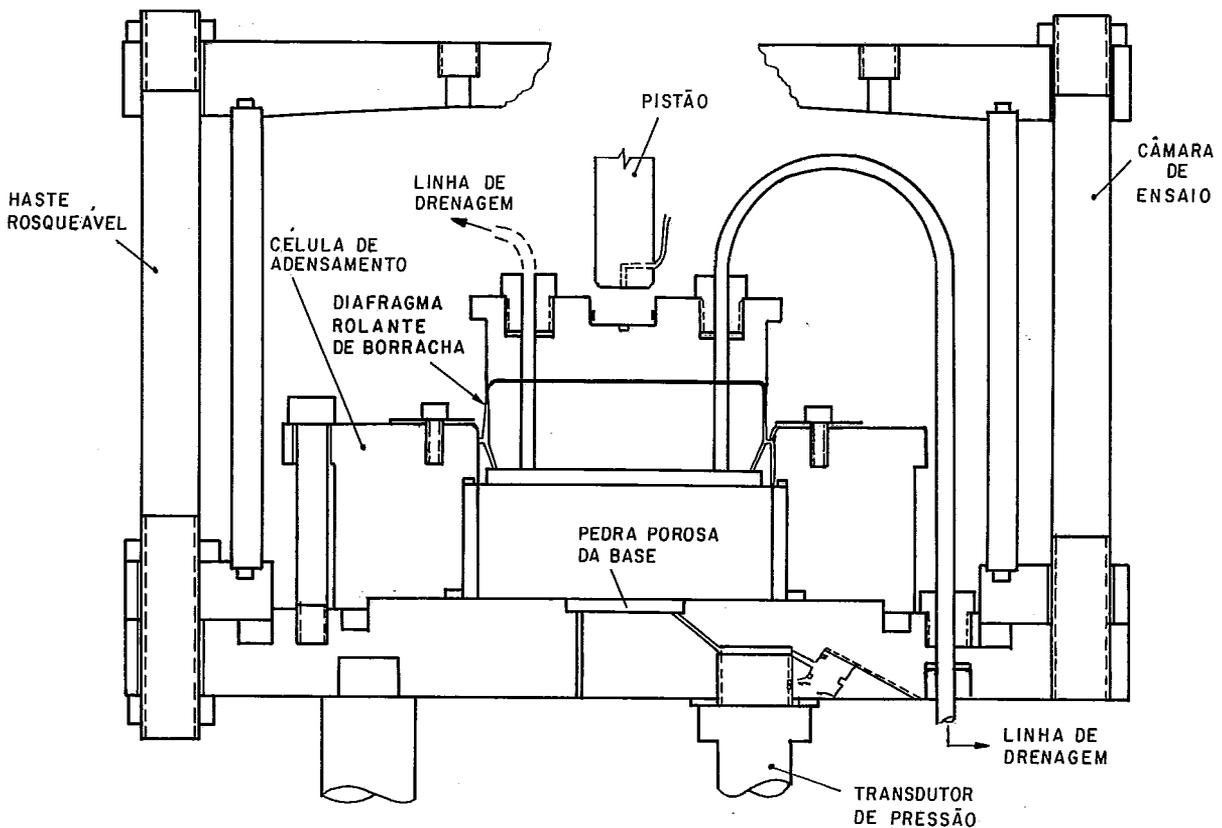


FIG. V.1 - Desenho esquemático (seção transversal) do equipamento WF 24650.

V.1.1- CÂMARA DE ENSAIO.

O arcabouço superior dessa parte do equipamento (foto V.3) é semelhante ao dos usados em células triaxiais, compondo-se de um tubo cilíndrico de acrílico reforçado por três níveis de braçadeiras fixadas externamente.

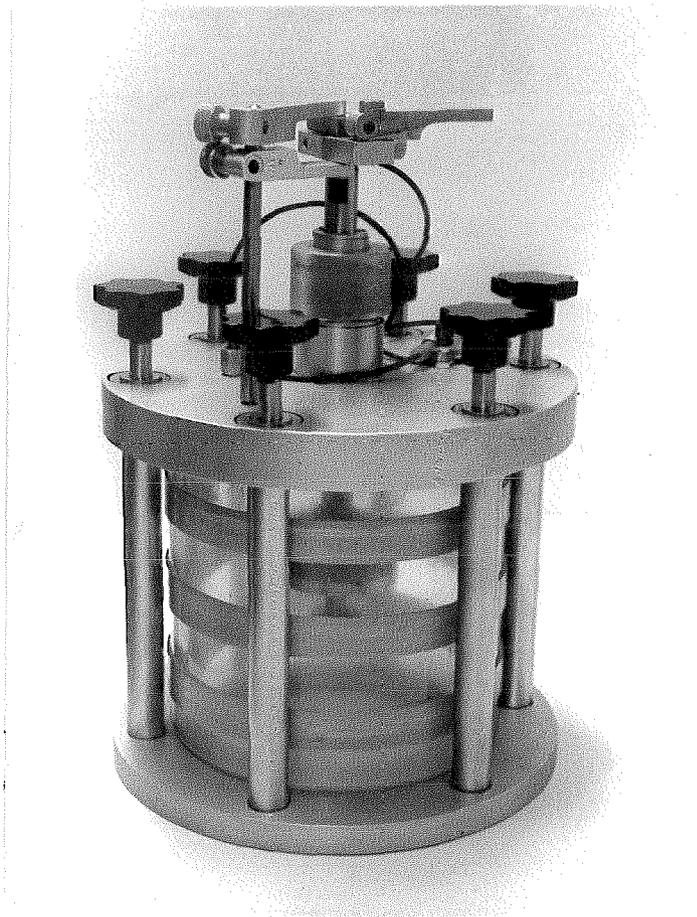


FOTO V.3—PARTE SUPERIOR DA CÂMARA DE ENSAIO.

Na extremidade mais elevada um pistão segmentado, cujo elemento terminal é um transdutor de força, movimenta-se no interior de rolamentos esféricos e tem seu curso limitado por um pequeno diafragma rolante de borracha.

A base (foto V.4) apóia-se sobre um suporte metálico, liga-se à parte superior por hastes rosqueáveis e possui uma pedra porosa incrustada na sua superfície. Há, ainda, quatro torneiras, sendo duas diretamente vinculadas ao interior da câmara e duas para as linhas de drenagem. Na parte inferior um sistema de canáliculos interligados possibilita o fluxo da água em direção a três elementos constituintes da base: torneira de escoamento, suspiro e reentrância com rosca interna para fixar o transdutor de pressão. Esta última característica é importante, pois permite minimizar o tempo de resposta desse instrumento elétrico.

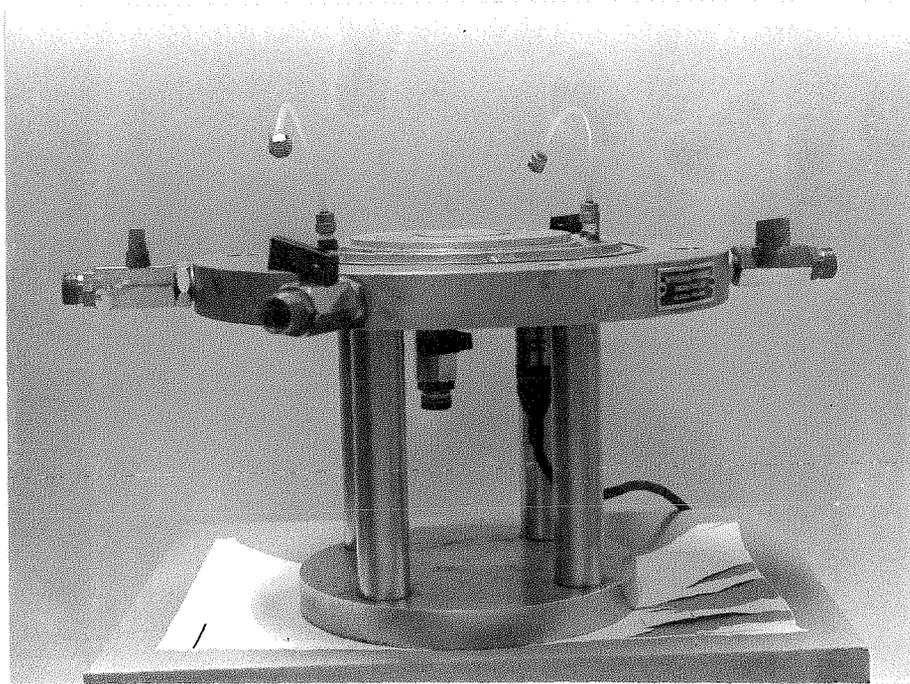


FOTO V.4—BASE DA CÂMARA DE ENSAIO.

V.1.2— CÉLULA DE ADENSAMENTO.

A conexão desse componente (fotos V.5 e V.6) com a base da câmara se dá por meio de três parafusos de cabeça frisada, dispostos segundo um triângulo equilátero. Sua parte interna é constituída de uma peça deslocável cujas extremidades são interligadas por um diafragma rolante de borracha. Dois parafusos localizados na borda lateral estabelecem um limite superior para o movimento vertical do conjunto. No extremo superior há dois orifícios com rosca interna para conexão dos tubos de drenagem e no inferior, uma placa metálica com uma parte reentrante na qual se encaixa a pedra porosa de topo.

O anel tem altura de 19 mm e área de 78,46 cm². É pressionado para o interior da célula de forma que o ajuste perfeito com a parede desta proporcione a inexistência de deformações horizontais.

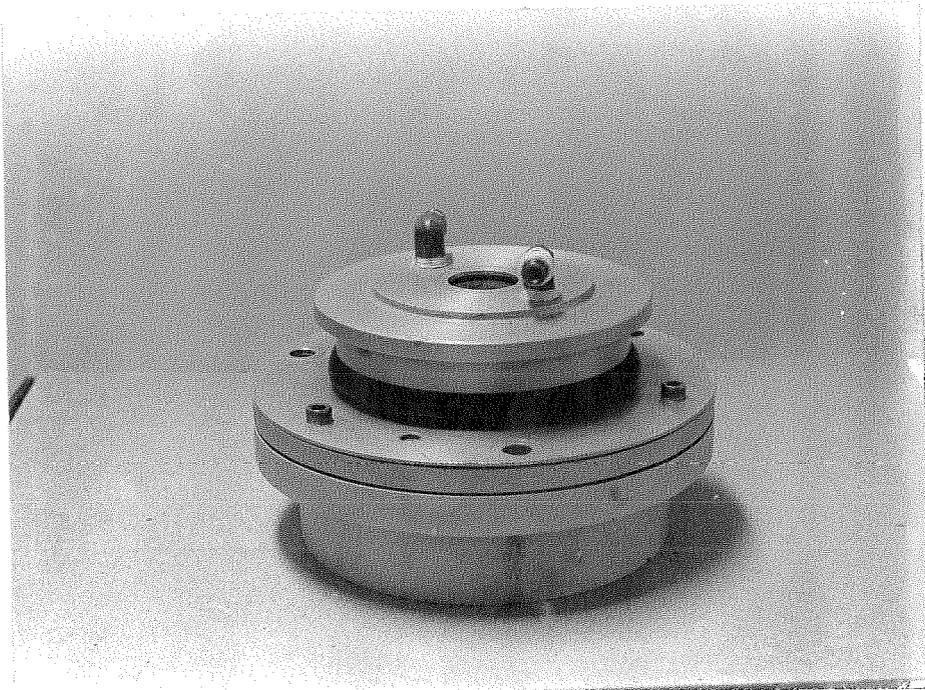


FOTO V.5-VISTA DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

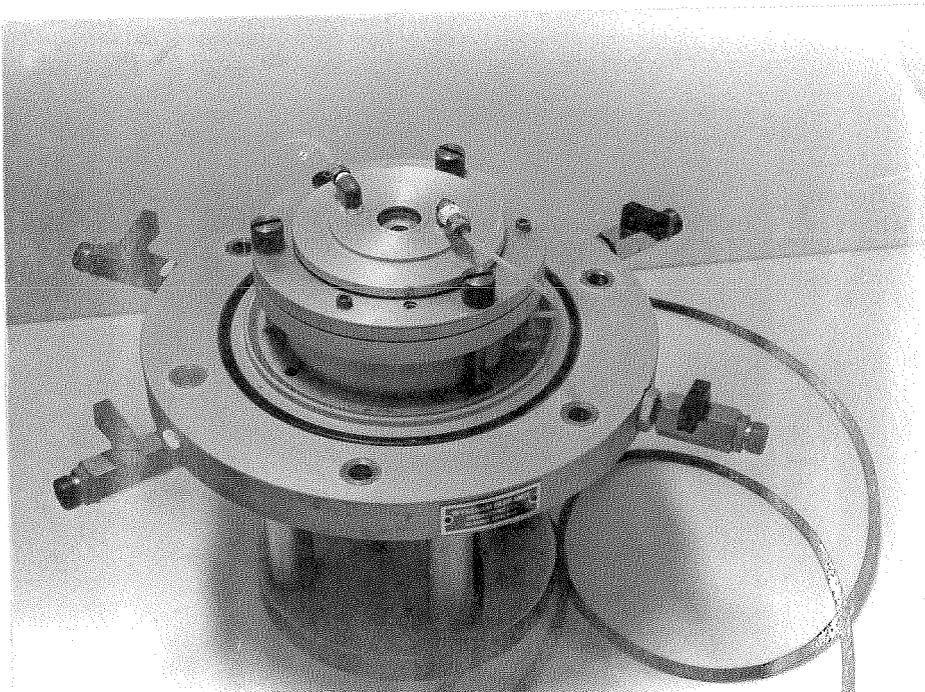


FOTO V.6- VISTA DA CÉLULA DE ADENSAMENTO
JÁ COLOCADA NA BASE

V.1.3- INSTRUMENTAÇÃO.

Quatro transdutores elétricos foram utilizados para medições das grandezas necessárias ao cálculo e à monitoração do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo: força, sobrepressão hidrostática, deslocamento e volume. Na sua calibração foi utilizado o sistema de aquisição de dados descrito a seguir.

V.1.3.1- TRANSDUTOR DE FORÇA.

O aparelho de que se fez uso é de fabricação da Wykeham Farrance Engineering LTD., n° de série 8604560, modelo 4958. Sua faixa de trabalho é de até 25 kN, com um fundo de escala da ordem de 20 mV para 10 V de alimentação máxima em corrente contínua.

A calibração foi realizada no pendural existente no laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ, observando-se as seguintes etapas:

- a) A leitura inicial foi definida como a correspondente à situação em que o transdutor suportava somente seu peso próprio;
- b) Tomando pesos aferidos como padrões, foram efetuados oito ciclos de carga e descarregamento no pendural simples e três no braço de alavanca com relação 1:10, alcançando-se o total máximo de 1,7 kN no primeiro caso e 17 kN no segundo;
- c) O número de estágios de carregamento foi igual ao de descarga e em cada um deles anotavam-se a leitura apontada pelo conversor analógico-digital da Hewlett Packard (HP3457A) e a força aplicada no transdutor.

Após se cumprir todo esse procedimento, calculou-se a constante do transdutor de força como sendo igual a: $7,85 \times 10^{-2} \text{ mV/kN.V}_{\text{ent}}$ (onde V_{ent} = diferença de potencial fornecida pela fonte de alimentação).

V.1.3.2- TRANSDUTOR DE PRESSÃO.

O modelo empregado, WF17060, n° 1252, produzido pela Wykeham Farrance LTD., tem capacidade de 1000 kPa e fundo de escala de aproximadamente 100 mV para 10 V de alimentação máxima em corrente contínua.

Na calibração desse instrumento os sinais elétricos foram associados a desníveis conhecidos das colunas de mercúrio dos potes do sistema proposto por BISHOP e HENKEL (1962) para o ensaio triaxial. Esse processo foi

utilizado e descrito por COUTINHO (1976) e LIRA (1988) e, em razão disso, no presente trabalho só será tratado um outro método envolvendo um manômetro de mercúrio para pressões até 100 kPa (ver Apêndice A.3).

A constante do transdutor de pressão foi definida, então, como sendo: $1,05 \times 10^{-2} \text{ mV/kPa.V}_{\text{ent}}$.

V.1.3.3— TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO.

O instrumento utilizado é do tipo HS10, n.º de série 3991, da Wykeham Farrance LTD. É excitado com corrente contínua ou alternada e tem curso máximo de 11,06 mm. O fundo de escala é da ordem de 50 mV para uma diferença de potencial máxima de 10 V da fonte de alimentação em corrente contínua.

A calibração foi realizada num dispositivo não-metálico, ao qual se prendia um micrômetro de profundidade para medir os deslocamentos observados. Após três ciclos inteiros de ascensão e descenso da haste do transdutor, definiu-se sua constante: $4,64 \times 10^{-1} \text{ mV/mm.V}_{\text{ent}}$.

V.1.3.4— TRANSDUTOR DE VOLUME.

O modelo com que se trabalhou é de fabricação da Wykeham Farrance Engineering LTD. Possui um diafragma rolante de borracha que proporciona boas características de baixo atrito. A variação de volume é acusada por um transdutor de deslocamento submersível e alcança o valor máximo de 80 cm^3 . O fundo de escala é de cerca de 40 mV para 10 V de alimentação máxima em corrente.

Para calibração seguiram-se as recomendações descritas por LIRA (1988). Foram efetuados três ciclos completos de ascenso e descida do pistão. Associando-se os valores da variação de volume às respectivas leituras no HP3457A, pôde-se determinar a constante do transdutor de volume como sendo igual a: $1,61 \times 10^{-1} \text{ mV/cm}^3 \cdot \text{V}_{\text{ent}}$.

Deve-se assinalar que o transdutor de volume foi introduzido na instrumentação do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ com o fito de confrontar as deformações específicas volumétricas com as axiais. Portanto, não constitui a medição de volume um aspecto imprescindível na análise desse experimento.

V.1.3.5- EXTENSÔMETRO MECÂNICO.

O objetivo do uso desse aparelho de medida foi o de comparar a magnitude do deslocamento por ele registrada com a lida no transdutor elétrico. Podia-se, também, avaliar a confiabilidade do sistema de aquisição de dados que estava sendo implantado.

O extensômetro utilizado é da Mitutoyo e tem sensibilidade de 0,01 mm/divisão.

V.2- A AQUISIÇÃO E O PROCESSAMENTO DE DADOS.

V.2.1- INTRODUÇÃO.

O sistema automático de aquisição e processamento dos resultados dos ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo é constituído dos componentes apresentados na figura (V.2), a seguir descritos.

V.2.2- OS APARELHOS ELETRÔNICOS.

MICROCOMPUTADOR.

O equipamento empregado é do padrão IBM-PC XT, de fabricação da EBC, com 512 kbytes de memória RAM, um disco rígido de 20 Mbytes, um monitor monocromático, um relógio interno de 4,77 MHz e um "drive" de 360 kbytes.

Esse microcomputador dispõe de um cartão controlador STD 8410, da Sistemas Técnicos Digitais S.A. Trata-se de uma interface do padrão GPIB, IEEE 488, para comunicação com o conversor analógico-digital.

CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL.

Utilizou-se o modelo HP3457A, da Hewlett Packard, o qual possui dez canais para leitura de sinal, um cartão multiplexador HP44492, resolução máxima expandida de 7,5 dígitos e capacidade para medir voltagem em corrente contínua ou alternada, frequência, período, temperatura e resistência.

Esse equipamento tem funções de multímetro, podendo ser operado através do painel frontal para medições a dois ou quatro fios.

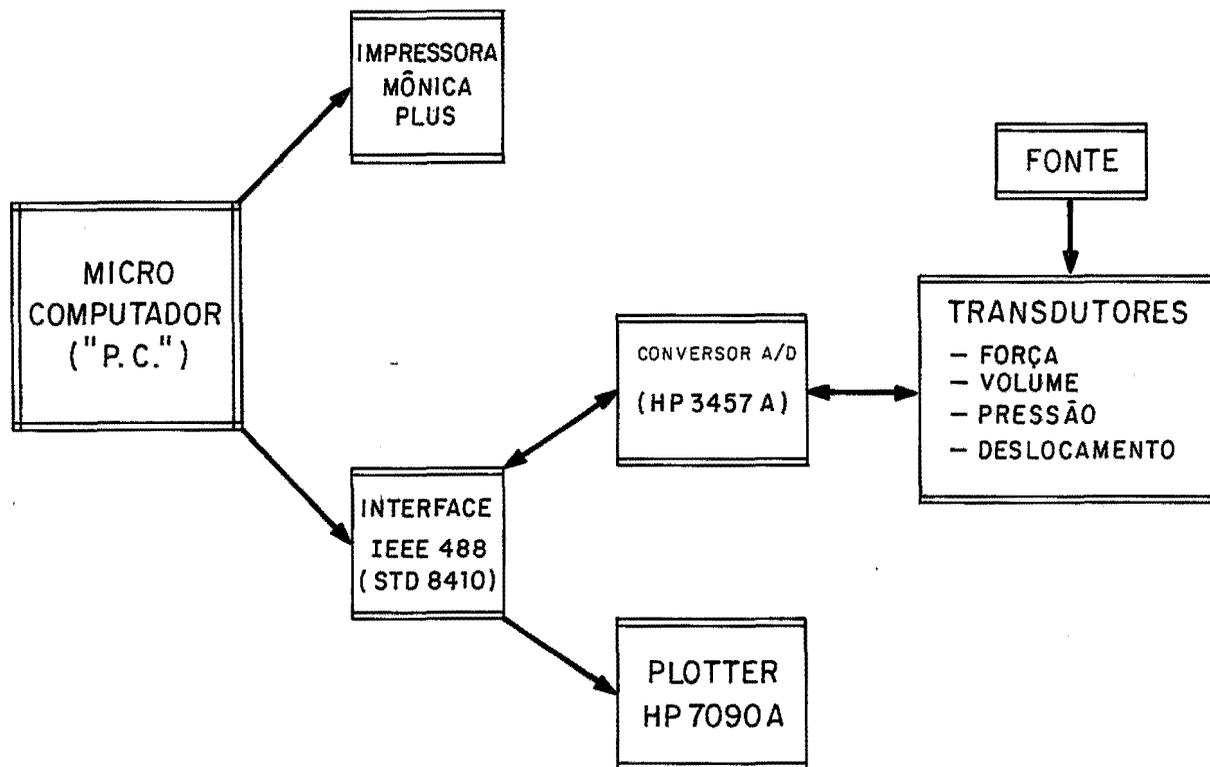


FIG. V.2 - Principais equipamentos do sistema de aquisição e processamento de dados do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ em uso no laboratório de geotecnia na COPPE/UFRJ.

"PLOTTER".

Os gráficos dos resultados foram feitos num equipamento de fabricação da Hewlett-Packard, o HP7090A. Esse "plotter" caracteriza-se por possuir um conjunto de seis penas para traçado gráfico, com velocidade ajustável, em papel A-4, A-3 ou folha de transparência.

IMPRESSORA.

Fez-se uso da impressora Mônica plus EI6030.

FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Todos os quatro transdutores foram ligados a uma única fonte de corrente contínua, de fabricação da ENTELBRA. Esse aparelho tem dispositivos para ajustar o sinal de excitação e controlar a corrente para dois ou quatro fios.

V.2.3- A BANCADA DO SISTEMA AUTOMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

O espaço físico onde estão dispostos todos os equipamentos que integram o sistema automático de aquisição e processamento de dados do laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ foi objeto de extensa descrição publicada por LIRA (1988) e PAIVA et alii (1988). Por essa razão, aqui só se tratará da parte que concerne ao ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo.

O módulo da bancada de que se valeu para conexão dos quatro transdutores elétricos é o de número 3 (foto V.7). Os fios que interligam o conversor analógico-digital, a fonte e os instrumentos de medida estão embutidos em tubulação adequada para evitar influências externas danosas.

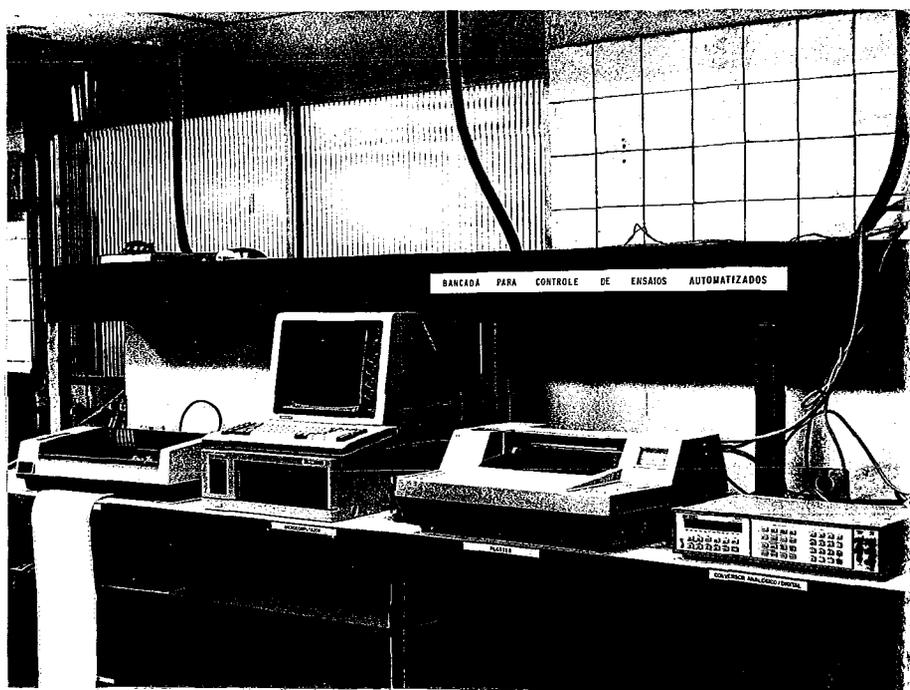


FOTO V.7- VISTA GERAL DA BANCADA DO SISTEMA AUTOMÁTICO DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

V.2.4- O PROGRAMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS.

Os aspectos que nortearam o preparo do programa de aquisição automática de dados do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo foram:

- a) Optou-se por um microcomputador do padrão PC, devido à tendência crescente de uso desse tipo de equipamento para controle e acompanhamento de ensaios;
- b) Era conveniente, uma vez definido o modelo PC, utilizar a interface STD 8410 disponível no laboratório;
- c) O conversor analógico-digital HP3457A, por sua elevada resolução, reunia as características imprescindíveis à eliminação do condicionamento dos sinais de saída dos quatro transdutores;
- d) A experiência existente no laboratório indicava a necessidade de fazer um programa dedicado somente ao experimento em questão.

Partiu-se, então, para elaborar um programa—apresentado no apêndice A.2—com a seguinte capacidade:

- a) Comandar e controlar as leituras de cinco canais (quatro transdutores e fonte de alimentação) em intervalos de tempos previamente fixados;
- b) Projetar no monitor as leituras efetuadas, os parâmetros força, deslocamento, volume e sobrepressão hidrostática devidamente calculados e o tempo decorrido de ensaio;
- c) Imprimir simultaneamente em formulário de papel contínuo todos os resultados do item anterior;
- d) Fazer quinhentas leituras de cada canal;
- e) Permitir que facilmente fosse introduzida qualquer alteração das constantes do transdutor, número total de leituras e intervalo de tempo entre leituras;
- f) Arquivar todos os dados para posterior tratamento e cálculo.

V.2.5— OS PROGRAMAS PARA PROCESSAMENTO DOS DADOS.

Uma vez terminada a aquisição de dados e de posse do arquivo de saída, era preciso calcular todos os parâmetros representativos do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Em seguida, deviam ser traçados gráficos relacionando as grandezas: $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.), $e - \sigma_v$ (esc.log.), $u_b - \sigma_v$ (esc.log.), $\delta - t$, $c_v - \sigma_v$ (esc.log.) e $(u_b/\sigma_v) - \sigma_v$ (esc.log.).

Foram criados dois programas (ver apêndice A.2) para desempenhar as tarefas acima assinaladas: o primeiro, de nome PROCS, é responsável pelo cômputo dos parâmetros e produção de um arquivo de saída próprio para uso em pacote gráfico; o segundo, denominado DXF, permite o traçado de gráficos no "plotter" HP7090A, em papel A-4 ou transparência.

V.2.5— COMENTÁRIOS FINAIS.

O sistema de aquisição de dados caracteriza-se por ser dedicado ao ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, ou seja, o microcomputador ocupa-se exclusivamente das tarefas que lhe competem no processo de controle e acompanhamento desse experimento, ficando sobrestadas quaisquer outras atividades.

O emprego do conversor analógico-digital (também multímetro multiplexador), dada sua alta resolução, tornou possível que não houvesse necessidade de fazer condicionamento do sinal de saída dos transdutores. Dessa forma, evitaram-se os problemas causados por ruídos no processo de

amplificação, os quais são de difícil tratamento e detecção, conforme salientado por GERMAINE (1985).

Todos os quatro transdutores foram vinculados a uma única fonte de corrente contínua, o que diminui bastante as interferências externas no processo de emissão e recebimento de sinais.

Para se aferir o sistema de aquisição de dados que estava sendo implantado, foram feitas comparações das leituras dos instrumentos mecânicos com as dos eletrônicos. Como os resultados se mostraram concordantes no decorrer dos ensaios e calibrações, estabeleceu-se que o grau de confiabilidade desse novo processo era, no mínimo, igual à do padrão e com as vantagens de reunir ao mesmo tempo rapidez, eficiência e reduzida intervenção do elemento humano.

V.3- ENSAIOS PRELIMINARES.

V.3.1- O MATERIAL ENSAIADO.

Os ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, tanto da fase preliminar do trabalho quanto da final, foram realizados na argila do Sarapuí, já anteriormente descrita no item (II.5.4.2).

As etapas de extração das amostras no campo, extrusão em laboratório e moldagem obedeceram aos critérios recomendados nos itens (II.5.4.2) e (II.5.4.3.b).

V.3.2- O PROCEDIMENTO INICIAL.

Como não havia experiência anterior no laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ a respeito do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, nem tampouco com o manuseio do equipamento adquirido da Wykeham Farrance Engineering LTD., restava somente a alternativa de iniciar a realização desses experimentos com a metodologia aconselhada pelo fabricante e a existente em algumas poucas fontes (HEAD, 1986; norma ASTM D 4186-82, 1982).

Fixado esse ponto de partida, imaginava-se que a própria experimentação deveria definir os aperfeiçoamentos necessários e impor alterações ditadas pelas peculiaridades da argila do Sarapuí. Assim sendo, para se atingir um método definitivo de ensaio, cumpriu-se uma fase inicial, de cujos principais problemas faz-se um breve relato a seguir.

V.3.2.1— A CONTRAPRESSÃO.

Conquanto diversos autores mencionassem o uso de contrapressão para saturar o corpo-de-prova, decidiu-se não empregar esse método nos ensaios na argila do Sarapuí. As razões que justificaram tal prática foram as seguintes:

- a) Era razoável supor que o material extraído nas profundidades de 3,0 a 3,5 m, 4,0 a 4,5 m e 5,0 a 5,5 m estivesse próximo à saturação completa, já que o nível d'água se encontrava praticamente coincidente com o do terreno e o grau de saturação inicial no laboratório era superior a 99%;
- b) A contrapressão, sendo uma variável susceptível de causar problemas num experimento já com algumas incertezas derivadas da inexperiência, podia ser evitada sem introduzir grandes transtornos;
- c) Os ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo destinavam-se a comparações com experimentos edométricos convencionais em cujo procedimento não se incluía contrapressão.

Por ocasião do Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaio de Campo e Laboratório, em 1988, o professor Germaine, do M.I.T., confirmou o acerto da decisão tomada, ao comentar que a contrapressão era um fator capaz de gerar perturbações no ensaio em questão, máxime numa etapa incipiente de trabalho de pesquisa.

V.3.2.2— O ASSENTAMENTO DO PISTÃO SOBRE A PLACA DE TOPO.

O pistão segmentado que integra o aparelho para ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ tem a sua parte terminal esquematizada na figura (V.3), juntamente com a placa de topo.

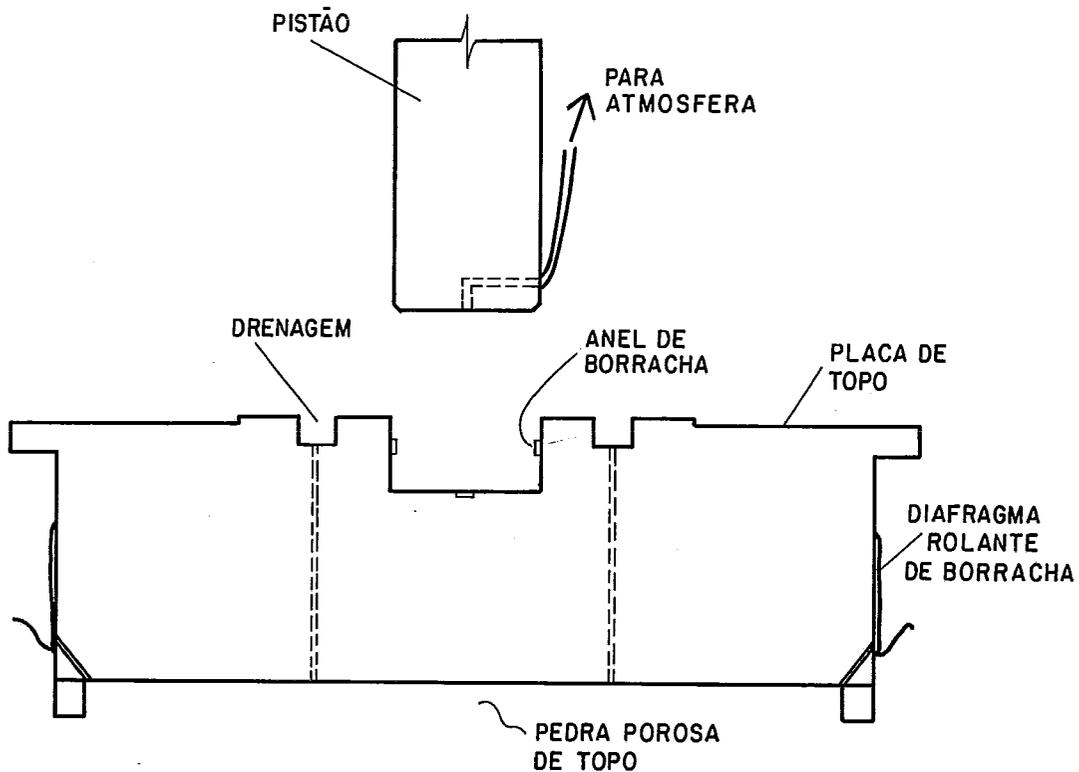


FIG. V.3 - Desenho esquemático do assentamento do pistão original sobre a placa de topo.

Durante alguns experimentos iniciais, notaram-se dificuldades na etapa de ajuste fino do posicionamento do pistão. Para que o último segmento penetrasse na reentrância assinalada na figura (V.3), era preciso passar por um anel de borracha com minúscula parte externa saliente. Diante disso, havia dois caminhos a seguir:

- 1) Acionar a prensa e aguardar o instante em que o pistão encostava no fundo da cavidade existente na placa de topo;
- 2) Antes do acionamento da prensa, ajustar manualmente o movimento de descenso do pistão, o qual devia ser interrompido quando as leituras do transdutor de força acusassem um salto.

Ambas as alternativas mostraram-se inadequadas: a primeira, dadas as baixas velocidades em uso, implicava um tempo excessivo de espera da ocorrência do

encaixe em questão e uma dúvida muito grande quanto ao exato momento do início do ensaio; a segunda, por causa da passagem forçada pelo anel de borracha, acarretava fatalmente um adensamento do solo sem condições de ser medido, com conseqüente perda de controle da altura inicial do corpo-de-prova.

Nesse ponto o leitor mais atento poderá redargüir a este autor que o simples fechamento das torneiras de drenagem, até que o pistão entrasse em contacto com o fundo da reentrância da placa de topo, solucionaria o problema suscitado. No entanto, tal providência, se aplicada, revelar-se-ia infrutífera devido à existência dos canálculos de comunicação da estrutura móvel da célula de adensamento com o interior da cavidade revestida pelo diafragma rolante de borracha.

Assim sendo, uma vez bloqueada a drenagem nas torneiras, iniciar-se-ia a migração de água do corpo-de-prova para aquela parte interna, com imediato intumescimento do componente de borracha e perda de sua eficácia. Além disso, estaria ocorrendo uma deformação sem condições de ser medida corretamente.

Em vista da situação criada, alterou-se o projeto original do equipamento, substituindo-se a parte final do pistão pelo elemento em forma de sapata apresentado na figura (V.4). Assim, foi possível eliminar os problemas de assentamento do pistão na placa de topo, porquanto o novo dispositivo permitia que as superfícies de contacto se ajustassem perfeitamente.

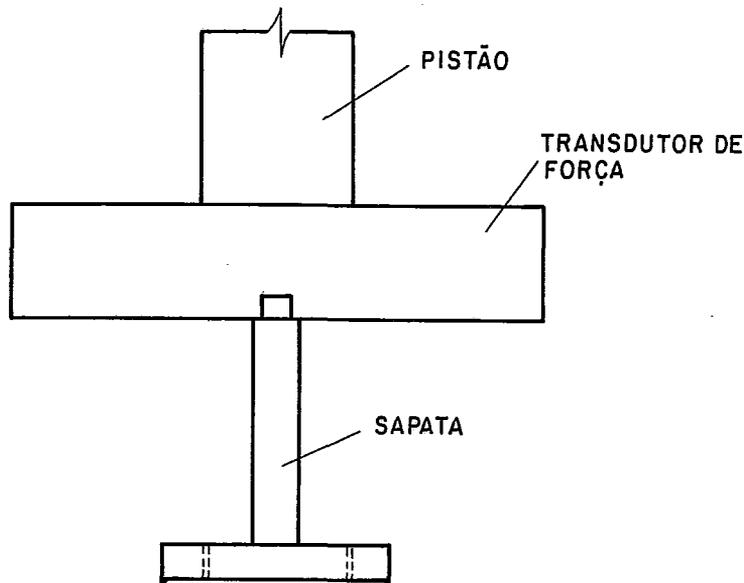


FIG. V.4 - Desenho esquemático da alteração feita na parte terminal do pistão do equipamento WF 24650.

V.3.2.3 A PERDA DE CONTACTO DO PISTÃO COM A VIGA SUPERIOR DA PRENSA.

Durante alguns ensaios verificou-se que, após estar a prensa em funcionamento, a bilha localizada num suporte na extremidade do pistão desvinculava-se da viga superior. Ora, tendo em vista que, antes de ligar o motor, fora feito um ajuste manual de forma a proporcionar contacto efetivo entre aqueles componentes, não se podia admitir que a falha fosse devida a um posicionamento incorreto da célula. Por outro lado, como o pistão já possuía a sapata descrita no item anterior, o desajuste verificado não mais decorria do movimento de penetração na reentrância da placa de topo.

Precisava-se, então, entender o que estava acontecendo, pois trazia graves prejuízos à experimentação a necessidade do seu recomeço toda vez que se desfazia o contacto pistão-viga. Assim sendo, partiu-se para analisar essa

fase inicial do ensaio e elaborar um raciocínio que tentasse explicar e resolver a questão.

Como no começo do ensaio a argila se encontrava sobreadensada, os valores de c_v eram suficientemente altos para que os recalques ao longo do tempo, sob o peso próprio do pistão, fossem maiores que os provocados pela velocidade imposta pela prensa. Em outras palavras, a taxa de deformação específica relacionada ao tempo impingida pelo elemento mecânico era inferior àquela intrinsecamente característica do solo já sob o peso do pistão. Dessa forma, era inevitável que houvesse o desligamento na estrutura de reação, por não poder a velocidade da prensa acompanhar a da argila nas condições aqui mencionadas.

Para solucionar esse problema, decidiu-se que o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ deveria obrigatoriamente ser precedido por uma etapa incremental única, onde o acréscimo de tensão total seria dado pelo peso do pistão. Só depois que se dissipasse a sobrepressão hidrostática assim gerada é que se ligaria a prensa, dando-se seqüência ao experimento.

Cabe, ainda, registrar que nas amostras ensaiadas esse incremento de carga perdurava duas a três horas.

V.3.2.4— A SATURAÇÃO DA PEDRA POROSA DA BASE.

Para saturar a pedra porosa da base o fabricante recomendou retirar a célula de adensamento, preencher a câmara superior com água e aplicar 700 kPa internamente e 100 kPa através da torneira na extremidade inferior. O gradiente hidráulico assim formado possibilitaria a passagem do ar nos vazios.

Esta técnica revelou-se inconveniente porque, ao ser executada, provocava um fluxo muito grande de água em direção ao pote do sistema correspondente ao menor valor da pressão. Tal fato indicava que a pedra porosa do aparelho, ao contrário da especificação do fabricante, não era de alta pressão de borbulhamento. A veracidade desta observação pôde ser comprovada pelos testes de permeabilidade realizados na pedra porosa, através dos quais se estimou o valor de k como sendo da ordem de 10^{-4} m/s.

Para solucionar essa questão podiam ser seguidas duas vias:

- 1) Aplicar uma pequena pressão de baixo para cima na pedra porosa;
- 2) Virar completamente o equipamento de modo que houvesse percolação da água através da torneira localizada na base.

A primeira alternativa foi descartada porque havia o risco de descolar a pedra

porosa e danificá-la; adotou-se, então, a segunda por ser a que não acarretava o transtorno da primeira e ainda permitia que a leitura inicial do transdutor de pressão fosse tomada em referência à pressão atmosférica.

V.3.2.5— A SATURAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO DA BASE.

O transdutor de pressão está rosqueado diretamente na base do equipamento, não existindo, portanto, bloco de acrílico com suspiro para se ler a pressão atmosférica de referência. Com o aparelho na posição invertida, poder-se-ia obter essa leitura se não fosse observado que no processo de colagem da pedra porosa na fábrica houvera entupimento do canalículo inclinado responsável por ligá-la ao suspiro existente na base.

Na tentativa de eliminar essa obstrução, muniu-se de uma haste pontiaguda e fina e, cuidadosamente, através de um movimento de vaivém, conseguiu-se extirpar os resquícios de cola.

V.3.2.6— O DIAFRAGMA ROLANTE DE BORRACHA DO PISTÃO.

Esse componente fica preso entre dois segmentos rosqueáveis, assegura a estanqueidade da câmara na parte superior e a ele está associado o curso do pistão. Em condições apropriadas, o desempenho dessas funções se dá satisfatoriamente.

No entanto, na fase preparatória de realização de um ensaio, notou-se um intenso vazamento após aplicar determinada pressão à câmara. Estava localizado nas paredes por onde se desloca o pistão. Resolveu-se, então, desmontar este último e, para surpresa deste autor, um dos seus segmentos fora colocado em posição invertida na fábrica. Na situação configurada, o diafragma rolante de borracha trabalhava friccionado contra dois chanfros existentes para fins de aperto final e, em razão disso, encontrava-se irremediavelmente dilacerado.

Como esse tipo de diafragma não é ainda fabricado no Brasil, houve necessidade de importá-lo, com todos os embaraços normalmente ligados a essa operação.

V.3.2.7— O ANEL DE ADENSAMENTO.

Originalmente, o modelo de anel tinha espessura de parede constante e sua cravação deveria ser feita solidarizando-o a uma peça com bisel numa das

extremidades. Na experiência prática com esse conjunto, verificaram-se dois problemas sérios:

- a) Após a cravação deviam ser separadas as duas partes, o que trazia graves transtornos, especialmente num material mole como a argila do Sarapuí, além de aumentar o risco de amolgamento;
- b) Havia gasto excessivo de amostra, uma vez que todo o solo confinado na peça solidária ao anel devia ser extraído.

Para solucionar essa questão, resolveu-se que um dos extremos do anel de adensamento deveria ser biselado e abandonou-se a peça inicialmente utilizada para auxiliar o processo de moldagem de corpo-de-prova.

V.3.2.8 O ASSENTAMENTO DA PEDRA POROSA DE TOPO NO CORPO-DE-PROVA.

Na montagem do anel na célula de adensamento era necessário ter certeza de que as superfícies da parte móvel e da parte saliente da parede interna estavam niveladas perfeitamente (ver fotos V.8 e V.9). Para bem executar essa operação, foi fabricada uma peça metálica que mantinha a placa de topo numa altura fixa. Interpondo-se borrachas entre as duas bordas existentes, era possível ajustar a melhor posição que assegurava o contacto entre a pedra porosa superior e o corpo-de-prova.



FOTO V.8—ASPECTO GERAL DA MONTAGEM DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

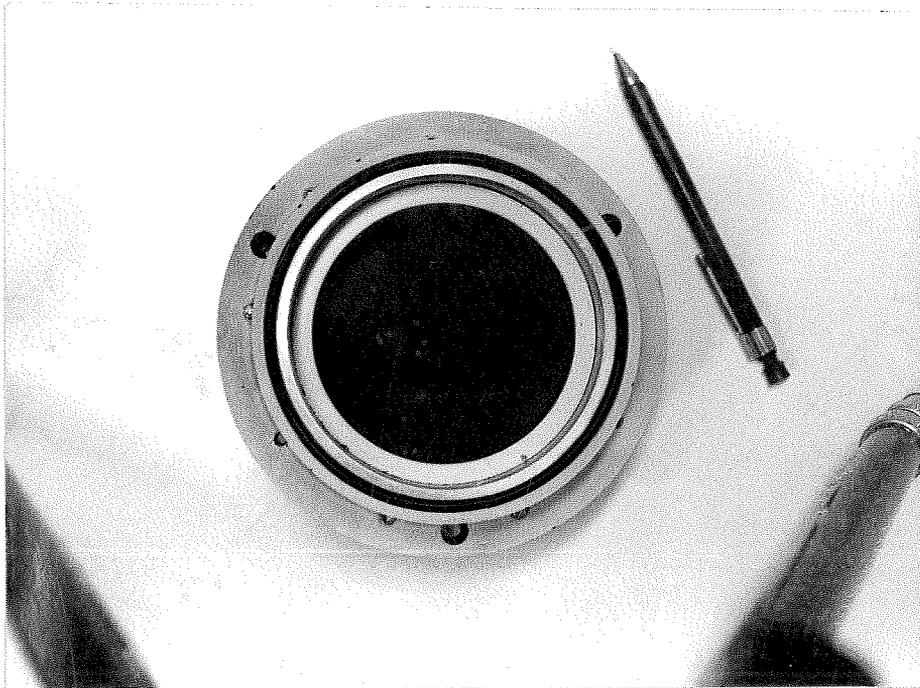


FOTO V.9—VISTA DA PARTE INTERNA DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

V.3.2.9— A SATURAÇÃO DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

Para o bom desempenho do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo é indispensável que se faça uma cuidadosa saturação dessa peça. Como o procedimento para executar tal tarefa estava vagamente descrito no manual do fabricante, foi preciso organizar suas etapas e delimitar o espaço dos erros e acertos nas inovações introduzidas. Assim sendo, deliberou-se fazer a saturação completa da célula de adensamento em um recipiente contendo água sem ar dissolvido. Pacientemente, aspirava-se o líquido, tomando-se o cuidado de não aspergir a superfície sobrenadante com o conteúdo extraído de cada um dos oito canalículos.

V.4— PROCEDIMENTO DEFINITIVO.

Com a experiência acumulada ao longo dos ensaios preliminares, promoveram-se modificações no equipamento original, alteraram-se normas de experimentação e, finalmente, atingiu-se um método mais aperfeiçoado. As

etapas que o compõem serão minudentemente relacionadas, visando ao objetivo maior de colocar à disposição do usuário um manual que lhe assegure executar o ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo sem os transtornos por que passou este autor. Por isso mesmo, impõe-se uma descrição copiosa e pormenorizada das diversas fases do experimento, devendo-se ressaltar que a aplicabilidade dos preceitos aqui aconselhados cinge-se à esfera dos ensaios na argila do Sarapuí.

NIVELAMENTO DAS SUPERFÍCIES INTERNAS DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

- 1)Retirar os dois parafusos delimitadores do curso da placa de topo;
- 2)Colocar os dois pedaços de borracha entre a superfície saliente da estrutura móvel e a borda lateral da célula de adensamento;
- 3)Fixar o conjunto com uma placa metálica e os parafusos mencionados no item (1);
- 4)Com os dedos das duas mãos deve-se pressionar a placa de topo contra as borrachas com o objetivo de fazer um ajuste grosso;
- 5)Com uma chave de fenda deve-se fazer tantas operações de aperto e afrouxamento dos parafusos quantas necessárias para que a superfície interna da estrutura móvel(onde fica a pedra porosa de topo) se nivele à parte saliente da parede interna;
- 6)Por impressão táctil-visual é possível determinar quando foi atingido o nivelamento apropriado para não se ter problemas de assentamento da pedra porosa de topo no corpo-de-prova;

SATURAÇÃO DA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

- 7)Concluída a fase descrita nos itens (1) a (6), segura-se a célula de adensamento, mantendo-se a placa de topo virada para baixo, e faz-se sua imersão num recipiente contendo água sem ar dissolvido;
- 8)De posse de uma seringa hipodérmica, inicia-se o processo de saturação da célula de adensamento;
- 9)Nos oito canálculos e dois orifícios centrais deve-se fazer penetrar a ponta da agulha o suficiente para sugar a água sem que o diafragma rolante de borracha seja perfurado;
- 10)Reintroduzir o líquido no conteúdo do recipiente sem deixar ocorrer aspensão;

- 11) É importante repetir, pacientemente, o descrito no item (9) tantas vezes quantas necessárias para se verificar que as bolhas de ar não mais existem, mormente no caso de não se usar contrapressão;

SATURAÇÃO DA PEDRA POROSA DA BASE.

- 12) Na haste rosqueada na parte superior da câmara devem ser colocados dois suportes para imobilizar o pistão e impedir que movimentos bruscos de ascenso ou descensão inutilizem o pequeno diafragma rolante de borracha;
- 13) Para saturar a pedra porosa da base, o equipamento de ensaio deve ser colocado em posição invertida;
- 14) Preencher a câmara superior com água e fazer a percolação de líquido através da pedra porosa da base, abrindo-se a torneira existente;
- 15) Verificada a ausência de bolhas na pedra porosa, fecha-se a torneira;
- 16) Abrir o suspiro do transdutor de pressão e deixar que haja percolação de água pelo canal inclinado que se comunica com a base da pedra porosa e com a cavidade onde é rosqueado aquele instrumento;
- 17) Fechar lentamente o suspiro com uma chave de fenda, tomando o cuidado de antes abrir a torneira para que não se danifique o transdutor de pressão;
- 18) Com a torneira aberta, tomar a leitura inicial que corresponde à pressão atmosférica (estando o equipamento invertido não há interferência da coluna d'água);
- 19) Em seguida, desvira-se o equipamento e retira-se a água da câmara, tendo-se o cuidado de manter uma pequena película de líquido sobre a pedra porosa da base;

MONTAGEM DO CORPO-DE-PROVA NA CÉLULA DE ADENSAMENTO.

- 20) Fazer nova leitura da sobrepressão hidrostática;
- 21) Colocar papel-filtro Whatman nº54 sobre a pedra porosa da base;
- 22) Assentar a pedra porosa de topo, já previamente fervida em água destilada e submetida a resfriamento;
- 23) Proceder à moldagem do corpo-de-prova de acordo com os itens (II.5.b.1) a (II.5.b.3);

- 24) Com o auxílio de um suporte especial, pressiona-se o anel de adensamento—já contendo o corpo-de-prova moldado—para o interior da célula, de forma que a parte biselada fique voltada para a pedra porosa de topo;
- 25) Toda a operação do item (24) é realizada com a célula de adensamento imersa, devendo-se interpor um papel-filtro entre o empurrador e o corpo-de-prova para evitar perda de material;
- 26) Colocar o anel de borracha na reentrância entre o anel de adensamento e a parede interna;

MONTAGEM DA CÉLULA DE ADENSAMENTO NA CÂMARA DE ENSAIO.

- 27) Desvirar a célula de adensamento;
- 28) Dar um jato d'água em direção à base simultaneamente à montagem da célula de adensamento na base;
- 29) Fazer leitura da sobrepressão hidrostática;
- 30) Retirar as borrachas e a placa metálica;
- 31) Fixar a célula de adensamento com os três parafusos dispostos segundo um triângulo equilátero;
- 32) Fazer leitura da sobrepressão hidrostática;
- 33) Ligar os tubos de drenagem na base e permitir a percolação de água;
- 34) Em seguida, deve-se rosquear a extremidade de um tubo no orifício próprio da placa de topo;
- 35) Fazendo-se circular a água pelo tubo do item (34), ela atingirá o outro orifício no topo;
- 36) A tarefa descrita no item (35) constitui-se numa boa ocasião para se verificar se a célula de adensamento foi bem saturada, observando-se a presença ou não de bolhas no orifício;
- 37) Liga-se o segundo tubo de drenagem à placa de topo;

PREPARATIVOS FINAIS.

- 38) Fazer leitura da sobrepressão hidrostática;
- 39) Fixar a câmara superior com as hastes rosqueáveis;
- 40) Levar o equipamento para a prensa mecânica;
- 41) Preencher a câmara com água, deixando o suspiro do topo aberto;

- 42)Fazer leitura da sobrepressão hidrostática quando o volume da câmara estiver totalmente ocupado com água;
- 43)Mantendo todas as torneiras da base fechadas, deve-se assentar o pistão sobre a placa de topo;
- 44)Fazer leitura da sobrepressão hidrostática;
- 45)Posicionar o transdutor de deslocamento e o extensômetro mecânico;
- 46)Verificar as ligações e válvulas do transdutor de volume;
- 47)Acionar o microcomputador do padrão PC e operar o programa de aquisição de dados "CRSC";
- 48)Introduzir a hora no padrão HH:MM:SS, a data de início do experimento e o nome do arquivo de saída;
- 49)Verificar se todas constantes dos transdutores estão corretamente inseridas no programa;
- 50)Observar se está acionada a seta indicadora de posição remoto no painel frontal do conversor analógico-digital HP3457A;
- 51)Confirmar se a fonte de alimentação está ligada de forma correta ao módulo da bancada em operação;
- 52)Verificar se os ajustes de d.d.p., corrente e número de fios estão nas posições certas;
- 53)Ligar a impressora Mônica plus, colocá-la em condições de operação e acionar o multiplexador para a posição correspondente ao microcomputador do padrão PC;
- 54)Fazer várias leituras iniciais dos quatro transdutores para detectar eventuais falhas no sistema;
- 55)A interrupção das leituras iniciais dos transdutores pelo operador implica que, decorridos treze segundos, soará um sinal intermitente e terá início o processo de aquisição de dados;
- 56)O operador deverá estar a postos no período assinalado no item (55) para abrir as linhas de drenagem concomitantemente ao começo da emissão do som;
- 57)Uma vez iniciado o ensaio, deve-se acompanhar as leituras registradas no vídeo do microcomputador e fazer comparações dos deslocamentos acusados pelo transdutor com os do extensômetro mecânico;

INÍCIO DO ENSAIO DE ADENSAMENTO
COM $\dot{\epsilon}_v =$ CONSTANTE PROPRIAMENTE DITO.

- 58)Tendo dissipado a sobrepressão hidrostática, correspondente à tensão total imposta pelo peso próprio do pistão, dá-se início ao ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo propriamente dito;
- 59)Fechar as torneiras das linhas de drenagem;
- 60)Com a manivela de ajuste grosso levantar o equipamento e com o ajuste fino fazer o contacto da bilha com a viga da prensa;
- 61)Operar manualmente o HP3457A, através do painel frontal, fazendo as leituras dos quatro transdutores;
- 62)Verificar se as engrenagens correspondem à velocidade nominal que se deseja imprimir ao ensaio;
- 63)Repetir todas as etapas referidas nos itens (45) a (57);
- 64)Fazer as últimas verificações(linhas de drenagem, conexões, válvulas do transdutor de volume, fonte, conversor A/D e impressora);
- 65)Simultaneamente à audição do sinal indicativo de começo do experimento, deve-se ligar a prensa e abrir as torneiras de drenagem;
- 66)Durante o desenrolar do ensaio, comparar o deslocamento registrado pelo transdutor elétrico com o do extensômetro mecânico;
- 67)Verificar se o diafragma rolante de borracha mantém sua parede externa em posição vertical e, em caso negativo, pode-se ter certeza de que sua saturação está incompleta;
- 68)Fazer a inversão de fluxo do transdutor de volume, se houver risco de ultrapassar a leitura de fundo de escala;

FIM DO ENSAIO DE ADENSAMENTO
COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$.

- 69)Terminado o ensaio, fechar todas as torneiras, desligar a prensa, o microcomputador, a impressora, a fonte de alimentação e o HP3457A;
- 70)Retirar a água da câmara de ensaio, deixando uma película de líquido sobre a pedra porosa da base;
- 71)Desmontar a célula de adensamento e fazer a limpeza de todas as peças.

V.5.- PROGRAMA DE ENSAIOS CONVENCIONAIS DE
ADENSAMENTO EDOMÉTRICO PARA FINS
COMPARATIVOS.

Foram ensaiadas cinco amostras na argila do Sarapuí, sendo três na

profundidade de 3,0 a 3,5 m e duas na profundidade de 4,0 a 4,5 m. No primeiro caso os anéis de aço inoxidável utilizados foram os de número 152, 153 e 154, com dimensões $H = 20$ mm e $D = 87,7$ mm. No segundo caso, fez-se uso das células marrom e cinza, com anéis de aço inoxidável de dimensões $D = 100,6$ mm, $H = 30,3$ mm e $D = 50,9$ mm, $H = 19,4$ mm, respectivamente.

Os incrementos de tensão total tiveram a seguinte seqüência:

- a) célula n° 152—6,25 kPa; 12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 125 kPa; 200 kPa e 600 kPa;
- b) célula n° 153—6,25 kPa; 12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 125 kPa; 200 kPa;
- c) célula n° 154—6,25 kPa; 12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 125 kPa; 200 kPa; 600 kPa; 1200 kPa;
- d) célula marrom—12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa e 800 kPa;
- e) célula cinza—12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa e 800 kPa.

No que concerne à extração do material no campo, à extrusão de amostras em laboratório e à moldagem de corpos-de-prova, seguiram-se as recomendações preconizadas nos itens (II.5.4.2) e (II.5.4.3.b).

V.6— COMENTÁRIOS FINAIS.

Releva registrar que, ao se atribuir a qualificação de "definitivo" ao procedimento exposto no item (V.4), não se teve a veleidade de pensar que as recomendações ali feitas esgotaram o tema da técnica do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. No entanto, é preciso dizer que elas representam o resultado de um esforço de superação de todos os problemas detectados durante a realização daquele tipo de experimento. Evidentemente, que no desenrolar de futuras experimentações, se outros desafios forem encontrados, novas melhorias tornar-se-ão um imperativo na busca de uma metodologia ideal.

CAPÍTULO VI.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS
ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE
DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.

VI.1- INTRODUÇÃO.

Apresentam-se, a seguir, os resultados de um programa experimental que incluiu nove ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, dos quais três não chegaram a bom termo devido aos problemas relatados no item (V.3). Além disso, para fins comparativos, mostram-se os dados oriundos dos ensaios incrementais referidos no item (V.5).

Para ilustrar o histórico dos experimentos a que se procedeu na argila do Sarapu, compendiarão-se na tabela (VI.1) seus aspectos mais importantes e as causas primaciais da falta de êxito observada em três casos. Deve-se aqui ressaltar que o ensaio n.º 3 teve os problemas relacionados com o pistão original, mas, por razões desconhecidas, apresentou resultados razoáveis. Os ensaios n.º 1, 2 e 4 foram integralmente perdidos. Além disso, é importante salientar que a partir do ensaio n.º 5, quando já se tinha um procedimento definitivo, todos os experimentos deram bons resultados.

ENSAIO N°	observações
1	imperfeições na saturação da célula de adensamento
2	problema no assentamento do pistão
3	ensaio razoável
4	defeito no diafragma rolante de borracha do pistão
5	ensaio bom
6	ensaio bom
7	ensaio bom
8	ensaio bom
9	ensaio bom

TABELA VI.1- RELAÇÃO DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$ REALIZADOS NA ARGILA DO SARAPUÍ.

VI.2- A VELOCIDADE DOS EXPERIMENTOS.

Na tabela (VI.2) exibem-se as magnitudes das velocidades dos ensaios executados, separando-as segundo duas denominações que assim devem ser entendidas:

- a) Valor nominal—trata-se da grandeza indicada pelo fabricante para uma determinada seleção de engrenagens e marchas (no caso da prensa mecânica existente no laboratório da COPPE-UFRJ, de fabricação da Wykeham Farrance Engineering LTD., há quarenta e duas combinações de velocidade disponíveis, variando de $1,33 \times 10^{-9}$ m/s a $6,67 \times 10^{-5}$ m/s);
- b) Valor médio de ensaio—refere-se à velocidade média medida durante o experimento, tomando por base leituras de tempo e do transdutor de deslocamento registradas pelo sistema automático de aquisição de dados (ver figuras VI.1 e VI.2).

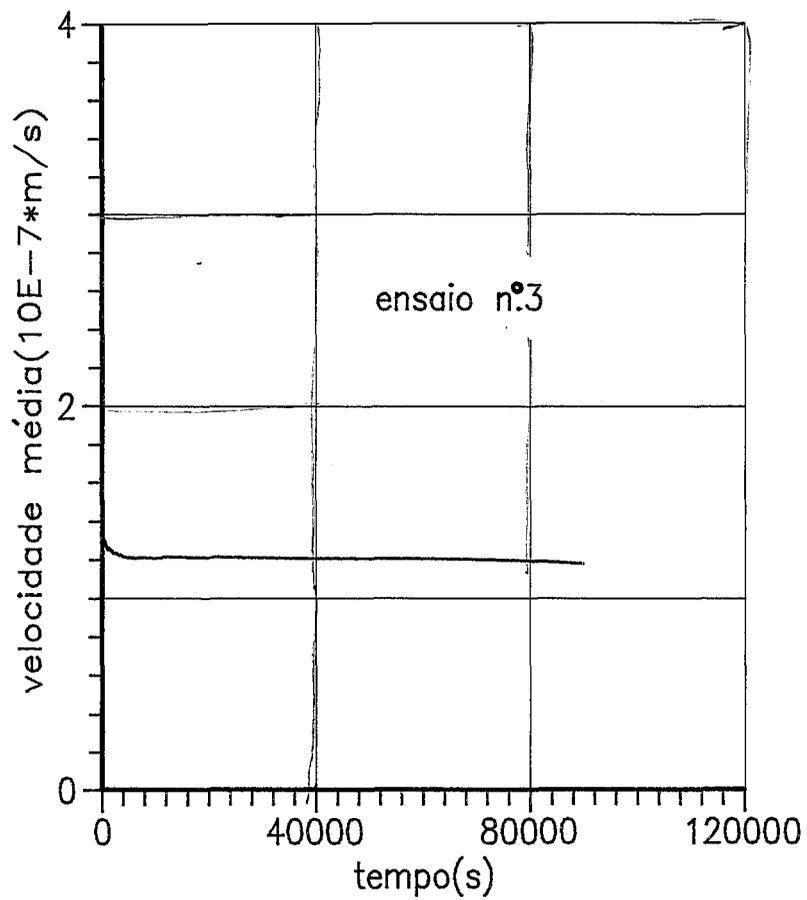
Também na tabela (VI.2) são apresentados os valores médios da taxa

de deformação específica relacionada ao tempo, os quais foram calculados dividindo-se a velocidade média de ensaio pela altura inicial do corpo-de-prova.

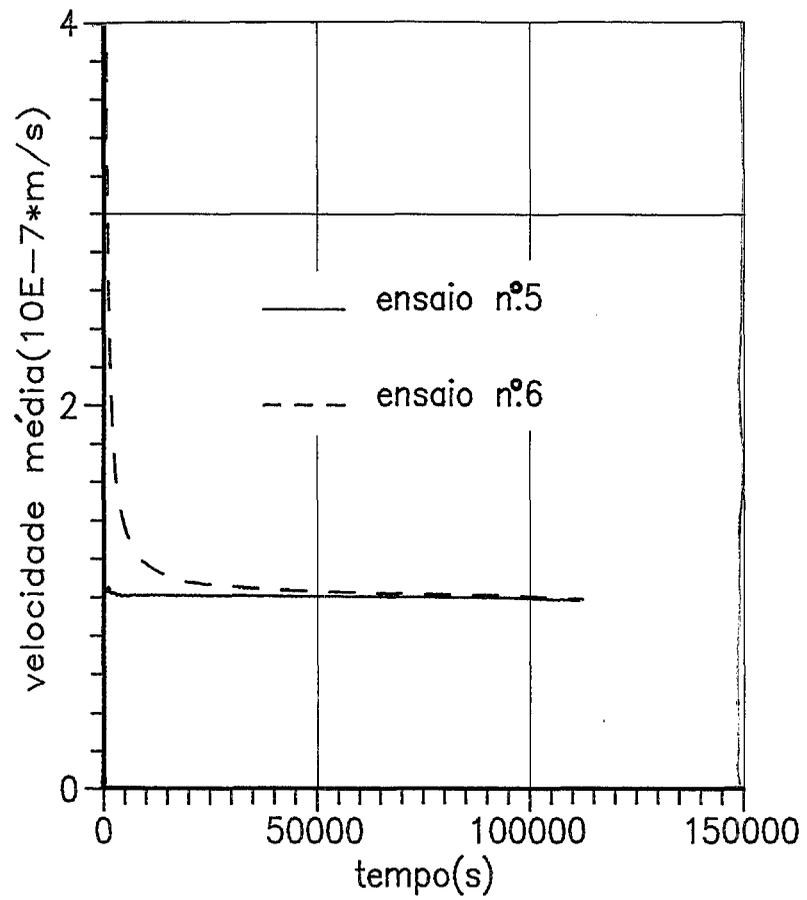
ENSAIO Nº	VEL.NOM. (m/s)	VEL.MÉD. (m/s)	$\dot{\epsilon}_v = \frac{1}{H} \frac{d\delta}{dt}$ (s ⁻¹)
5	$8,67 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-6}$
6	$8,67 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-6}$
7	$8,67 \times 10^{-8}$	$1,0 \times 10^{-7}$	$5,3 \times 10^{-6}$
8	$3,33 \times 10^{-8}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$2,0 \times 10^{-6}$
9	$1,67 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-5}$

TABELA VI.2-COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES NOMINAIS COM AS REALMENTE OBSERVADAS NOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$.

Nas figuras (VI.1) e (VI.2) verifica-se que a velocidade ($d\delta/dt$) manteve-se razoavelmente constante em todos os ensaios, fixando-se num patamar 10% a 15% superior ao do valor nominal indicado pelo fabricante.



(a)



(b)

FIG. VI.1 - Velocidades médias (em 10^{-7} x m/s) dos ensaios n°3 (Prof. 4,0m a 4,5m), n° 5 e 6 (Prof. 3,0m a 3,5m).

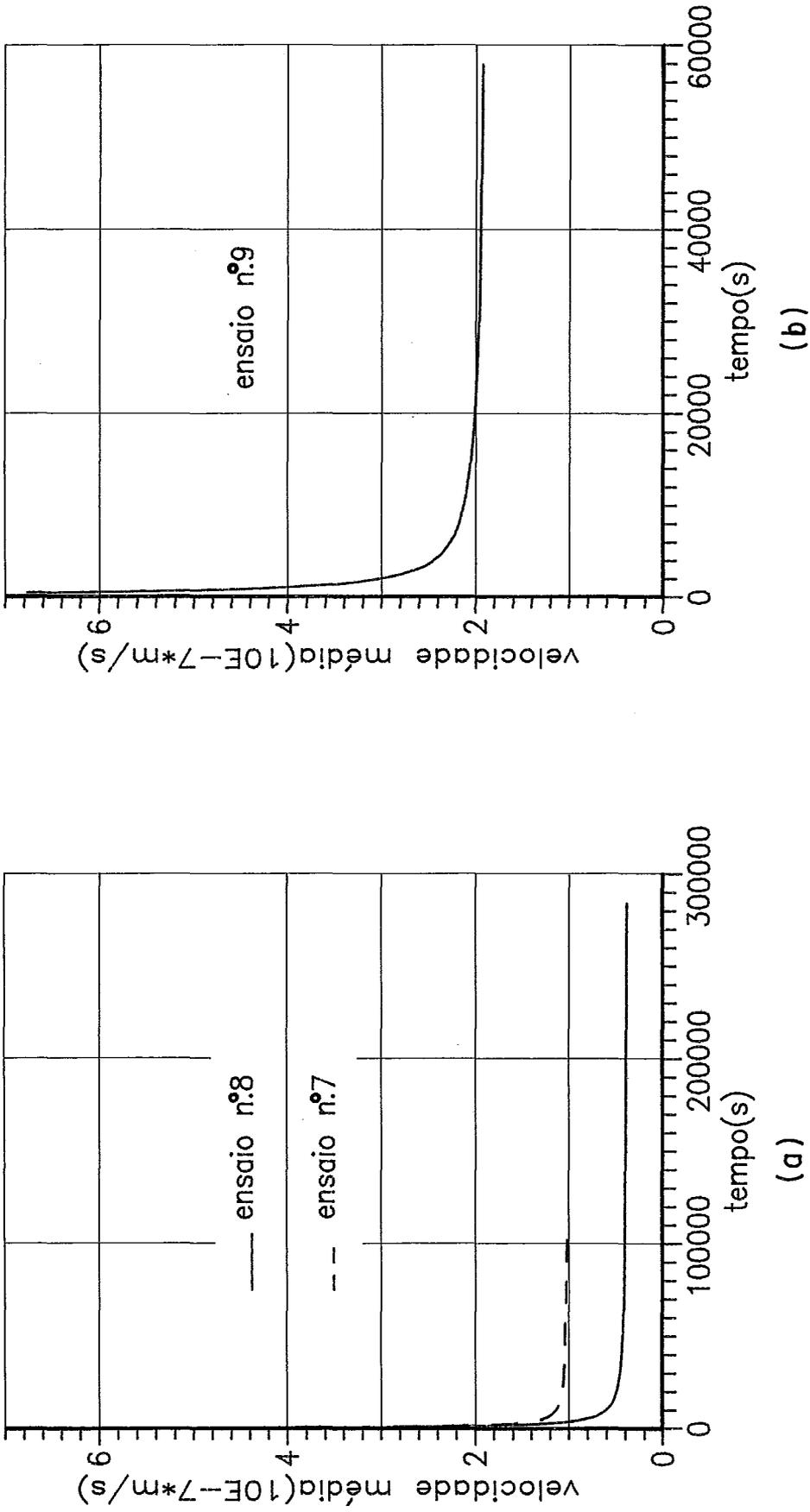


FIG. VI.2 - Velocidades médias (em 10^{-7} m/s) dos ensaios nº 7, 8 e 9
(Prof. 5,0m a 5,5m).

VI.2.1— COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES DE ENSAIO OBTIDAS PELOS MÉTODOS MENCIONADOS NO ITEM (IV.5).

O critério utilizado neste trabalho.

Tomando por base as considerações feitas no item (IV.5.8.2), verificou-se que, igualando os gradientes hidráulicos nas faces drenantes dos ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ e convencional, podia-se prever a sobrepressão hidrostática na base (u_b) de um corpo-de-prova submetido ao primeiro tipo de experimento por:

$$\frac{u_b}{4} = \frac{rH^2\gamma_a}{8k} = u_o \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{(2n+1)^2\pi^2T_v}{4}} \quad (\text{VI.1}).$$

sendo u_o o incremento de tensão utilizado no ensaio convencional.

A expressão (VI.1) vale para ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ e convencionais em corpos-de-prova de mesma altura. Além disso, observou-se que, para valores relativamente altos de T_v , o somatório da equação (VI.1) poderia ser substituído pelo seu primeiro termo, cometendo-se um erro desprezível nessa operação. No caso de corpos-de-prova de alturas diferentes em um e outro ensaio, a expressão (VI.1), após essas considerações, fica assim:

$$u_b = \frac{r H_{de}^2 \gamma_a}{2 k} = 4 u_o \frac{H_{de}}{H_{co}} e^{-\frac{\pi^2 T_v}{4}} \quad (\text{VI.2}).$$

onde: H_{de} e H_{co} são as alturas dos corpos-de-prova dos ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ e convencional, respectivamente.

Examinando a equação (VI.2), conclui-se que é possível realizar um ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ tendo na base um determinado u_b , bastando fazer o cálculo do valor de T_v que satisfaz à equação (VI.2). Determina-se, então, o grau de adensamento médio associado ao fator-tempo e, em seguida, recorre-se ao gráfico leitura do extensômetro-tempo do ensaio convencional para estabelecer a velocidade correspondente a \bar{U} .

É essa velocidade determinada consoante as regras acima que deve ser imprimida à prensa, quando da execução de um ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, para se obter a u_b pré-determinada.

Na prática, parece ser mais conveniente determinar no gráfico leitura do extensômetro-tempo o grau de adensamento médio que corresponde a uma

velocidade escolhida entre as disponíveis na prensa. Em seguida, obtém-se o valor de T_v associado a \bar{U} e usa-se a expressão (VI.2) para proceder ao cálculo do valor de u_b esperado no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

Quando da estimativa de u_b pelo critério aqui comentado, deve-se levar em conta uma consideração de fundamental importância que pode ser bem depreendida da curva $e-\sigma$ (esc.log.) ilustrada na figura (VI.2.c). Nela foram traçados os índices de vazios referentes ao "final" do adensamento primário e ao término de cada estágio de carregamento, quando já ocorreu algum adensamento secundário.

Ocorre que à linha que une os pontos correspondentes ao "final" do primário está associada uma sobrepressão hidrostática nula (linha 1, 2, 3,...8,9). Assim sendo, ao usar o estágio 4→5 ($\sigma = 50$ kPa a $\sigma = 100$ kPa) na figura (VI.2.c) para fazer estimativa de u_b no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, deve-se tomar um valor de u_o na expressão (VI.2) igual a 40 kPa, o que corresponde ao intervalo de tensões de 4'→5 ($\sigma = 60$ kPa a $\sigma = 100$ kPa). Se, no entanto, for usado o estágio 5→6 ($\sigma = 100$ kPa a $\sigma = 125$ kPa), essa correção não existirá, já que o carregamento foi feito ao final do primário do estágio anterior.

As estimativas de u_b no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, de acordo com o critério acima descrito, são apresentadas nas tabelas (VI.3) e (VI.4), juntamente com os valores realmente medidos.

Analisando as tabelas (VI.3) e (VI.4), observa-se que as previsões feitas para u_b/σ_v são bastante razoáveis. Isto só não ocorre quando os valores da velocidade no ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ são de tal forma baixos que seus equivalentes nos experimentos convencionais estão associados a graus de adensamento médio elevados.

Na argila do Sarapuí verifica-se que, se a uma dada velocidade corresponde um \bar{U} menor que 93%, as estimativas de u_b/σ_v são boas, não se ultrapassando um erro relativo de 30%.

A discrepância aqui assinalada, entre os valores previstos de u_b/σ_v e os medidos, pode ser explicada pelo fato de se ter usado no critério em questão a teoria de Terzaghi e Fröhlich. Esta formulação teórica, quando se têm altos valores de grau de adensamento médio, não fornece boas previsões do fenômeno do adensamento, em virtude de a compressão secundária se manifestar de forma mais marcante em tal caso. No entender deste autor, a justificativa exposta é a mais provável para as diferenças verificadas nas tabelas (VI.3) e (VI.4) entre o estimado e o realmente medido.

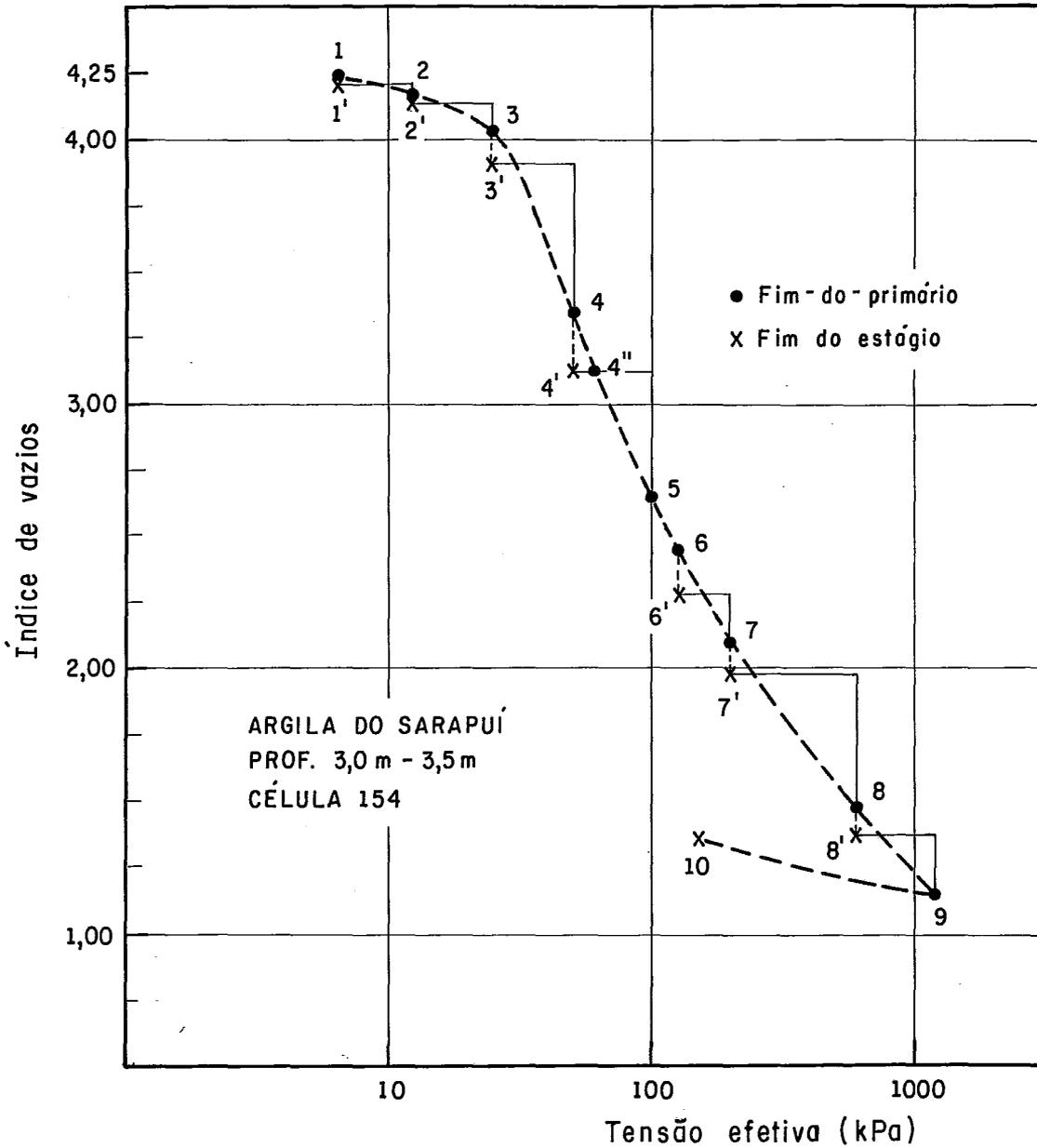


FIG. VI.2.c - Curva $e - \sigma'_v$ (esc. log.) do ensaio convencional na célula nº 154.

tensão total σ_v (kPa)	altura total c.p. ensaio com $\dot{\epsilon}_v=cte$ (mm)	VALORES ESTIMADOS A PARTIR DOS ENSAIOS CONVENCIONAIS									Valores medidos ensaio com $\dot{\epsilon}_v=cte$	
		célula 152			célula 153			célula 154			n.º5	n.º6
		\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)
12,5	18,45	82	2	16	84,6	1,7	13,8	—	—	—	13,2	11,0
25	17,81	>100	0	0	98	0,59	2,4	97	0,8	—	9,7	15,0
50	15,64	95	3,9	7,8	96	3,5	7,0	93	6,7	13,4	14,2	18,7
100	13,26	93,7	11,7	11,7	95,8	7,8	7,8	>100	0	0	18,4	20,3
125	12,58	*	*	*	75	29,4	23,5	79,3	24,6	19,7	18,6	20,6
200	11,20	81	43,3	21,7	80	44,3	22,1	84,3	35,5	17,7	17,9	19,0

* Não foi possível calcular devido às características do carregamento.

TABELA VI.3—VALORES ESTIMADOS E MEDIDOS DE u_b/σ_v .

tensão total σ_v (kPa)	altura total c.p. ensaio com $\dot{\epsilon}_v=cte$ (mm)	VALORES ESTIMADOS A PARTIR DOS ENSAIOS CONVENCIONAIS									Valores medidos. Ensaio com $\dot{\epsilon}_v=cte$
		célula 152			célula 153			célula 154			n.º9
		\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	\bar{U} (%)	u_b (kPa)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)	$\frac{u_b}{\sigma_v}$ (%)
12,5	18,53	66,2	4,4	35	66,2	3,9	31,2	62,1	4,6	37	30,2
25	18,01	84	7,4	29,5	83,1	7,0	27,9	82,9	7,1	28,3	30,8
50	16,59	85	12,9	25,8	83,1	16,2	32,4	82,0	17,3	34,6	29,0
100	13,98	84	31,7	31,7	85	27	27	83,9	31,3	31,3	32,4
125	13,20	*	*	*	57	52	41,6	58,9	50	40	32,7
200	11,70	63,2	81,2	40,6	60,4	85,2	42,6	63,7	76	38	31,6

* Não foi possível calcular devido às características do carregamento.

TABELA VI.4-VALORES ESTIMADOS E MEDIDOS DE u_b/σ_v .

Finalmente, para aplicação do critério ora discutido, recomenda-se usar a construção de Taylor (leitura do extensômetro $X \sqrt{\text{tempo}}$) para uma série de leituras até o "final" do primário. Deve-se, também, fixar o intervalo máximo entre elas como sendo inferior a 5 min.

Método de SMITH e WAHLS(1969).

Como se sabe, a velocidade é dada por:

$$\delta = \frac{c_v C_c}{m^2 H (1 + e_o)} \left[\frac{u_b/\sigma_v}{1 - 0,7(u_b/\sigma_v)} \right] \quad (\text{IV.31})\text{bis}$$

onde: $\delta = \frac{d\delta}{dt}$

Adotando-se $c_v = 1,0 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, $C_c = 2,38$ e $e_o = 4,256$, $m = 0,6$ e $u_b/\sigma_v = 0,19$ (valor encontrado no ensaio nº5), estimar-se-ia $\dot{\epsilon}_v$ como sendo igual a $7,63 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Com base no resultado obtido no ensaio nº5 (ver figura VI.5), pode-se dizer que as previsões deste método para o caso da argila do Sarapuê são razoáveis, com tendência de subestimar o valor máximo da razão u_b/σ_v . Por outro lado, é importante frisar seus inconvenientes mais sérios:

- a) Necessidade de realizar um ou mais ensaios de adensamento convencionais para determinação de c_v e C_c e ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ para estimar m ;
- b) O material a ser ensaiado precisa ser bem conhecido, para que as estimativas dos parâmetros do item (a) estejam próximas da realidade;
- c) O dispêndio de tempo que se pretende evitar com a adoção do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ torna-se um objetivo baldado, em vista das exigências consignadas no item (a).

O critério de WISSA et alii(1971).

Consoante o disposto no item (IV.4.2), esses autores sugeriram que a razão u_b/σ_v deveria circunscrever-se à faixa de 2% a 5%.

Considerando os dados apresentados neste capítulo, patenteia-se que esse método produz estimativas de $\dot{\epsilon}_v$ e u_b/σ_v bastante moderadas. À guisa de exemplo, leve-se em conta que experimentos executados com u_b/σ_v máxima de 30% ainda forneceram parâmetros confiáveis, haja vista a boa concordância destes com os dimanados de ensaios em que aquela razão foi inferior a 10%. É, também, relevante mencionar que a duração de um ensaio

de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, seguindo-se à risca o proposto por WISSA et alii (1971), superaria 100 horas no caso da argila do Sarapuí, caso se quisesse atingir um valor final de ϵ_v em torno de 60%.

Os métodos de GORMAN et alii(1978) e da ASTM D 4186-82(1982).

Como nesses dois trabalhos os critérios para estabelecer a taxa de deformação específica relacionada ao tempo estão intimamente interligados, é conveniente tratá-los em conjunto.

Já foi dito no item (IV.5.8), e aqui repete-se o assunto devido à sua importância, que não se deve estimar a velocidade de ensaio, no caso da argila do Sarapuí, a partir de valores simplesmente correlacionados com o limite de liquidez. Tal recomendação é decorrência das peculiaridades desse material, cujos valores típicos de limite de liquidez e deformação específica vertical superam, respectivamente, 100 %, para uma profundidade até 7,0 m, e 50 %, para um nível de tensão efetiva de 800 kPa.

A aplicação pura e simples da tabela da ASTM D4186-82 (1982) ou do gráfico do qual ela se originou (GORMAN et alii, 1978) redundaria em uma duração de ensaio superior a um ano, o que evidentemente é um contrasenso!

O critério utilizado na Suécia.

O valor limite de $\dot{\epsilon}_v$ para as argilas suecas, sugerido por LARSSON e SÄLLFORS (1986), é de $2,1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, com uma razão u_b/σ_v máxima de 15%.

Compulsando os dados obtidos nos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, verifica-se que o máximo valor admissível de $\dot{\epsilon}_v$ para a argila do Sarapuí deve ser superior ao proposto pelo critério sobredito, uma vez que um ensaio com uma taxa de deformação específica relacionada ao tempo de $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ainda foi capaz de gerar resultados coerentes com os originários de experimentos semelhantes e também com os advindos de ensaios de adensamento convencionais.

O critério do N.G.I.

A faixa de $\dot{\epsilon}_v$ proposta varia de $1,38 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ a $2,78 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e a razão u_b/σ_v deve situar-se entre 5% e 10%, para as argilas norueguesas.

Faz-se necessário observar que dos ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ realizados, somente o mais lento enquadra-se perfeitamente nos intervalos acima fixados. No entanto, é digno de nota que o exame dos resultados conseguidos com $\dot{\epsilon}_v$ entre $2,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e u_b/σ_v variando de 9% a 30% revela serem eles coerentes, considerando-se os seis ensaios entre si e também quando se levam em conta os incrementais. Mesmo o experimento conduzido com os valores extremos ($1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e 30%) ainda gerou dados confiáveis.

O critério de ARMOUR e DRNEVICH(1986).

Sabe-se do item(IV.5.7) que a taxa de deformação específica relacionada ao tempo é dada por:

$$\dot{\epsilon}_v = \frac{-[\exp(8 - 3 IL)] P_a k_i \log[1 - (u_b/\sigma_v)_{\max}]}{\gamma_a H^2} \quad (\text{IV.33})\text{bis}$$

Adotando-se $h = 158\%$ (onde $h = \text{teor de umidade natural}$), $LP = 43\%$, $LL = 157\%$ e $k_i = 10^{-10} \text{ m/s}$, pode-se calcular a taxa de deformação específica relacionada ao tempo para o exemplo dado no início deste item (ensaio nº5) como sendo igual a $7,18 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

O valor obtido por esse método, considerando-se o caso assinalado, é menor que o real ($5,26 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$). Deve-se, ainda, chamar a atenção para o fato de que a permeabilidade e o índice de liquidez desempenham um papel fundamental nessa previsão. Isso implica dizer que esses últimos parâmetros devem ser bem conhecidos para que se possa antecipar de forma precisa a velocidade a ser utilizada no ensaio.

Cabe notar que os experimentos realizados com $\dot{\epsilon}_v$ superior à prevista pelo critério aqui tratado mostraram que, mesmo nessa condição, ainda é possível obter bons resultados.

VI.3- A RAZÃO u_b/σ_v .

Justificadamente atribui-se a essa relação o papel de elemento condicionante da escolha de uma velocidade de ensaio apropriada, uma vez que suas magnitudes estão associadas e delas depende, em essência, a acurácia com que se pode calcular o coeficiente de adensamento e obter curvas tensão-deformação representativas das condições do solo.

Em vista da importância da razão u_b/σ_v , há que se determinar sua faixa ótima de trabalho, levando-se em conta fatores como:

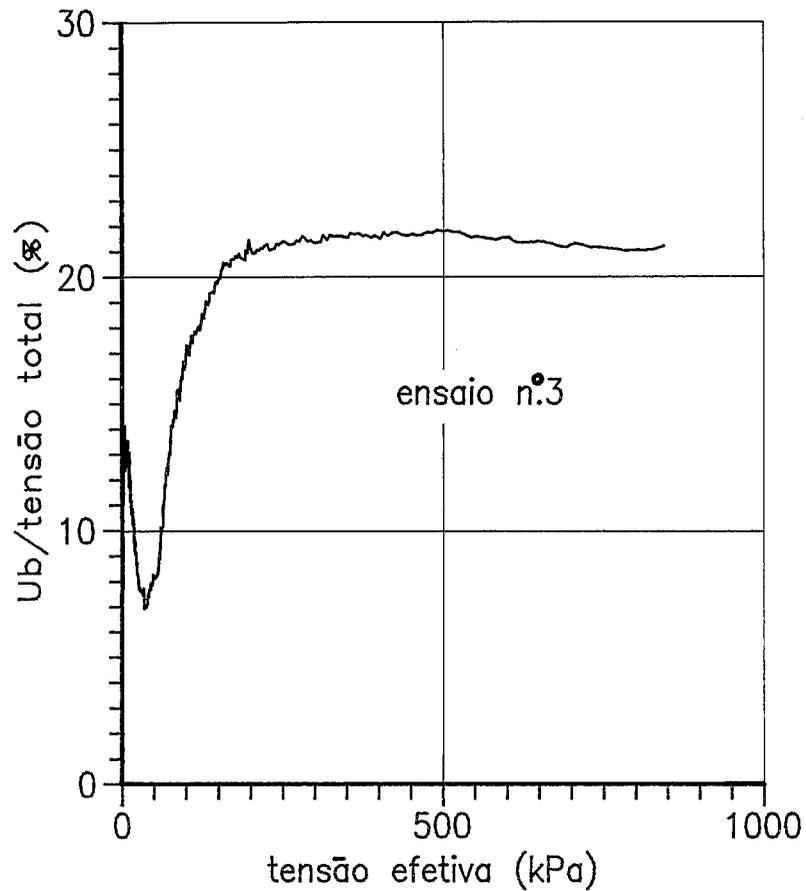
- a) A história de tensões do solo, com ênfase aos aspectos inerentes à deformabilidade esperada para um dado nível de tensão efetiva;
- b) A experiência já acumulada com ensaios de adensamento edométrico convencionais;
- c) A interdependência que deve ocorrer entre o cálculo acurado do coeficiente de adensamento e a necessidade de conseguir curvas tensão-deformação em um intervalo de tempo o menor possível;
- d) O valor máximo deverá subordinar-se à garantia da validade da hipótese de que a sobrepressão hidrostática se distribua parabolicamente ao longo do corpo-de-prova.

Salientou-se no capítulo IV a grande discrepância observada entre os intervalos de valores de u_b/σ_v sugeridos pelos autores que se dedicaram ao estudo do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Em que pese a variedade dos solos ensaiados, não se pode perder de vista a elevada amplitude existente entre a proposta de WISSA et alii (1971) e a de GORMAN et alii (1978): nesta u_b/σ_v varia de 30% a 50%; enquanto que naquela, de 2% a 5%.

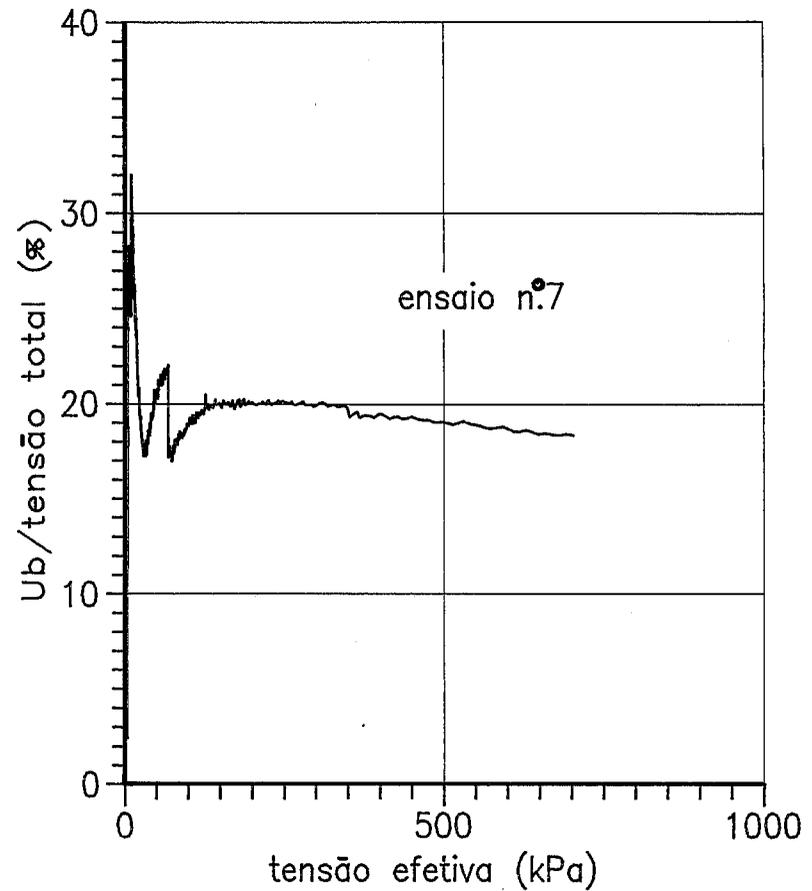
Nas figuras (VI.3.a) e (VI.3.b) retratam-se as curvas $(u_b/\sigma_v) - \sigma_v$ (esc.log.) dos ensaios n.º 3 e n.º 7.

Na figura (VI.4.a) mostra-se a variação de u_b/σ_v com a tensão efetiva para ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo a que se procedeu em corpos-de-prova extraídos do mesmo amostrador tubular de parede fina.

Na figura (VI.4.b) apresentam-se as curvas $(u_b/\sigma_v) - \sigma_v$ referentes aos ensaios n.º 8 e n.º 9. Observa-se que o valor mais elevado dessa razão corresponde ao experimento conduzido com a maior taxa de deformação específica relacionada ao tempo (n.º 9 — $\dot{\epsilon}_v = 1,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), o que é coerente com os resultados transcritos na literatura técnica.

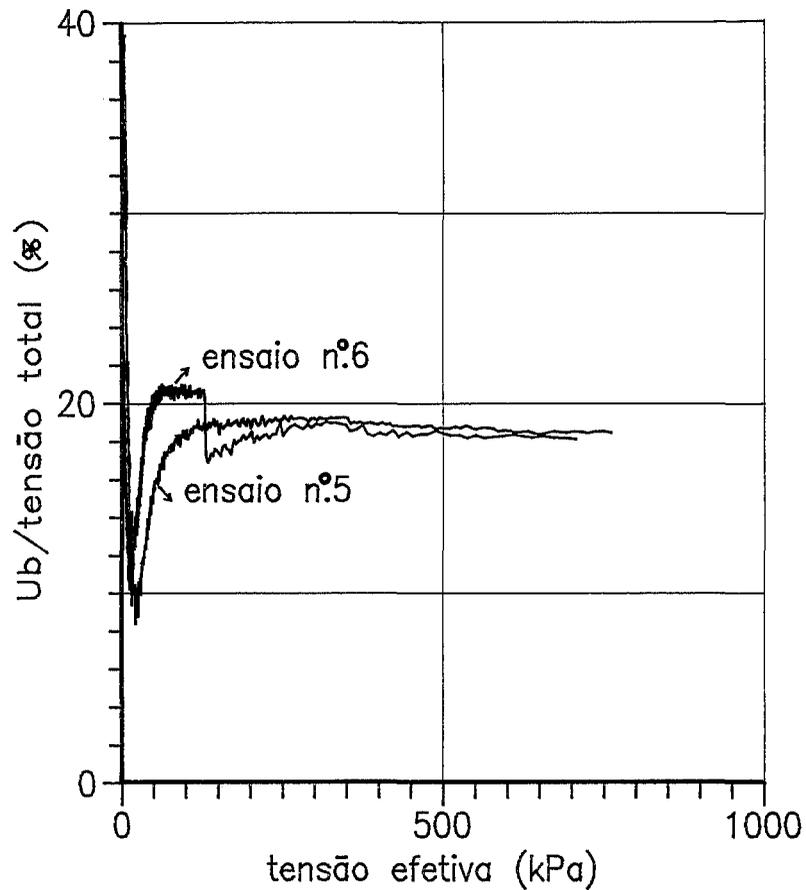


(a)

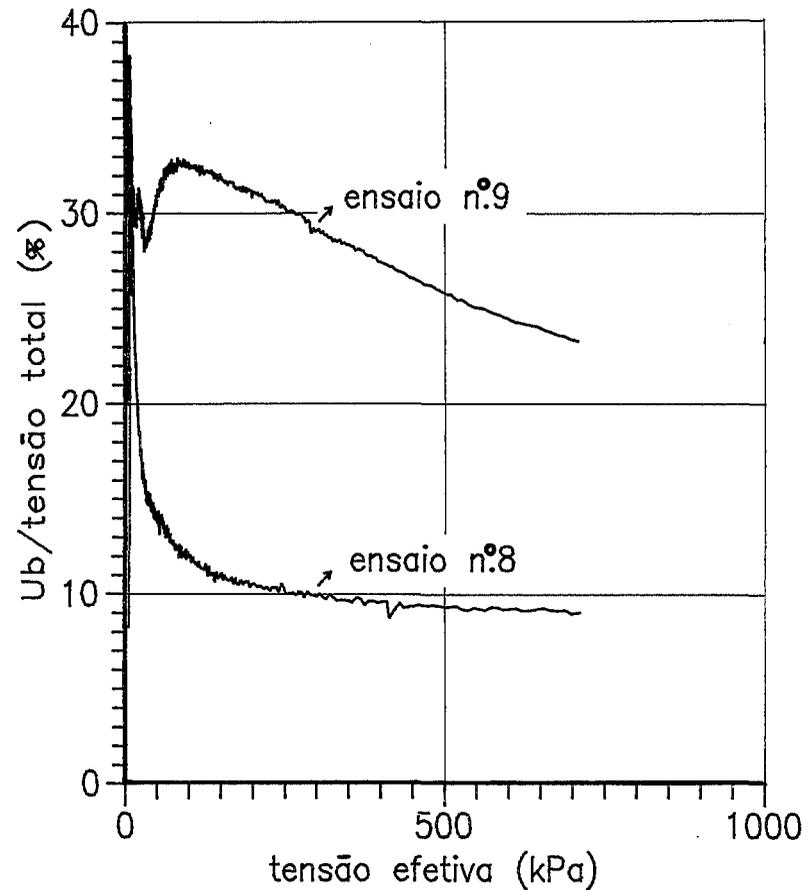


(b)

FIG. VI.3 - Variação de u_b / σ_v com σ_v' dos ensaios n.º 3 (Prof. 4,0m a 4,5m) e n.º 7 (Prof. 5,0m a 5,5m).



(a)



(b)

FIG. VI.4 - Variação de u_b/σ_v com σ_v' dos ensaios n.º 5 e 6 (Prof. 3,0m a 3,5m), n.º 8 e 9 (Prof. 5,0m a 5,5m).

VI.4- A COMPARAÇÃO DA DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA VOLUMÉTRICA COM A AXIAL.

Como o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ é do tipo edométrico, justificava-se acrescentar às leituras de deslocamento as de volume, com o intuito de verificar a coerência dos valores de deformação específica axial e volumétrica posteriormente calculados. Esse objetivo não pôde ser integralmente cumprido, porquanto houve problemas na saturação do transdutor de volume, os quais foram agravados pela ausência de contrapressão. Como reflexo desse quadro, em dois ensaios não ocorreu boa concordância da deformação específica vertical com a volumétrica; nos demais, no entanto, houve uma consonância razoável desses parâmetros, como se vê no gráfico típico exibido na figura (VI.5).

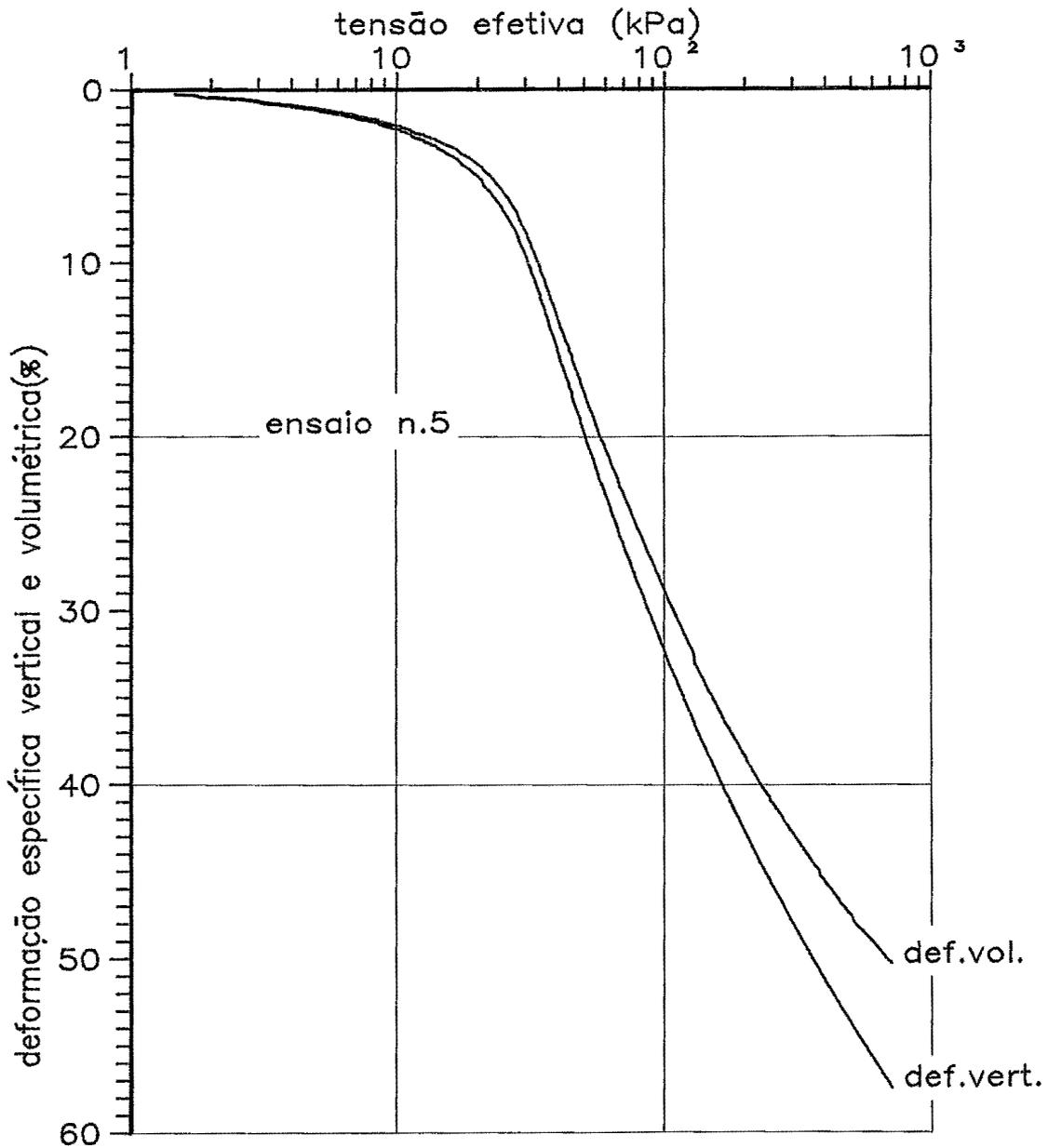


FIG. VI. 5 - Comparação de ϵ_v com ϵ_{VOL} (ensaio n.º 5).

VI.5- AS CURVAS DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA VERTICAL-TENSÃO EFETIVA (ESC.LOG.).

Apresentam-se nas figuras (VI.6) a (VI.11) os gráficos $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.) dos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

Analisando essas ilustrações, desvela-se a conclusão de que ao experimento sobredito está reservado um papel preeminente na obtenção rápida de curvas contínuas e bem definidas. Isso pode ser comprovado pelo bom padrão de qualidade alcançado no traçado gráfico das relações $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.), o qual é resultante da existência de um total de quinhentas leituras, sendo concentrado nas primeiras duas horas um quinto a um terço desse número. A princípio parecia nímio esse universo de pontos, cuja adoção se deveu a uma proposta de JAMIOLKOWSKI et alii (1985); a prática, porém, encarregou-se de ratificar a validade de seu uso.

Nas figuras (VI.6) a (VI.8) espelha-se a boa concordância dos gráficos $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.) promanados do ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ com os do convencional em corpos-de-prova moldados no mesmo tubo de amostragem, na profundidade de 4,0 m a 4,5 m.

Nas figuras (VI.9) a (VI.10) retratam-se as curvas $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.) de dois experimentos propositalmente executados com idêntica velocidade nominal de $3,67 \times 10^{-8}$ m/s, em corpos-de-prova extraídos do mesmo tubo de amostragem, na profundidade de 3,0 m a 3,5 m. Cabe mencionar que a deformação específica vertical, para um nível de tensão efetiva entre 800 kPa e 850 kPa, atingiu valores próximos a 60%. Essa elevada magnitude de ϵ_v é coerente com resultados de ensaios edométricos convencionais descritos, entre outros, por COUTINHO (1976), LACERDA e ORTIGÃO (1979) e MARTINS (1983).

Examinando-se a figura (VI.11), comprova-se a boa conformidade das curvas $\epsilon_v - \sigma_v$ (esc.log.), malgrado as taxas de deformação específica relacionadas ao tempo tenham valores distintos, com uma razão da ordem de cinco entre a maior e a menor.

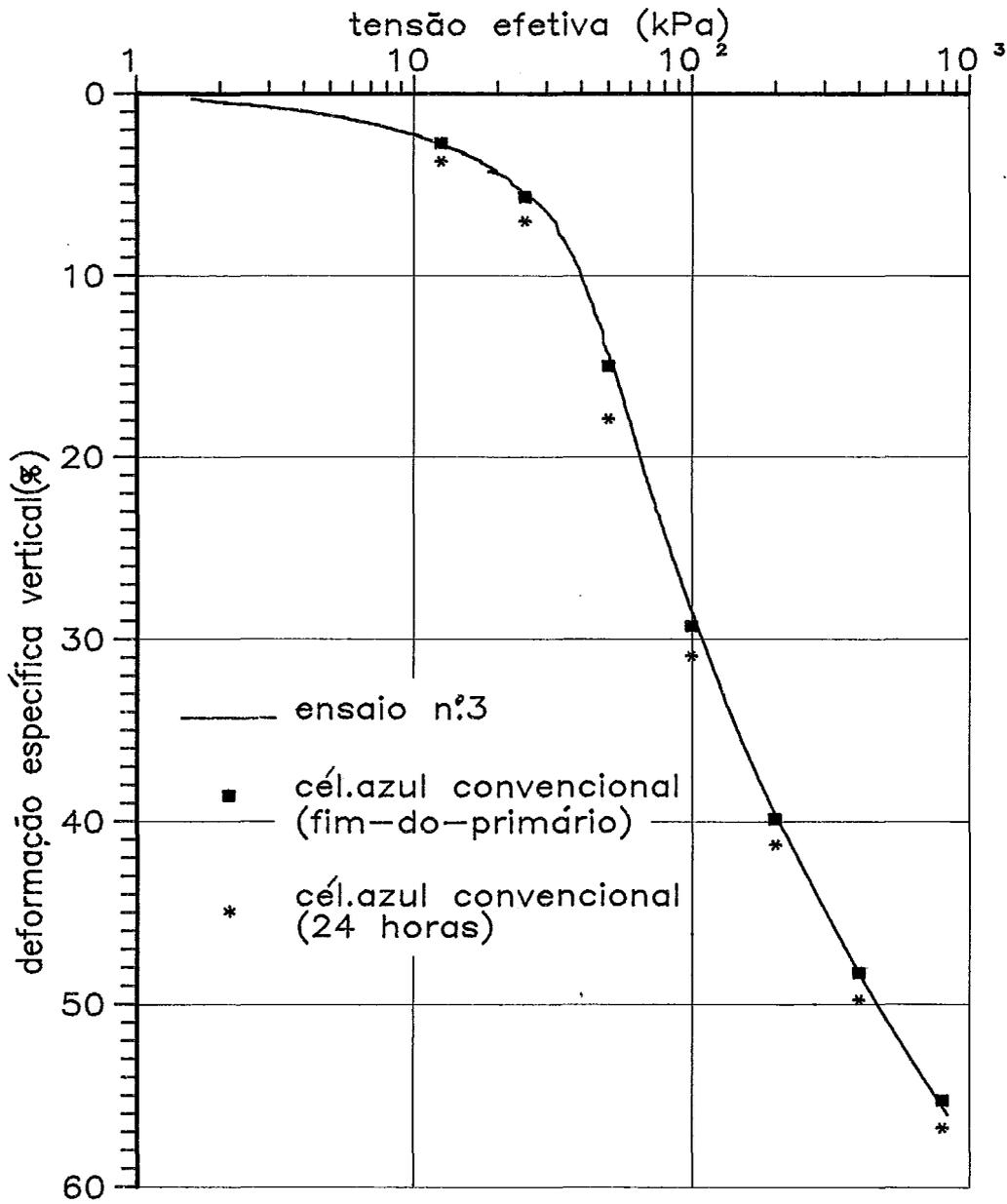


FIG. VI.6 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) do ensaio nº3 e do convencional (Prof. 4,0m a 4,5m).

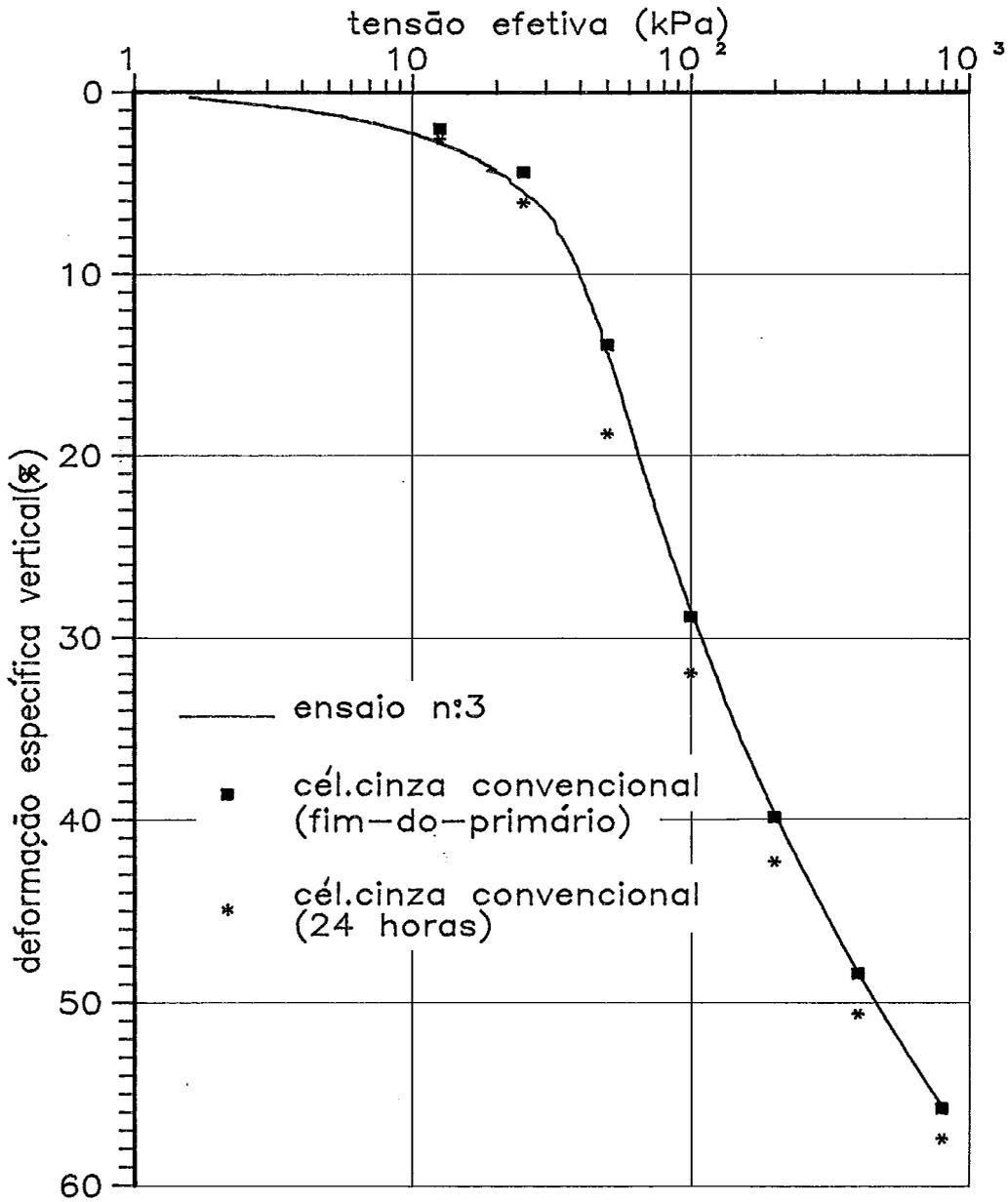


FIG. VI.7 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v^i$ (esc. log.) do ensaio n° 3 e do convencional (Prof. 4,0m a 4,5m).

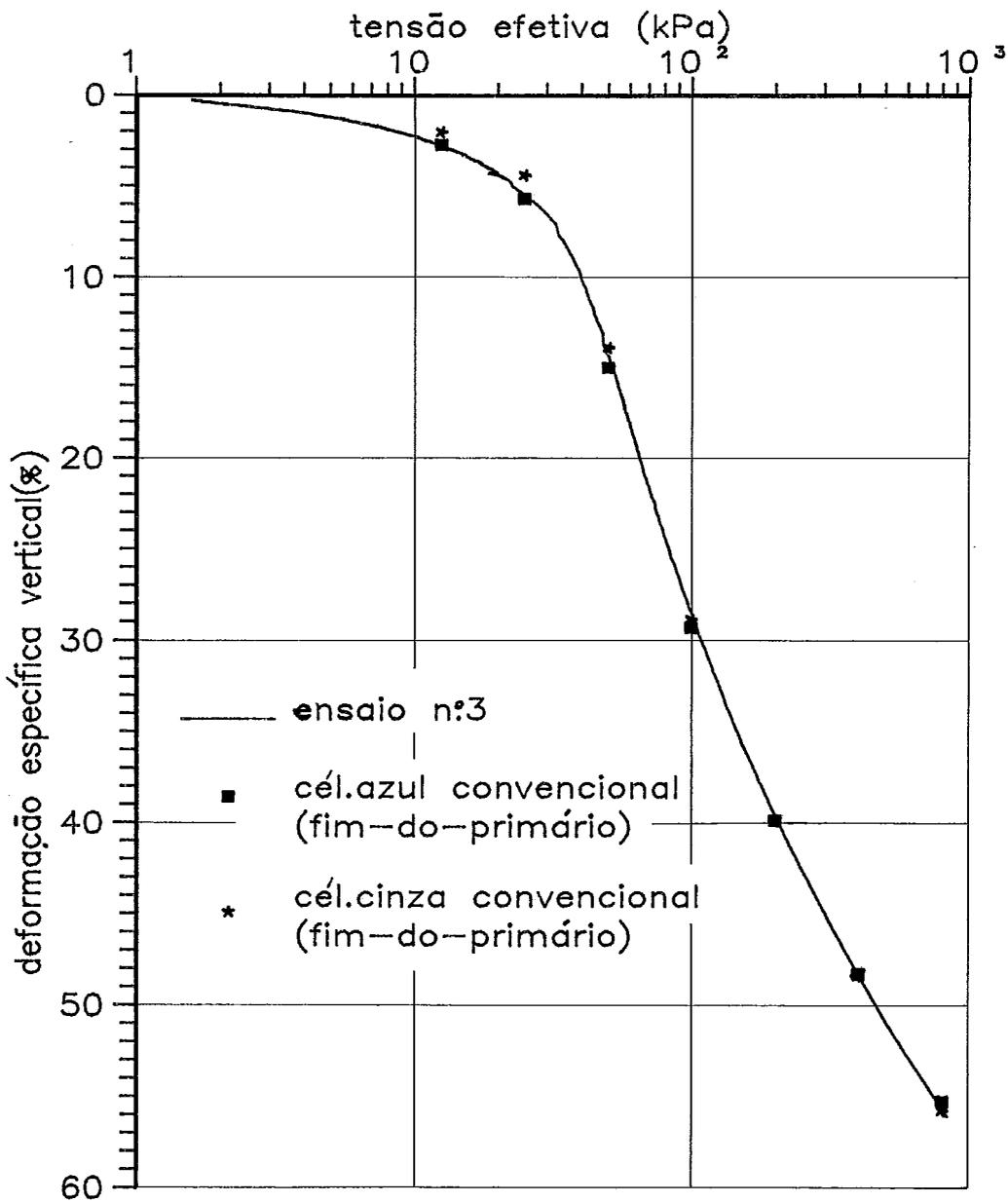


FIG. VI.8 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) do ensaio nº 3 e dos experimentos convencionais nas células azul e cinza (Prof. 4,0m a 4,5m).

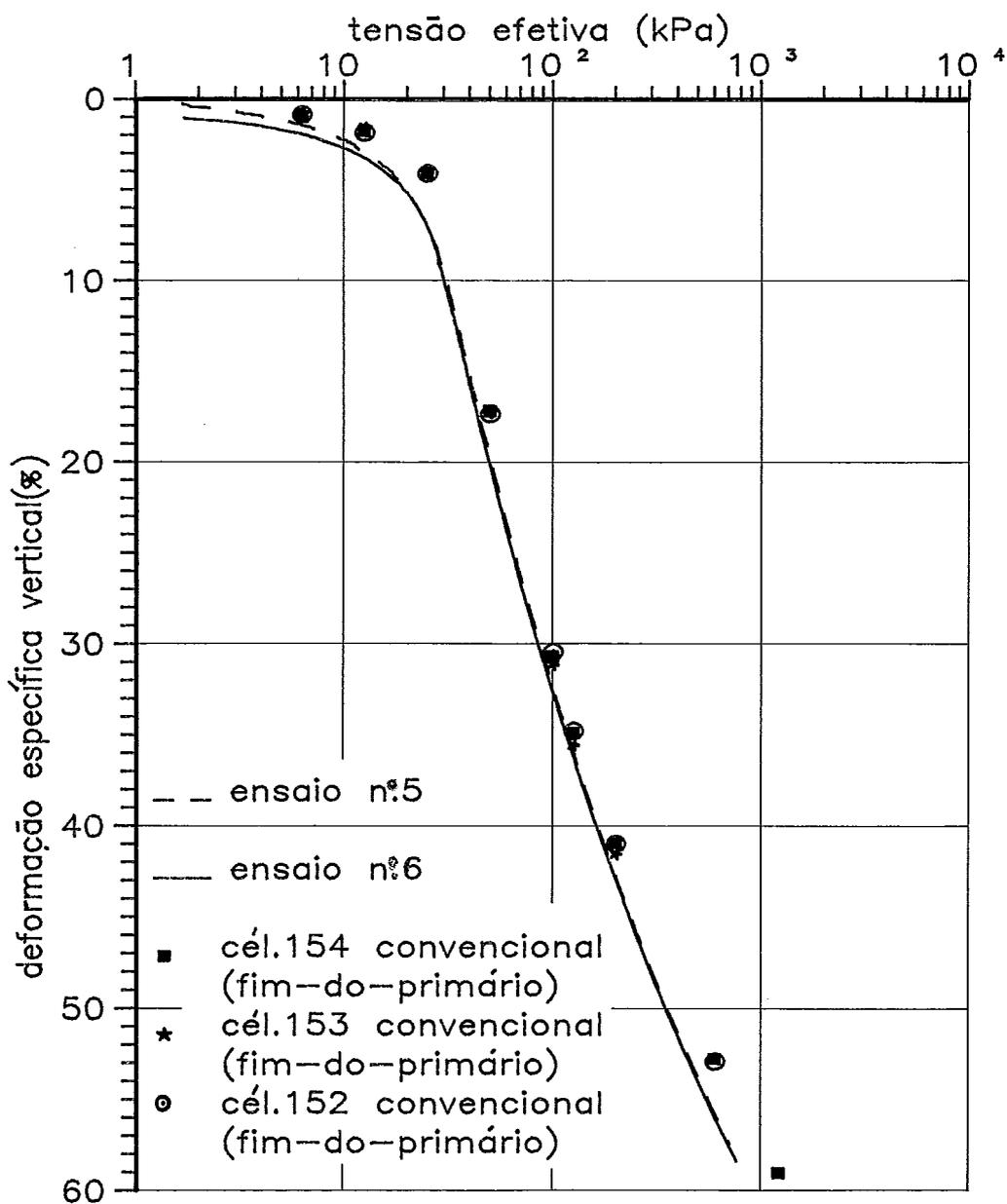


FIG. VI.9 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) dos ensaios n° 5 e 6 e dos convencionais nas células n° 152, 153 e 154 (Prof. 3,0 m a 3,5 m).

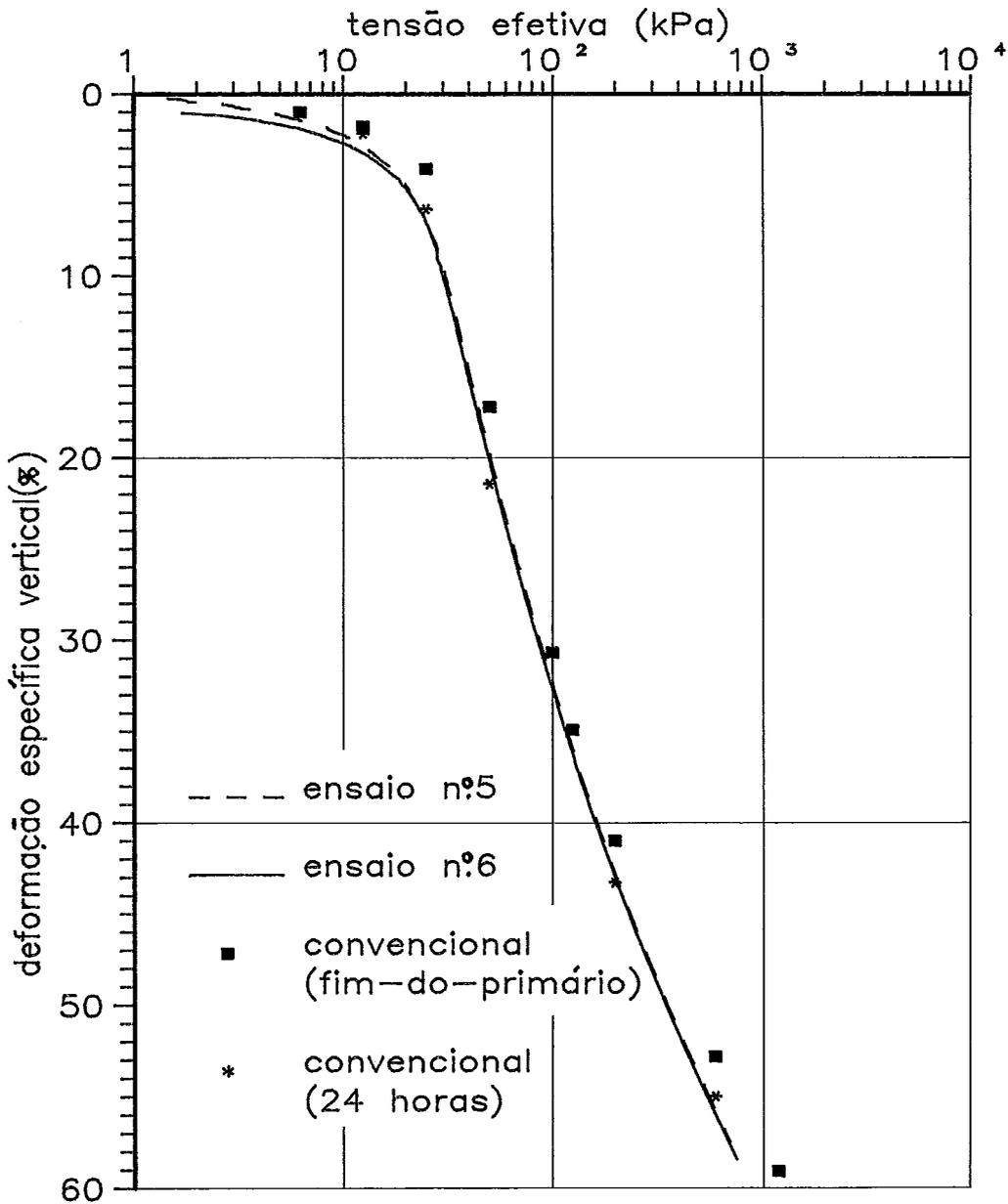


FIG. VI.10 - Curvas $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) dos ensaios nº 5 e 6 e do experimento convencional na célula nº 154 (Prof. 3,0m a 3,5m).

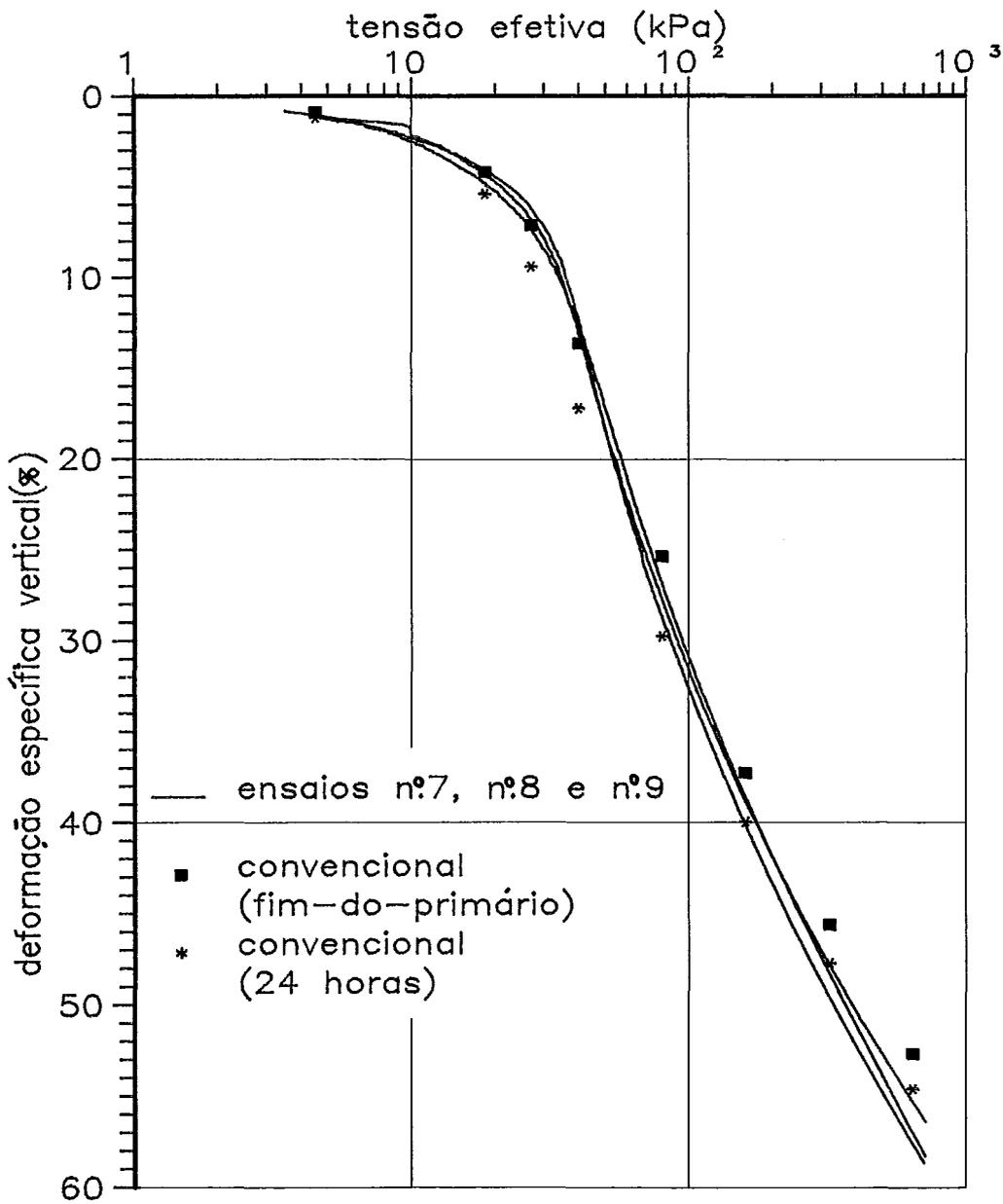


FIG. VI.11 - Curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$ (esc. log.) dos ensaios nº 7, 8 e 9 e do experimento convencional (Prof. 5,0 m a 5,5 m).

VI.6- AS CURVAS ÍNDICE DE VAZIOS-TENSÃO EFETIVA (ESC.LOG.).

Os gráficos $e-\sigma_v$ (esc.log.) dos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, a exemplo das curvas $\epsilon_v-\sigma_v$ (esc.log.), mostraram-se bem demarcados em consequência do número de pontos de que se valeu para traçá-los.

Na figura(VI.12) coteja-se o ensaio n.º5 com o n.º6, em termos de curvas $e-\sigma_v$ (esc.log.) que podem ser tomadas como características dos experimentos realizados. A excelente concordância dos gráficos dá a conhecer a confiabilidade do sistema de que se fez uso para controlar e executar o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Além disso, deve-se registrar que os índices de vazios iniciais das amostras diferiram muito pouco(4,292 e 4,341).

Nas figuras (VI.13) e (VI.14) são apresentadas as curvas $e-\sigma_v$ (esc.log.) dos ensaios n.º 7, 8 e 9, as quais assinalam a boa concordância obtida com diferentes valores de $\dot{\epsilon}_v$.

Importa, ainda, consignar um aspecto interessante, comum a todas as curvas $e-\sigma_v$ (esc.log.) aqui reproduzidas: a inexistência no trecho normalmente adensado da assim chamada "reta" virgem. Em razão disso, no cômputo do índice de compressão verificou-se uma variação de até 40%, o que é indicador da boa qualidade das amostras, segundo MARTINS(1983).

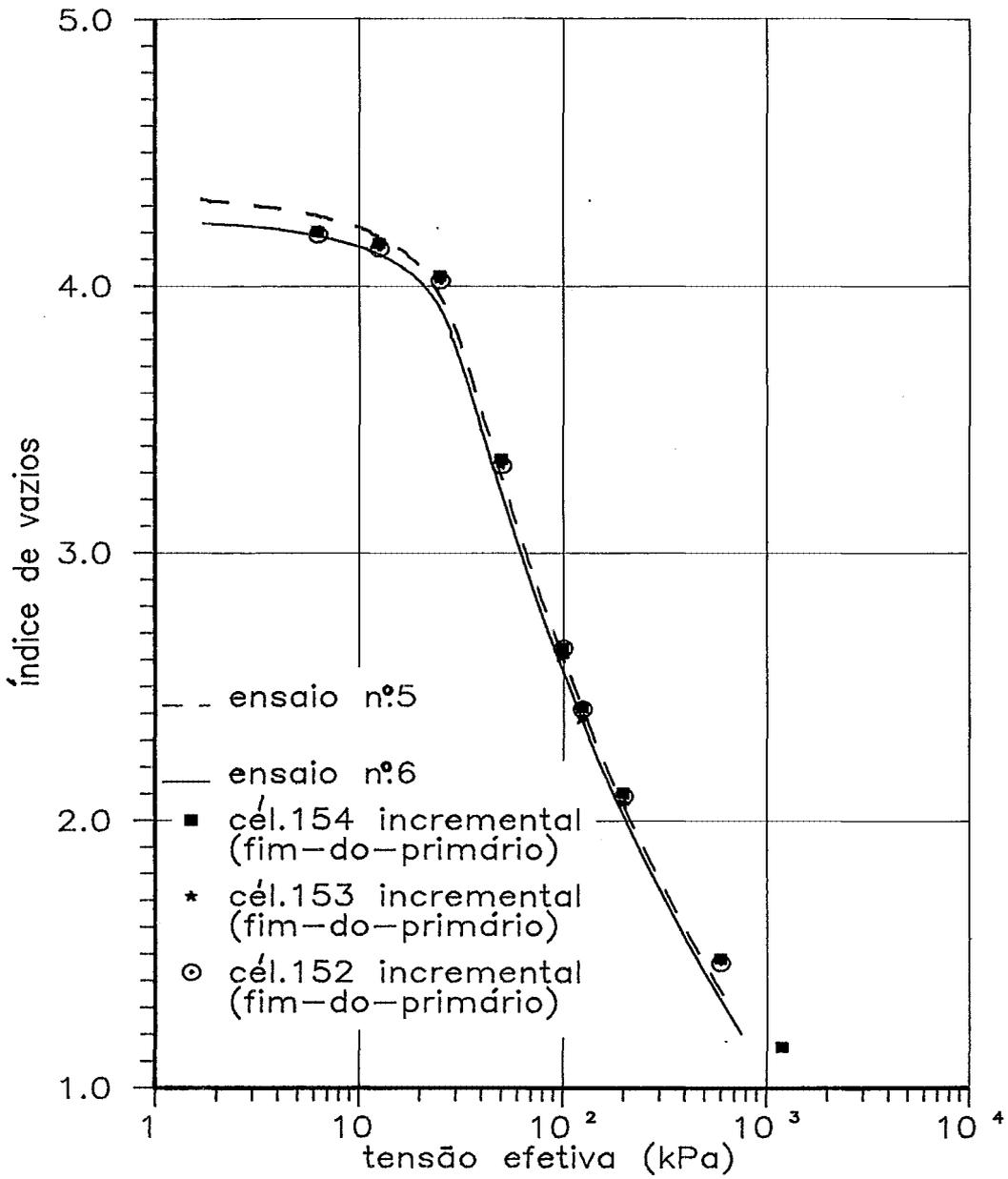


FIG. VI.12 - Curvas $e - \sigma_v^1$ (esc. log.) dos ensaios n.º 5 e 6 e dos convencionais nas células n.º 152, 153 e 154 (Prof. 3,0m a 3,5m).

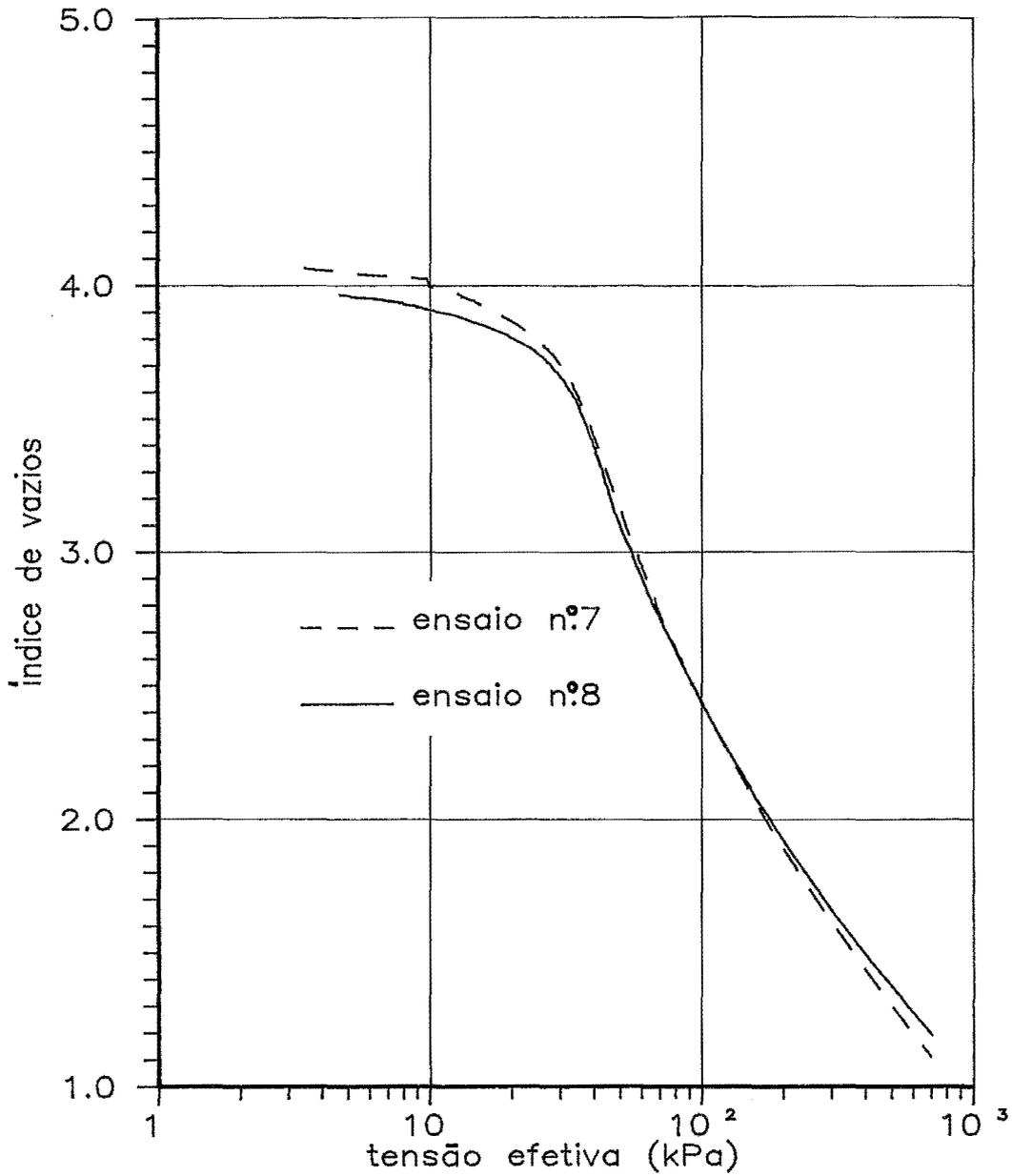


FIG. VI.13 - Curvas $e - \sigma'_v$ (esc. log.) dos ensaios nº 7 e 8 (Prof. 5,0m a 5,5m).

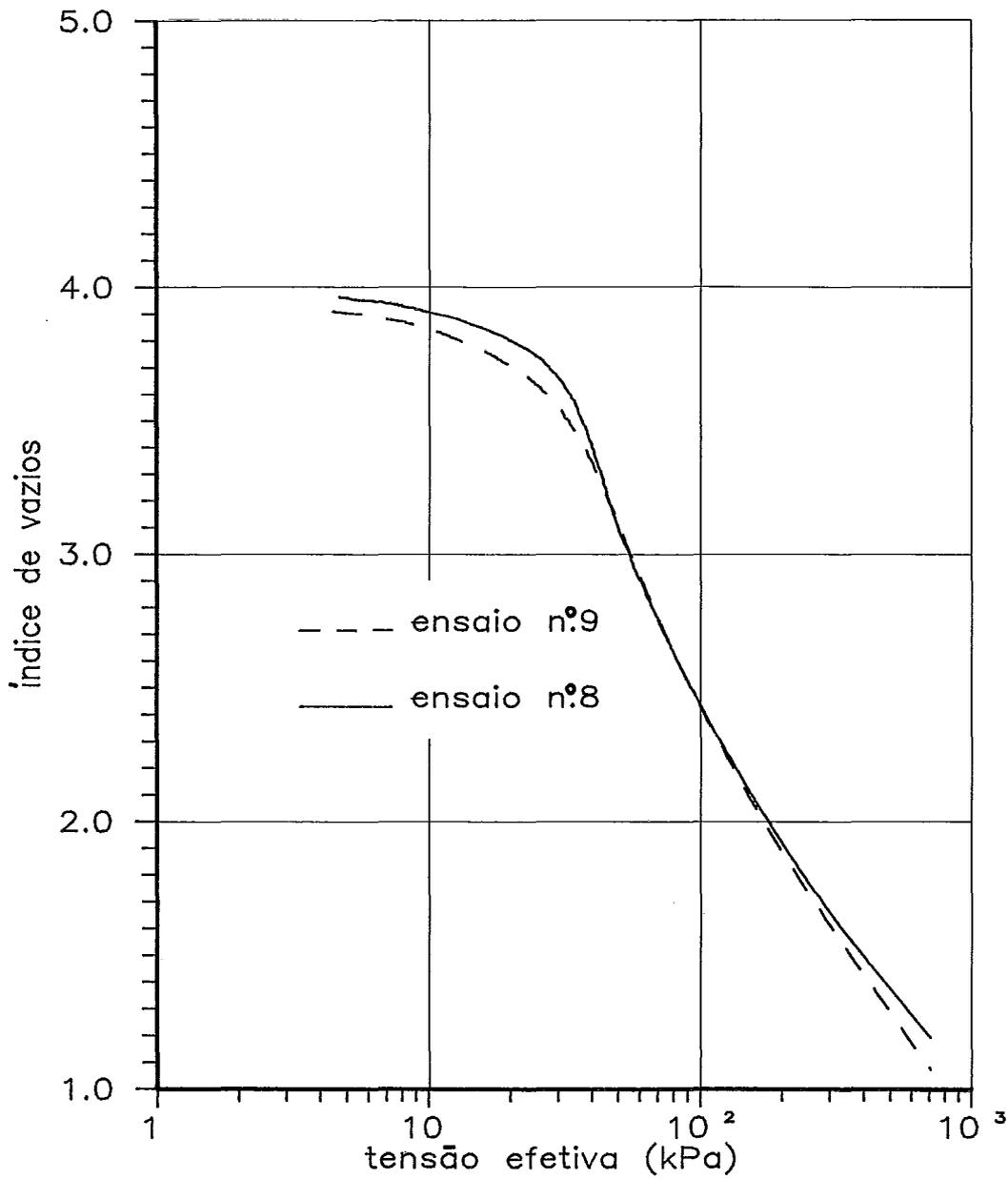


FIG. VI.14 - Curvas $e - \sigma_v'$ (esc. log.) dos ensaios nº 8 e 9 (Prof. 5,0 m a 5,5 m).

VI.7- AS CURVAS v (ESC.LOG.)- σ_v (ESC.LOG.).

Nesse tipo de gráfico, proposto por MARTINS(1983), prevê-se que é retilíneo o trecho normalmente adensado. A título de exemplo, nas figuras(VI.15.a) e (VI.15.b) apresentam-se as curvas v - σ_v (escala bilogarítmica) de dois ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Nelas pode-se verificar que existe uma ligeira curvatura, o que contraria, aparentemente, a proposição de MARTINS(1983).

Ocorre que, de acordo com o conceito de deformações infinitesimais, durante esses ensaios pode-se considerar $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. No entanto, provavelmente, o aumento de $\frac{d\epsilon_v}{dt}$ (que pode ser reescrito como $\frac{1}{H_i} \frac{d\delta}{dt}$, sendo H_i a altura do corpo-de-prova num dado instante) interferiu na forma da curva v - σ_v , especialmente nesse caso da argila do Sarapuá, onde o nível de ϵ_v atingiu quase 60%. Assim sendo, não serão apresentadas aqui as determinações da tensão de sobreadensamento pelo método Pacheco Silva modificado por MARTINS (1983).

VI.7- AS CURVAS v (ESC.LOG.)- σ_v (ESC.LOG.).

Nesse tipo de gráfico, proposto por MARTINS(1983), prevê-se que é retilíneo o trecho normalmente adensado. A título de exemplo, nas figuras(VI.15.a) e (VI.15.b) apresentam-se as curvas $v-\sigma_v$ (escala bilogarítmica) de dois ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. Nelas pode-se verificar que existe uma ligeira curvatura, o que contraria, aparentemente, a proposição de MARTINS(1983).

Ocorre que, de acordo com o conceito de deformações infinitesimais, durante esses ensaios pode-se considerar $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$. No entanto, provavelmente, o aumento de $\frac{d\epsilon_v}{dt}$ (que pode ser reescrito como $\frac{1}{H_i} \frac{d\delta}{dt}$, sendo H_i a altura do corpo-de-prova num dado instante) interferiu na forma da curva $v-\sigma_v$, especialmente nesse caso da argila do Sarapuí, onde o nível de ϵ_v atingiu quase 60%. Assim sendo, não serão apresentadas aqui as determinações da tensão de sobreadensamento pelo método Pacheco Silva modificado por MARTINS (1983).

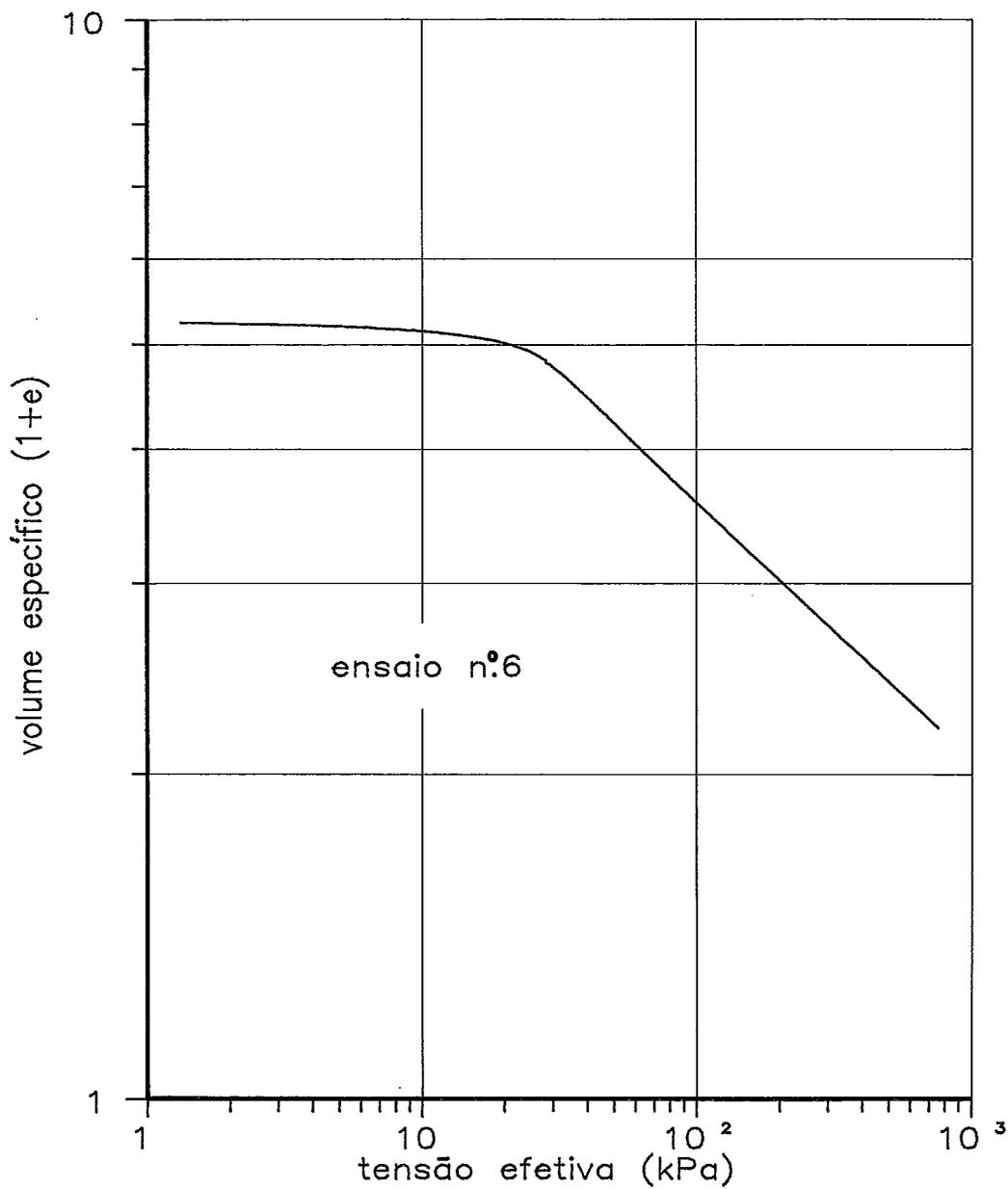


FIG. VI.15,a-Curva $v - \sigma_v'$ (escala bilogarítmica) do ensaio n° 6 (Prof. 3,0m a 3,5m).

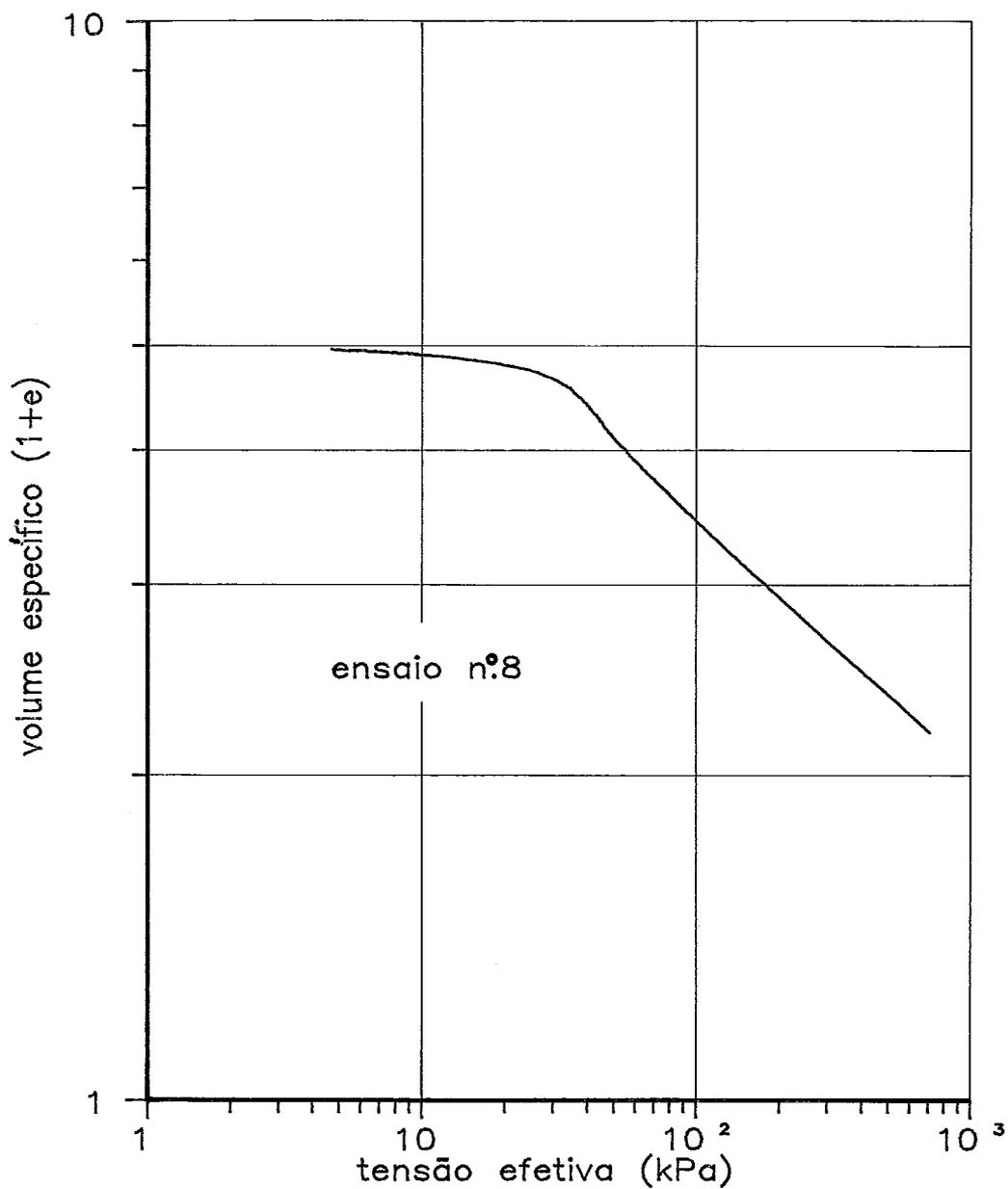


FIG. VI.15.b - Curva $v - \sigma_v'$ (escala bilogarítmica) do ensaio n° 8 (Prof. 5,0m a 5,5m).

VI.8-TENSÕES DE SOBREADENSAMENTO.

Na tabela (VI.5) mostram-se os valores da tensão de sobreadensamento determinados pelo método de Casagrande para os ensaios convencional e com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$.

	Profundidade	Tensão de sobre adensamento
<u>Ensaio convencional</u>		
célula n° 152	3,0 m a 3,5 m	30 kPa
célula n° 153	3,0 m a 3,5 m	28 kPa
célula n° 154	3,0 m a 3,5 m	28 kPa
<u>Ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{cte}$</u>		
n° 5	3,0 m a 3,5 m	26 kPa
n° 6	3,0 m a 3,5 m	26 kPa
<u>Ensaio convencional</u>		
célula azul	4,0 m a 4,5 m	38 kPa
célula cinza	4,0 m a 4,5 m	38 kPa
<u>Ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{cte}$</u>		
n° 3	4,0 m a 4,5 m	38 kPa
<u>Ensaio com $\dot{\epsilon}_v = \text{cte}$</u>		
n° 7	5,0 m a 5,5 m	32 kPa
n° 8	5,0 m a 5,5 m	33 kPa
n° 9	5,0 m a 5,5 m	32 kPa

TABELA VI.5- DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES DE SOBREADENSAMENTO EM ENSAIOS COM $\dot{\epsilon}_v = \text{CONSTANTE}$ E EM CONVENCIONAIS.

VI.9- AS CURVAS $u_b - \sigma_t$ (ESC.LOG.).

Na figura(VI.16) apresenta-se um gráfico típico dos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, no tocante ao desenvolvimento da sobrepressão hidrostática. Nessa ilustração põe-se em relevo uma característica

notável, representada pela boa correspondência existente entre o ponto onde a curva $u_b - \sigma_v$ sofre uma alteração brusca e a faixa da tensão de sobreadensamento. Deve-se assinalar que GORMAN et alii (1978) já haviam comentado esse aspecto, quando da análise dos resultados de seus experimentos.

Torna-se inteligível o que ocorre com o gráfico $u_b - \sigma_v$ (esc.log.), quando se analisam as fases do fenômeno cujo marco divisor é a tensão de sobreadensamento. No trecho de recompressão, o corpo-de-prova se deforma pouco, logo a quantidade de água a ser expelida é pequena, admitindo-se válidas as hipóteses 1 e 2 do item (II.2). Assim sendo, a taxa de deformação específica relacionada ao tempo imposta é menor que a necessária para que haja acumulação da sobrepresssão hidrostática.

Quando é ultrapassada a tensão de sobreadensamento, o solo tende a se deformar bastante, mas a taxa de deformação específica relacionada ao tempo a ele aplicada tem valor suficiente para fazer com que ocorra acréscimo contínuo da sobrepressão hidrostática. Em outras palavras: a velocidade de recalque própria do solo é menor que a impingida externamente pela prensa e disso resulta que, na unidade de tempo, a dissipação de uma dada sobrepressão hidrostática ainda não se terá completado, quando novo acréscimo de tensão total já estará ocorrendo. Estendendo-se esse processo ao que acontece durante toda a fase do ensaio aqui tratada, é de se concluir que haverá uma adjeção permanente do parâmetro u_b até o fim do experimento.

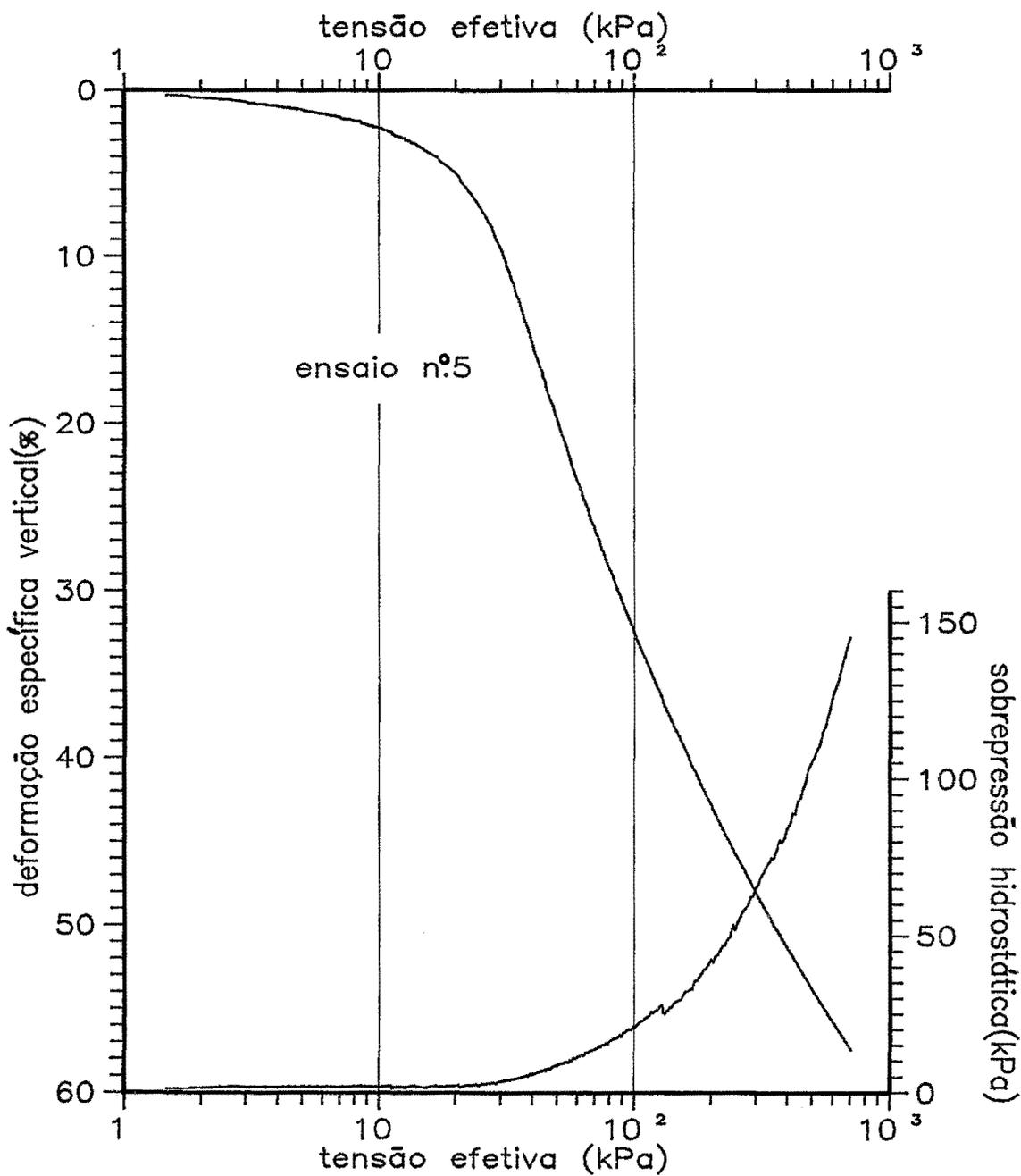
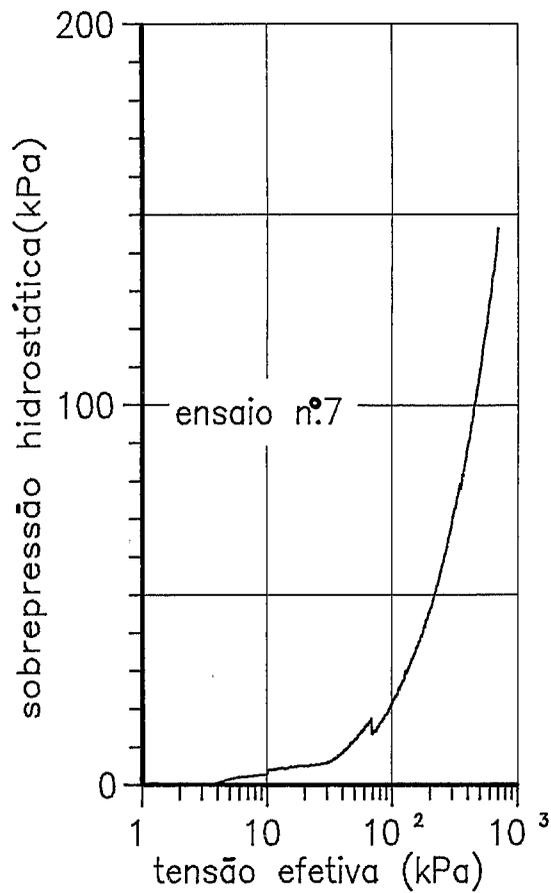


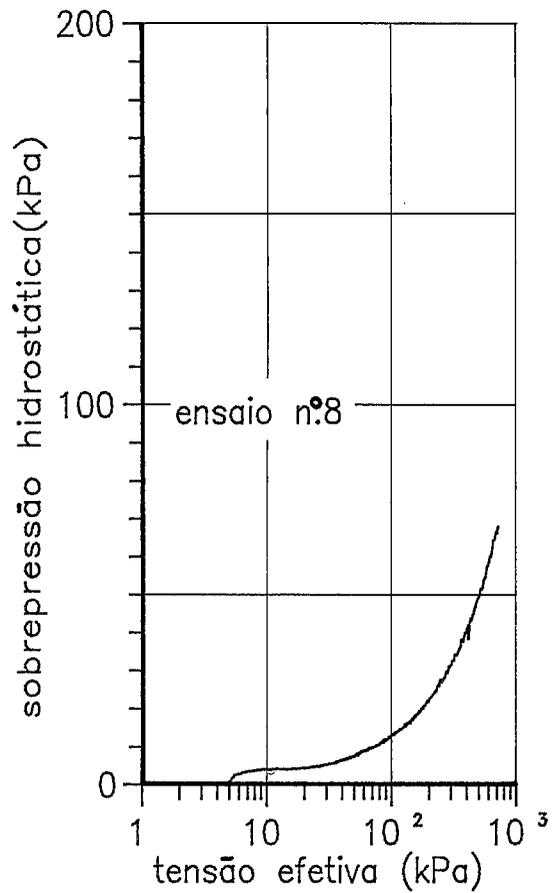
FIG. VI.16 - Curvas $u_b - \sigma_v'$ (esc. log.) e $\epsilon_v - \sigma_v'$ (esc. log.) do ensaio n° 5 (Prof. 3,0m a 3,5m).

Na figura(VI.17) patenteia-se uma característica importante, já anteriormente mencionada por vários autores (SÄLLFORS, 1975; GORMAN et alii, 1978; LEROUEIL et alii, 1985 e SILVESTRI et alii,1986), que concerne ao aumento da sobrepressão hidrostática lida na base à medida que cresce a taxa de deformação específica relacionada ao tempo em uso nos ensaios em que se mantém este parâmetro controlado. Analisando essa ilustração, comprova-se que ao ensaio mais lento (nº8) está vinculado o menor valor de u_b , ao passo que ao mais rápido (nº9) associa-se a mais elevada magnitude desse parâmetro.

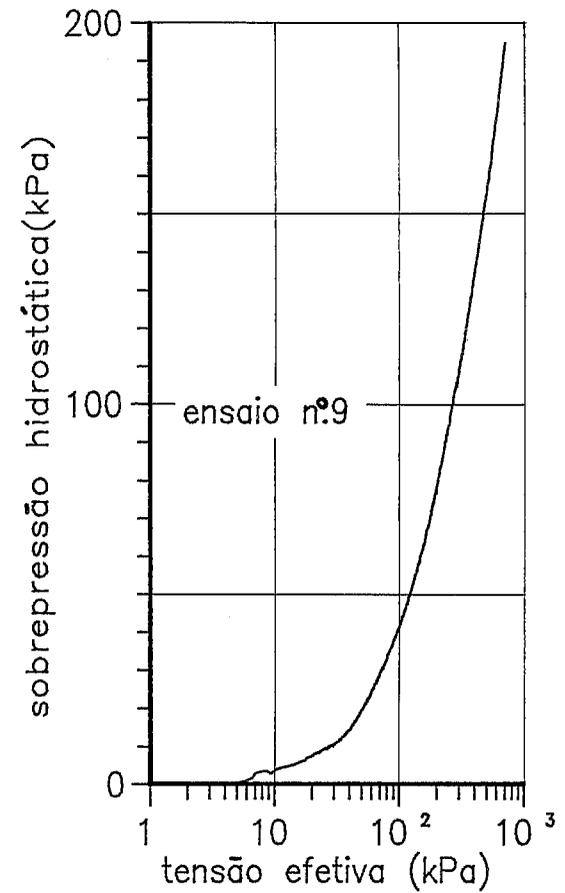
Esse fenômeno pode ser explicado à luz da interpretação acima dada para o desenvolvimento de u_b , desde que se observe que taxas de deformação específica relacionadas ao tempo crescentes induzem uma sobrepressão hidrostática, ainda por ser dissipada, cada vez maior. Força-se, assim, o corpo-de-prova a se adensar mais rapidamente do que ocorreria se não agissem os fatores externos nas condições aqui descritas, de tal maneira que ainda não houve tempo para que se concluísse a dissipação da sobrepressão hidrostática relativa a um incremento de σ_v na unidade de tempo, quando um novo já está sendo aplicado.



(a)



(b)



(c)

FIG. VI.17 - Curvas $u_b - \sigma_v'$ (esc. log.) dos ensaios n.º 7, 8 e 9 (Prof. 5,0m a 5,5m).

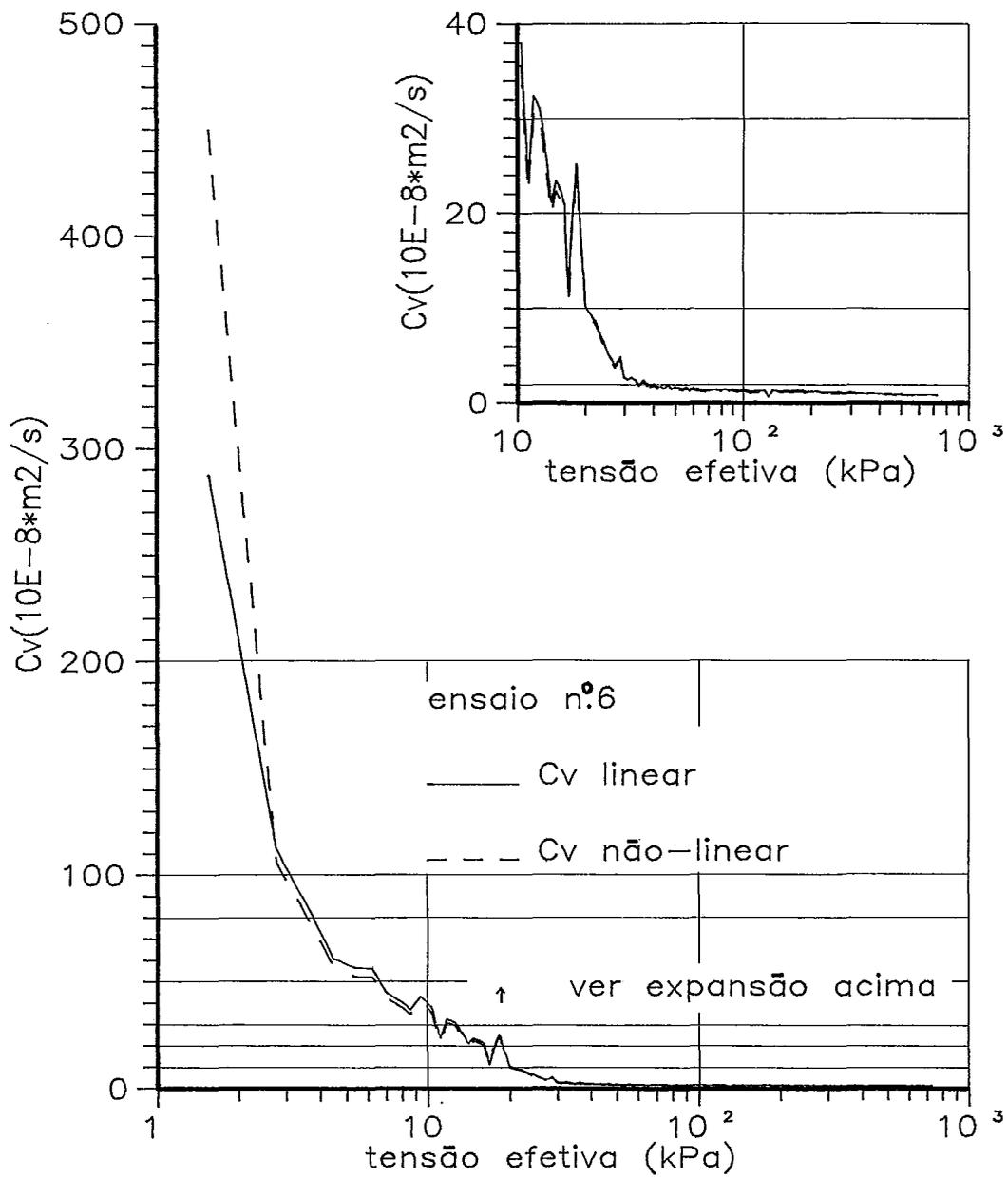


FIG. VI.18 - Curvas $c_v - \sigma_v^i$ (esc. log.) do ensaio n.º 6 (Prof. 3,0m a 3,5m).

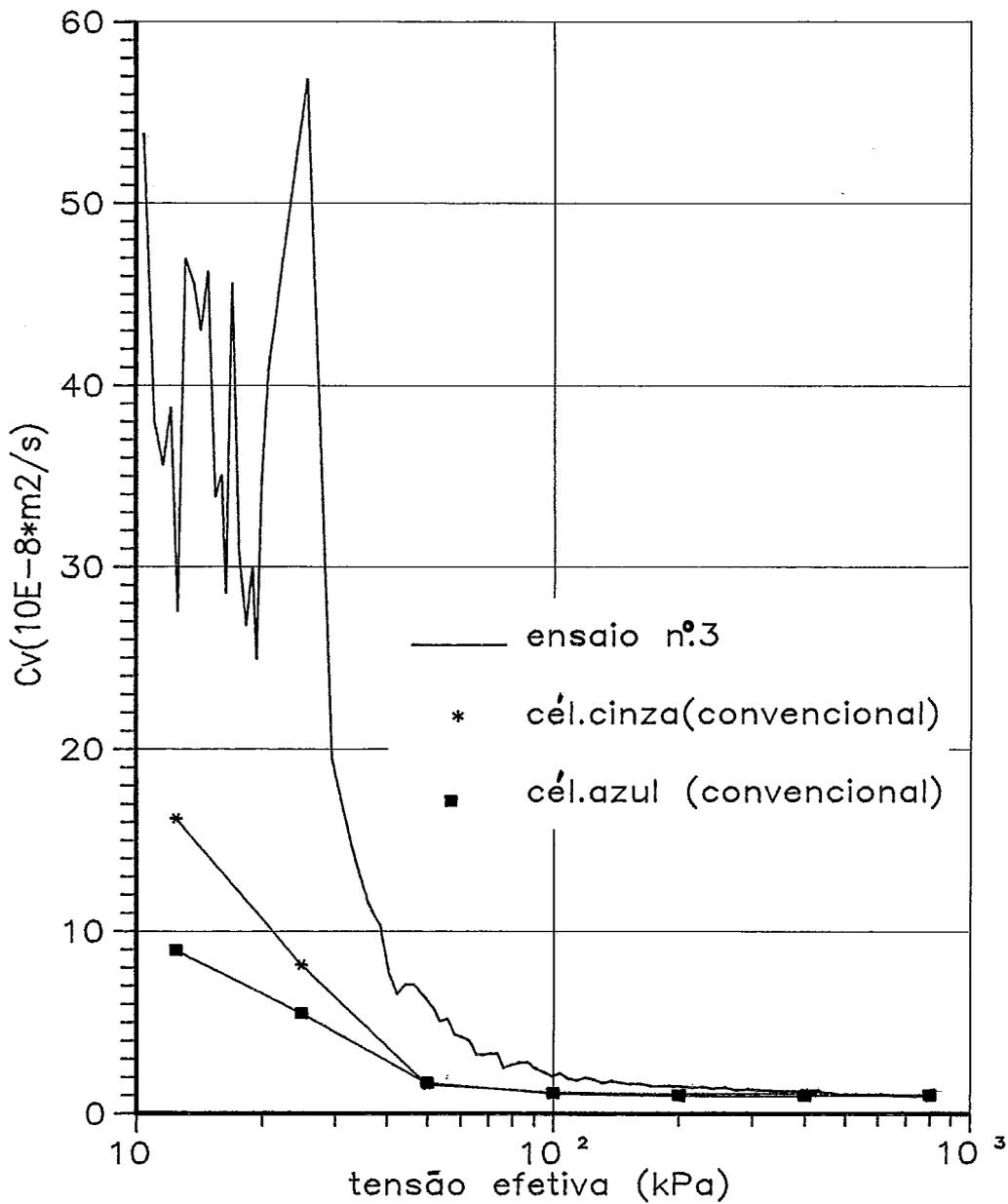


FIG. VI.19 - Curvas $c_v - \sigma_v^i$ (esc. log.) do ensaio n.º 3 e dos experimentos convencionais nas células azul e cinza (Prof. 4,0 m a 4,5 m).

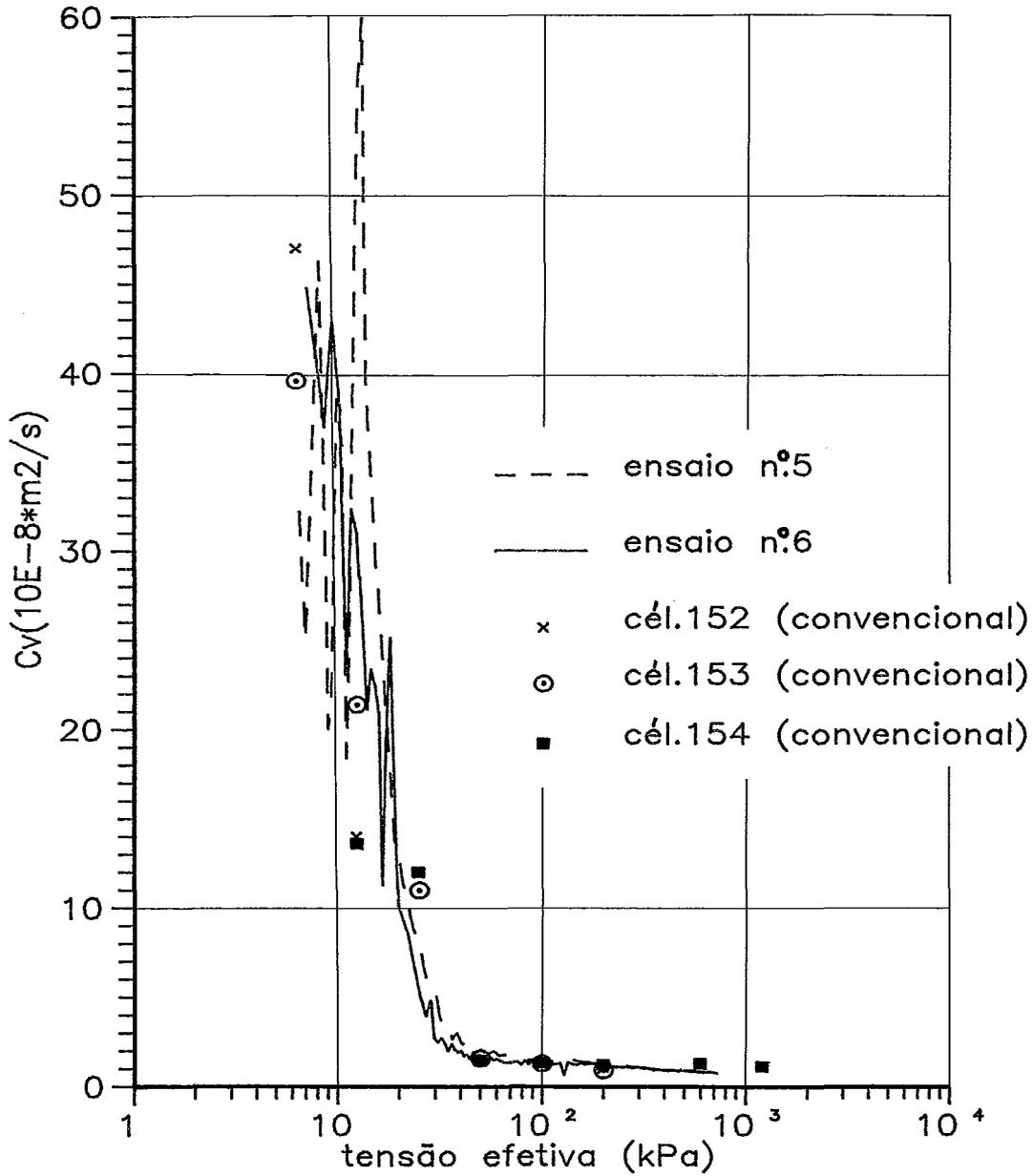


FIG. VI. 20 - Curvas $c_v - \sigma_v'$ (esc. log.) dos ensaios n.º 5 e 6 e dos convencionais nas células n.º 152, 153 e 154 (Prof. 3,0m a 3,5m).

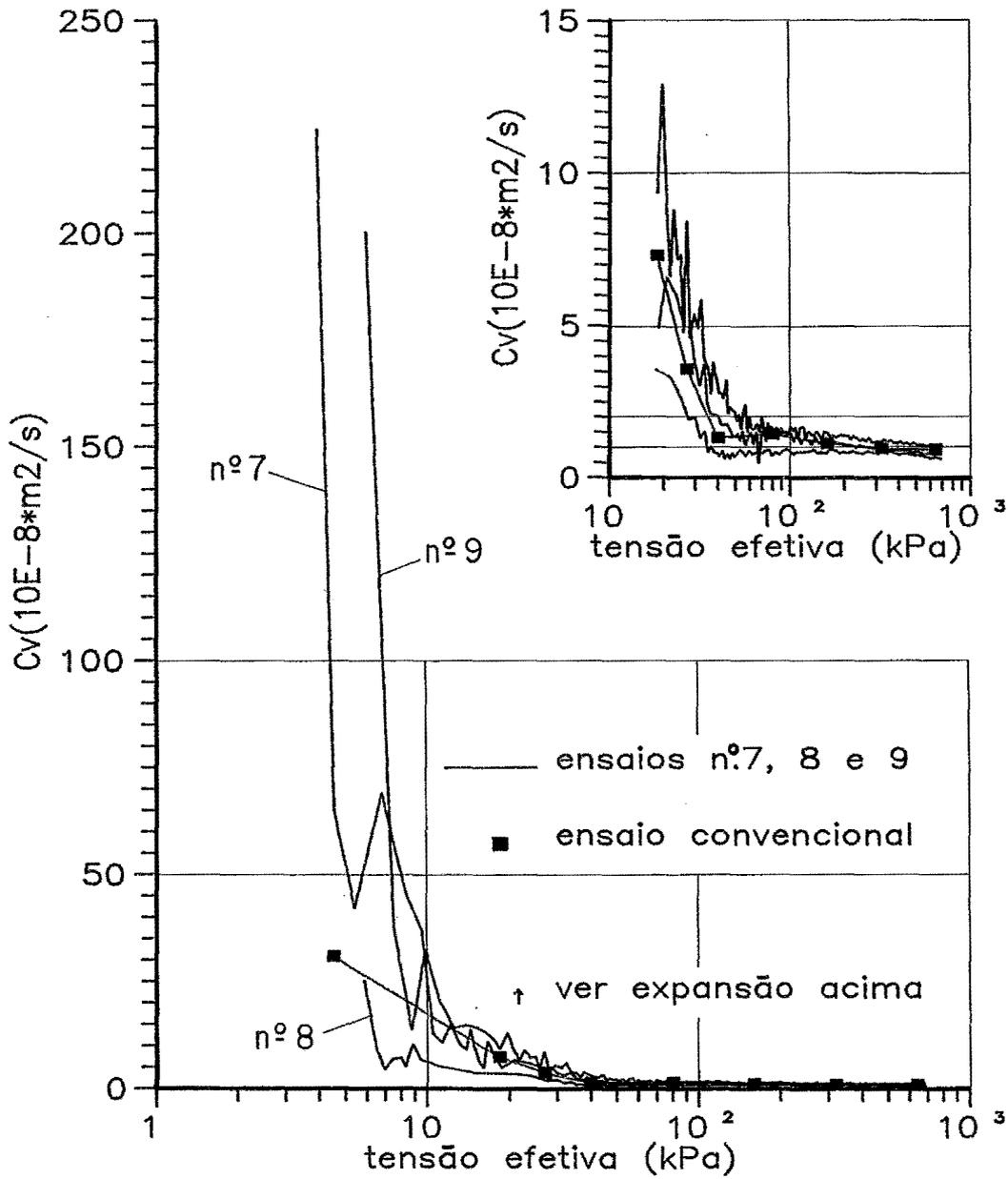


FIG. VI. 21 - Curvas $c_v - \sigma'_v$ (esc. log.) dos ensaios n° 7, 8 e 9 e do experimento convencional (Prof. 5,0m a 5,5m).

VI.11- COMENTÁRIOS FINAIS.

Fazendo-se uma análise percuciente dos dados e parâmetros de compressibilidade resultantes dos ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, ganha vulto a convicção quanto à capacidade desse tipo de experimento de produzir em curto intervalo de tempo (o mais rápido durou 16 horas) as informações cuja consecução por processo convencional demandaria, pelo menos, mais de uma semana.

Convém notar que, para se atingir tal ilação, foi necessário arrostar o desafio de não obedecer integralmente às regras ditadas por pesquisas anteriormente feitas em solos com características diversas das inerentes à argila do Sarapuí. Para isso acreditou-se no caráter cognitivo da experimentação, aqui alçada à categoria de importante instrumento para averiguar a validade de critérios teóricos desenvolvidos com o fito de resolver problemas específicos do ensaio, a exemplo da determinação da sua velocidade.

Com esse processo interativo podia-se aferir a validade de cada procedimento adotado, sempre tomando como padrão o ensaio de adensamento convencional, dada a ingente experiência acumulada ao longo dos anos com essa modalidade de experimento.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TEMAS PARA FUTURAS PESQUISAS.

VII.1- INTRODUÇÃO.

Neste trabalho colimava-se o objetivo de desenvolver uma metodologia para execução do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo que fosse compatível com as características da argila do Sarapuí. Para tanto, fazia-se necessário implantar e aferir um sistema automático de aquisição e processamento de dados especialmente concebido para atender às exigências desse experimento.

Findas essas duas etapas, o autor da presente dissertação, posto que considere mais adequado o conceito de deformações finitas para o exame do adensamento na argila do Sarapuí, resolveu coarctar o campo de análise a deformações infinitesimais. Isso se deu porque aquela formulação, sobre estar incipiente no Brasil, ultrapassava o escopo estabelecido para um trabalho que introduzia na COPPE-UFRJ o ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo. Assim sendo, decidiu-se cumprir a tarefa de interpretar os resultados à luz de uma teoria coerente e cingida à esfera das deformações infinitesimais, como é o caso da proposta no artigo de WISSA et alii (1971).

VII.2-CONCLUSÕES RELATIVAS AO ENSAIO DE ADENSAMENTO COM TAXA CONSTANTE DE DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA RELACIONADA AO TEMPO.

- a)A ausência do uso de contrapressão aparentemente não influenciou nos resultados dos ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$, haja vista sua boa conformidade com os promanados de experimentos convencionais;
- b)No trecho normalmente adensado não houve a dissonância, verificada por WISSA et alii (1971), entre os valores do coeficiente de adensamento calculados supondo m_v constante e aqueles em cujo cômputo se considerou C_c constante, ainda que a razão u_b/σ_v fosse superior a 5%;

- c) Para a argila do Sarapuí podem ser obtidos bons resultados em ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo que perdurem entre 16 e 27 horas, mantendo-se u_b/σ_v inferior a 30%;
- d) A estimativa da velocidade de ensaio pode ser bem conduzida através do método proposto neste trabalho, devendo-se, no caso da argila do Sarapuí, não seguir o que prescreve a norma ASTM 4186-82 (1982) para esse tema específico;
- e) As alterações que foram feitas no equipamento WF24650, conquanto em alguns casos modificassem concepções de projeto, revelaram-se eficazes e indispensáveis à boa execução de ensaios na argila do Sarapuí;
- f) Os gráficos $v-\sigma_v$ (escala bilogarithmica) dos ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo apresentaram ligeira curvatura, o que contraria, aparentemente, a formulação de MARTINS (1983) quanto à existência de um trecho virgem retilíneo neste tipo de diagrama;
- g) Para haver um bom desempenho do experimento aqui mencionado é essencial que se proceda a uma saturação completa da câmara de adensamento e sejam observados todos os itens da metodologia proposta. A desídia em relação a qualquer um deles baldará os esforços do operador que tiver como desiderato a consecução de bons resultados;
- h) Os valores do coeficiente de adensamento, no trecho normalmente adensado, mostraram-se concordantes com os provenientes de ensaios convencionais e enquadram-se na faixa descrita por COUTINHO (1976);
- i) As curvas $e-\sigma_v$ (esc. log.), à semelhança do que haviam concluído MARTINS (1983) e VIEIRA (1988), resultaram em valores de C_c que variaram em até 40% em relação ao valor máximo encontrado;
- j) A posição das curvas $\epsilon_v-\sigma_v$ dos ensaios n.º 8 e 9, na mesma profundidade de 5,0m a 5,5m, não foi significativamente afetada pelo fato de a velocidade deste último experimento ter sido cinco vezes maior que a do primeiro;
- l) O cálculo de c_v sem considerar a fase transiente não implica erro ponderável porque seus valores harto elevados no início do ensaio asseguram a existência de um fator-tempo maior que 0,35 antes de decorrido um minuto;

m) Para a argila do Sarapuí é conveniente que se principie o ensaio de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ após a dissipação da sobrepressão hidrostática gerada na fase incremental, conforme proposto no procedimento do capítulo IV.

VII.3—CONCLUSÕES CONCERNENTES AOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDMÉTRICO REALIZADOS NO TRICON.

- a) Considerando os objetivos para os quais foi projetado, o equipamento TRICON possibilita a execução de ensaios de adensamento edométrico com um bom padrão de qualidade;
- b) Os ensaios de adensamento edométrico a que se procedeu no TRICON forneceram resultados concordantes com os advindos do experimento convencional;
- c) O problema causado pela relaxação da mola foi minimizado pela técnica de ajustar as leituras de deslocamento do extensômetro de tal forma que a tensão total se mantivesse constante;
- d) O aparelho TRICON, por sua simplicidade e seu pequeno volume, é adequado para atividades didáticas e trabalhos de campo.

VII.4—PROPOSTAS DE TEMAS PARA FUTURAS PESQUISAS.

Como sói acontecer em atividades de pesquisa, o término de um trabalho em um dado instante representa, se tanto, o coroamento de um esforço de superação de lacunas até então existentes. Esta dissertação talvez tenha preenchido alguma delas, mas é por se estar ciente de suas limitações e da necessidade de prosseguir a tarefa, ora somente iniciada, que se julga pertinente sugerir temas para venturas investigações científicas, como segue abaixo:

- a) Demonstrar matematicamente, para o ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo, uma fórmula de cálculo de c_v que leve em conta a relação volume específico—tensão efetiva observada no gráfico bilogarítmico;

- b) Avançar no estudo do método proposto neste trabalho para estimar a velocidade de ensaio, usando, porém, uma teoria de adensamento não-linear (m_v variável);
- c) Proceder a ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo na argila do Sarapuí com uma ampla gama de valores de $\dot{\epsilon}_v$, visando verificar a influência deste parâmetro na posição das curvas $\epsilon_v - \sigma'_v$;
- d) Aperfeiçoar o procedimento de experimentação aqui proposto (por exemplo, construindo uma peça que evite a necessidade de aplicar um jato d'água na base da célula de adensamento quando da sua montagem);
- e) Realizar ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo com ciclo de carga e descarga;
- f) Fazer uso de contrapressão e perquirir sua interferência nos resultados dos ensaios de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo;
- g) Analisar os dados dos seis ensaios de adensamento com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ deste trabalho à luz do conceito de deformações finitas;
- h) Analisar o coeficiente de compressibilidade volumétrica (m_v) obtido nos ensaios com $\dot{\epsilon}_v = \text{constante}$ de acordo com a proposição teórica de MARTINS (1983);
- i) Dar prosseguimento aos ensaios de adensamento no TRICON, procurando equacionar o assunto relativo à relaxação da mola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ALMEIDA, M.S.S. (1988), "Ensaio especiais de adensamento", *Anais, Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e de laboratório em Geotecnia*, Rio de Janeiro, vol.1, pp.1-28.
- ABOSHI, H., YOSHIKUMI, H. e MARUYAMA, S., (1970), "Constant loading rate testing", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.X, n° 1, pp. 43-56.
- ARMOUR Jr., D.W. e DRNEVICH, V.P., (1986), "Improved techniques for the constant rate of strain consolidation test", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892*, R.N.Yong e and F.C. Townsend, Eds, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 170-183.
- BALIGH, M.M., AZZOUZ, A.S.e CHIN, C.T., (1987), "Disturbances due to ideal tube sampling", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.113, n° 7, pp.739-757.
- BISHOP, A.W. e HENKEL,D.J., (1962), *The measurement of soil properties in the triaxial tests*, Edward Arnold LTD., Londres.
- BJERRUM, L. (1967), "Engineering Geology of norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings", *Géotechnique*, vol.17, n° 2, pp.81-118.
- BJERRUM, L. (1973), "Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils(Collapsible, Expansive and others)", *Proceedings, VIII Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering*, Moscou, vol.3, pp. 111-159.
- BYRNE, P.M. (1972), "Discussion of consolidation at constant rate of strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.98, n° SM9, September, pp. 963-966.

- COLLINGWOOD, F. (1891), "Foundations—a lecture at the Reusselaer Polytechnic Institute", *Engineering News*, vols.25–26, n° 14, February. Em KRYNINE (1941).
- COUTINHO, R.Q. (1976), "Características de adensamento com drenagem radial de uma argila mole da Baixada Fluminense", *tese M.Sc.*, COPPE–UFRJ.
- CRAWFORD, C.B. (1964), "Interpretation of the Consolidation Test", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.90, n° SM5, pp. 93–108.
- CRAWFORD, C.B. (1965), "Resistance of Soil Structure to Consolidation", *Canadian Geotechnical Journal*, vol.2, n° 2, pp.90–115.
- CRAWFORD, C.B. (1986), "State of the Art: Evaluation and Interpretation of Soil Consolidation Tests", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, R.N.Yong e F.C.Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 71–103.
- CRAWFORD, C.B. (1988), "Technical note on the importance of rate of strain in the consolidation test", *Geotechnical Testing Journal*, vol.11, n° 1, March, pp.60–62.
- CUNHA, R.P. (1988), "Análise da ruptura de um aterro sanitário sobre a argila do Caju", *tese M.Sc.*, COPPE–UFRJ.
- DUARTE, A.E.R. (1977), "Características de compressão confinada da argila mole do rio Sarapuá, km 7,5 da rodovia Rio–Petrópolis", *tese M.Sc.*, PUC–RJ.
- DUCASSE, P., MIEUSSENS, C., MOREAU, M. and SOYEZ, B., (1986), "Oedometric testing in the laboratoires des Ponts et Chaussées, France", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, R.N.Yong e F.C.Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 282–298.

- EVANGELISTA, A. e VIGGIANI, C., (1973), "Discussion of consolidation at constant rate of strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.99, n° SM1, January, pp. 141-144.
- GERMAINE, J.T.(1985), "Recent developments in measurement and modeling of clay behavior for foundation design", *Summer Course, M.I.T.*, vol.1.
- GORMAN, C.T., HOPKINS, T.C., DEEN, R.C. e DRNEVICH, V.P., (1978), "Constant rate of strain and controlled gradient testing", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, vol.1, n°1, mar., pp. 3-15.
- HAMILTON, J.J. e CRAWFORD, C.B. (1959), "Improved determination of preconsolidation pressure of a sensitive clay", *ASTM STP 254*, Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing, American Society for Testing and Materials, pp.254-271.
- HEAD, K.H. (1986), *Manual of soil laboratory testing*, ELE international limited, Londres, vol.2.
- HOLTZ, R.D., JAMIOLKOWSKI, M.B. E LANCELLOTA, R., (1986), "Lessons on high quality samples", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.112, n° 8, pp.768-776.
- JAMIOLKOWSKI, M., LADD, C.C., GERMAINE, T.T. e LANCELLOTA, R., (1985), "New developments in field and laboratory testing of soils", *Proceedings*, XI Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, San Francisco, vol.2, pp. 1-97.
- JANBU, N. (1969), "The resistance concept applied to deformations of soils", *Proceedings*, VII Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, México, vol.1, pp. 191-196.
- JANBU, N., TOKHEIM, O. e SENNESET, K., (1981), "Consolidation Tests with continuous loading", *Proceedings*, X Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Estocolmo, vol.1, pp. 645-654.

- KRYNINE, D. (1941), *Soil Mechanics—Its Principles and Structural Applications*, McGrawHill Company Inc., New York.
- LADD, G.C. e LAMBE, T.W., (1963), "The Strength of Undisturbed Clay determined from undrained tests", *ASTM STP 892*, American Society for Testing and Materials, pp., 342–371.
- LADD, G.C., FOOT, R., ISHIHARA, K., SCHLOSSER, F. e POULOS, H.G. M, (1977), "Stress–deformation and strength characteristics", *Proceedings, IX Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Tóquio*, vol.1, pp. 421–494.
- LAMBE, T.W. (1951), *Soil Testing for Engineers*, John Wiley & Sons, New York.
- LARSSON, R. e SÄLLFORS, G., (1986), "Automatic Continuous Consolidation Testing in Sweden", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892*, R.N.Yong and Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.299–328.
- LEE, K. (1977), "Consolidation with imperfectly permeable drainage boundary", *Report n.º OUEL 1349/81*, University of Oxford.
- LEE, K. (1981), "Consolidation with constant rate of strain", *Géotechnique*, vol.31, n.º 2, pp.215–229.
- LEONARDS, G.A. e RAMIAH, B.K., (1959), "Time effects in the consolidation of clays", *ASTM STP 254*, Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing, American Society for Testing and Materials, pp.116–130.
- LEONARDS, G.A. e GIRAULT, P. (1961), "A Study of the One–Dimensional Consolidation Test", *Proceedings, V Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Paris*, vol.1, pp. 213–218.
- LEONARDS, G.A. (1962), "Engineering properties of soils", *Foundation Engineering*, McGraw–Hill, New York, cap.2.

- LEONARDS, G.A. e ALTSCHAEFFL, A.G., (1964), "Compressibility of clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.90, n° SM5, pp. 163-185.
- LEROUEIL, S., KABBAJ, M., TAVENAS, F. e BOUCHARD, R., (1985), "Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays", *Géotechnique*, vol.35, n° 2, pp. 159-180.
- LEROUEIL, S., SAMSON, L. e BOZOZUK, M., (1983), "Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at Gloucester", *Canadian Geotechnical Journal*, vol.20, n° 3, pp.477-490.
- LEROUEIL, S., KABBAJ, M. e TAVENAS, F., (1985), "Study of the validity of a $\sigma_v - \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v$ model in situ conditions", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 28, n°3, September pp.13-25.
- LIRA, E.N.S. (1988), "Sistema automático de aquisição de dados para ensaio triaxial", *tese M.Sc.*, COPPE-UFRJ.
- LOWE III, J., JONAS E. e OBRICIAN, V., (1974), "Controlled Gradient consolidation Test", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.95, n° SM1, jan., pp. 77-97.
- MARSAL, R.J., SANDOVAL, R. e HIRIART, F. (1950), "Curvas deformacion-tiempo en las arcillas del valle de Mexico", *Ingenieria Civil*, Colegio de ingenieros civiles de Mexico, ano II, n° V, VII-17.
- MARTINS, I.S.M. (1983), "Sobre uma nova relação índice de vazios—tensão efetiva em solos", *tese M.Sc.*, COPPE-UFRJ.
- MESRI, G. e CHOI, Y.K., (1985), "The uniqueness of the end-of-primary(EOP) void ratio-effective stress relationship", *Proceedings*, XI Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, San Francisco, vol.2, pp.587-590.

- MIKASA, M., (1965), "The consolidation of soft clay—a new consolidation theory and its application", *Civil Engineering in Japan*, Japan Society of Civil Engineers, pp.21–26.
- MORETTO, O., (1948), "Effect of Natural Hardening on the Unconfined Compressive Strength of Remoulded Clays", *Proceedings*, II Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering, Roterdã, vol.1, pág.137.
- NEWLAND, P.L. e ALLELY, B.H., (1960), "A Study of Consolidation Characteristics of a Clay", *Géotechnique*, vol.10, n° 2, pp.62–74.
- OLSON, R.E., (1986), "State of the Art: Consolidation Testing", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, R.N.Yong and Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.7–70
- ORTENBLAD, A. (1926), "Mathematical theory of the process of consolidation of mud deposits", *tese para obtenção do grau de doutor em ciências*, M.I.T. Posteriormente, publicada em 1956 com o título de "Teoria sobre pressões internas e processos de consolidação de depósitos sedimentários", Rio de Janeiro.
- ORTIGÃO, J.A. e LACERDA, W. (1979), "Propriedades geotécnicas da argila cinza do Rio de Janeiro", *Relatório*, Instituto de Pesquisas Rodoviárias, D.N.E.R., Ministério dos Transportes, abril, 227 p.
- PAIVA, E.N., LIRA, E.N.S., PIMENTA, J.C.S. e OLIVEIRA, E.B., (1988), "Automação em Geotecnia—a experiência do laboratório de Geotecnia da COPPE–UFRJ", *Anais*, Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e de laboratório em Geotecnia, Rio de Janeiro, vol.2, pp.391–401.
- PARRY, R.H.G. (1960), "A small oedometer for field use", *Proc.*, Third Australia–New Zealand Conf.on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.23–24.

- PARRY, R.H.G. (1963), "Testing Small Undisturbed Samples", *Proceedings, 4th Australia-New Zealand Conf.on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.61-68.
- PARRY, R.H.G. (1966), "Classification test for shrinking and swelling soils", *Civil Engineering & P.W.R.*, June, pp.719-721.
- PARRY, R.H.G. (1977), "A new dimension in soil testing", *Ground Engineering*, May.
- PECK, R.B. (1981), "Where has all the judgement gone ?", *Publication 134*, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, pp.1-5.
- SÄLLFORS, G. (1975), "Preconsolidation Pressure of Soft, High-Plastic Clays", *PhD.Thesis*, Chalmers University of Technoly, Göteborg, Suécia.
- SANDBAEKKEN, G., BERRE, T. e LACASSE, S., (1986), "Oedometer testing at the Norwegian Geotechnical Institute", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892*, R.N.Yong and Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.329-353.
- SCHIFFMAN, R.L., CHEN, A.T.F. e GORDAN, J.C., (1969), "An analysis of consolidation theories", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol.95, n° SM1, jan., pp.285-309.
- SCHIFFMAN, R.L. (1987), *Short course on the consolidation of soft clays*, PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- SCHMERTMANN, J.H., (1955), "The undisturbed consolidation behavior of clays", *Transactions, ASCE*, n° 120, pp.1201-1227. Reprinted in "Award—Winning ASCE papers in Geotechnical Engineering", ASCE, pp.171-197, New York.

- SILLS, G.C. e BAKER, N., (1986), "An experimental assessment of the restricted flow consolidation test", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892*, R.N.Yong and Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.203-216.
- SILVESTRI, V., YONG, R.N., SOULIÉ, M. e GABRIEL, F., (1986), "Controlled Gradient and Standard Consolidation Testing of sensitive clays", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892*, R.N.Yong and Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.433-450
- SMITH, R.E. e WAHLS, H.E., (1969), "Consolidation under constant rates of strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, vol.95, n° SM2, pp.519-539.
- TAVENAS, F., BRUCY, M., MAGNAN, J.P., LA ROCHELLE, P. e ROY, M., (1979), "Analyse critique de la théorie de consolidation unidimensionnelle de Terzaghi", *Revue Française de Géotechnique*, n° 7, pp.29-43.
- TAYLOR, D.W. (1942), "Research on consolidation of clays", *Pub.Massachussets Inst.Technol.Dept.Civ.Sanit.Eng.*, Serial n° 82, 147pp.
- TAYLOR, D.W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.
- TELFORD, T. (1830), "Inland Navigation", *Edinburgh Encyclopedia*, pp. 209-315. Em SCHIFFMAN (1987).
- TERZAGHI, K. e FRÖHLICH, O.K., (1936), *Theorie der setzung von tonschichten*, Franz Deuticke, Leipzig.
- TERZAGHI, K. (1941), "Undisturbed Clay Samples and Undisturbed Clays", *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, vol.XXVIII, July, n° 3. Republicado in *Contributions to Soil Mechanics 1941-1953*, Boston Society of Civil Engineers, Boston, pp.45-65.
- TERZAGHI, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley, New York.

- UMEHARA, Y. e ZEN, K., (1982), "Consolidation characteristics of dredged marine bottom sediments with high water content", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 22, nº2, pp.40-54.
- VIEIRA, L.O.M. (1988), "Contribuição ao estudo do adensamento secundário", *tese M.Sc.*, COPPE-UFRJ.
- WAHLS, H.E. e DeGODOY, N.S., (1965), "Interpretation of consolidation test—discussion", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.91, nº SM3, pp.147-152.
- WISSA, E.Z., CHRISTIAN, J.T., DAVIS, E.H. e HEIBERG, S., (1971), "Consolidation at constant rate of strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.97, nº SM10, pp. 1393-1413.
- WISSA, E.Z., CHRISTIAN, J.T., DAVIS, E.H. e HEIBERG, S., (1973), "Closure of Consolidation at constant rate of strain", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol.99, nº SM7, July, pp. 561-563.
- ZNIDARCIC, D., GROCE, P., PANE, V., KO, K.Y., OLSEN, H.W. e SCHIFFMAN, R.L., (1984), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: III. Existing testing procedures and analyses", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, vol.7, nº 3, pp.123-133.
- ZNIDARCIC, D., SCHIFFMAN, R.L., PANE, V., GROCE, P., KO, K.Y. e OLSEN, H.W., (1986), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays: part V. Constant rate of deformation testing and analysis", *Géotechnique*, vol.36, nº 2, pp.227-237.

APÊNDICE A.1.

A.1.1—DEMONSTRAÇÃO DA EQUAÇÃO (IV.4).

Nesta seção do trabalho demonstrar-se-á de forma pormenorizada a equação (IV.4). Conforme será visto, as etapas para se alcançar o resultado final diferem do exposto por WISSA et alii (1971), razão por que se resolveu mostrá-las minuciosamente.

Para facilitar a dedução, dividiu-se o trabalho em duas fases, como segue:

REGIME PERMANENTE.

$$c_v \frac{\partial^2 \epsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t}$$

no caso, $\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \text{cte} = r = \dot{\epsilon}_v$ e

$r = \frac{1}{H} \frac{d\delta}{dt}$, sendo δ o deslocamento vertical.

$X = \frac{z}{H}$ $dX = \frac{1}{H} dz$ e $\epsilon_v = - \frac{\partial V}{\partial X}$, sendo $V = \frac{\delta}{H}$.

$$c_v \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left[- \frac{\partial V}{\partial X} \right] = r$$

sendo $r = \dot{\epsilon}_v =$ taxa de deformação específica relacionada ao tempo.

$$-c_v \frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = r \quad \text{ou} \quad \frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = - \frac{r H^2}{c_v} = \text{constante.}$$

Condições de contorno.

$$X = 0 \quad , \quad \forall T_v, \quad V = rt = \frac{r T_v H^2}{c_v} \quad (1)$$

$$X = 1 \quad , \quad \forall T_v, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = 0 \quad (2)$$

$$X = 1 \quad , \quad \forall T_v, \quad V = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = - \frac{r H^2 X}{c_v} + F_1(T_v)$$

$$\frac{\partial V}{\partial X} = -\frac{r H^2 X^2}{2 c_v} + F_1(T_v) X + F_2(T_v)$$

$$V = -\frac{r H^2 X^3}{6 c_v} + \frac{F_1(T_v) X^2}{2} + F_2(T_v) X + F_3(T_v)$$

Da condição de contorno (1), pode-se escrever:

$$F_3(T_v) = \frac{r T_v H^2}{c_v}$$

Da condição de contorno (2), tem-se que:

$$-\frac{r H^2}{c_v} + F_1(T_v) = 0 \quad \Rightarrow \quad F_1(T_v) = \frac{r H^2}{c_v}$$

Da condição de contorno (3), escreve-se que:

$$-\frac{r H^2}{6 c_v} + \frac{r H^2}{2 c_v} + F_2(T_v) + \frac{r H^2 T_v}{c_v} = 0$$

$$F_2(T_v) = \frac{r H^2}{6 c_v} - \frac{r H^2}{2 c_v} - \frac{r T_v H^2}{c_v} = -\frac{r H^2}{3 c_v} - \frac{r T_v H^2}{c_v}$$

Substituindo os valores de $F_1(T_v)$, $F_2(T_v)$ e $F_3(T_v)$ na expressão de V , tem-se:

$$V(X, T_v) = -\frac{r H^2 X^3}{6 c_v} + \frac{r H^2 X^2}{2 c_v} - \frac{r H^2 X}{3 c_v} - \frac{r T_v H^2 X}{c_v} + \frac{r T_v H^2}{c_v}$$

Como $\epsilon_v = -\frac{\partial V}{\partial X}$, tem-se que:

$$\epsilon_v(X, T_v) = \frac{3r H^2 X^2}{6 c_v} - \frac{2r H^2 X}{2 c_v} + \frac{r H^2}{3 c_v} + \frac{r T_v H^2}{c_v}$$

$$\epsilon_v(X, T_v) = \frac{r H^2}{c_v} \left[T_v + \frac{1}{6} [3X^2 - 6X + 2] \right] \quad (\text{A.1.1})$$

SOLUÇÃO PARA A FASE TRANSIENTE.

$$\frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v}$$

É fácil verificar que a solução encontrada para o regime permanente satisfaz à equação acima, tal como segue:

$$\begin{cases} \frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = -\frac{rH^2}{c_v} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v} = -\frac{rH^2}{c_v} \end{cases}$$

Resolvendo por separação de variáveis, tem-se que:

$$V = F(X) G(T_v)$$

$$F'''(X) G(T_v) = F'(X) G'(T_v)$$

$$\frac{F'''(X)}{F'(X)} = \frac{G'(T_v)}{G(T_v)} = -A^2$$

$$G'(T_v) = -A^2 G(T_v) \quad \Rightarrow \quad G(T_v) = C_1 e^{-A^2 T_v}$$

$$\frac{F'''(X)}{F'(X)} = -A^2 \quad \Rightarrow \quad F'''(X) + A^2 F'(X) = 0$$

A equação característica pode ser assim escrita:

$$m^3 + A^2 m = 0$$

As raízes são:

$$m = 0, m = \pm Ai$$

A solução é da forma:

$$V_t(X, T_v) = (C_2 + C_3 \operatorname{sen} AX + C_4 \operatorname{cos} AX) e^{-A^2 T_v} \quad (\text{A.1.2})$$

CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA A FASE TRANSIENTE.

É preciso lembrar que a solução global é a soma das soluções para os regimes permanente e transiente, ou seja, $V = V_p + V_t$.

$$X = 1, \forall T_v, V(1, T_v) = 0, V_p(1, T_v) = 0 \Rightarrow V_t(1, T_v) = 0 \quad (a)$$

$$X = 0, \forall T_v, V(0, T_v) = \frac{rT_v H^2}{c_v}, V_p = \frac{rT_v H^2}{c_v} \Rightarrow V_t(0, T_v) = 0 \quad (b)$$

$$X = 1, \forall T_v, \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = 0. \text{ Como } \frac{\partial^2 V_p}{\partial X^2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 V_t}{\partial X^2} = 0 \quad (c)$$

$$\begin{aligned} T_v = 0, \forall X, V(X, 0) = 0 &\Rightarrow V_t(X, 0) = -V_p(X, 0) \Rightarrow \\ \Rightarrow V_t(X, 0) = \frac{rH^2}{c_v} \frac{1}{6} (X^3 - 3X^2 + 2X) &\quad (d) \end{aligned}$$

Considerando que $V_t(X, T_v) = F(X) G(T_v)$ e o que estabelece a condição de contorno (b), tem-se:

$$V_t(0, T_v) = 0 \Rightarrow F(0) G(T_v) = 0 \Rightarrow F(0) = 0$$

Levando esse valor na equação (A.1.2), tem-se:

$$C_2 + C_4 = 0 \quad (I)$$

Da condição de contorno (a), pode-se escrever que:

$$V_t(1, T_v) = 0 \Rightarrow F(1) = 0 \Rightarrow \text{na equação (A.1.2)}$$

$$\Rightarrow C_2 + C_3 \operatorname{sen} A + C_4 \operatorname{cos} A = 0 \quad (II)$$

Da condição de contorno (c), pode-se escrever que:

$$V''_t(1, T_v) = 0 \Rightarrow \text{na equação (A.1.2)}$$

$$\Rightarrow -C_3 A^2 \operatorname{sen} A - C_4 A^2 \operatorname{cos} A = 0$$

$$C_3 \operatorname{sen} A + C_4 \operatorname{cos} A = 0 \quad (III)$$

Resolvendo o sistema formado por (I), (II) e (III), tem-se:

$$C_2 = 0 \quad \text{e} \quad C_4 = 0.$$

De (II), vem:

$$C_3 \operatorname{sen} A = 0 \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} A = n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \\ C_3 = 0 \end{array} \right.$$

$$F(X) = \sum_{m=1}^{\infty} C_m \operatorname{sen} n\pi X$$

A solução para $T_v = 0$ é forçosamente em série de Fourier com os termos em seno no intervalo $[0, 1]$. Esta representa uma função ímpar (a menos da constante $\frac{r}{6} \frac{H^2}{c_v}$) que pode ser assim expressa:

$$F(X) = \left\{ \begin{array}{ll} X^3 - 3X^2 + 2X & \text{para } 0 \leq X \leq 1 \\ -|X|^3 + 3|X|^2 - 2|X| & \text{para } -1 \leq X \leq 0 \end{array} \right.$$

Se $X \leq 0 \quad \Rightarrow \quad |X| = -X$, então:

$$F(X) = \left\{ \begin{array}{ll} X^3 - 3X^2 + 2X & \text{para } 0 \leq X \leq 1 \\ X^3 + 3X^2 + 2X & \text{para } -1 \leq X \leq 0 \end{array} \right.$$

Assim sendo, o coeficiente C_m da série de Fourier será:

$$\begin{aligned} C_m &= \int_{-1}^1 F(X) \operatorname{sen} n\pi X \, dX = \\ &= \int_{-1}^0 (X^3 + 3X^2 + 2X) \operatorname{sen} n\pi X \, dX + \int_0^1 (X^3 - 3X^2 + 2X) \operatorname{sen} n\pi X \, dX \\ &= 2 \int_0^1 X^3 \operatorname{sen} n\pi X \, dX + \int_{-1}^0 3X^2 \operatorname{sen} n\pi X \, dX + \\ &+ \int_0^1 -3X^2 \operatorname{sen} n\pi X \, dX + 2 \int_0^1 2X \operatorname{sen} n\pi X \, dX \end{aligned}$$

Desenvolvendo estas integrais, tem-se:

$$\begin{aligned}
 2 \int_0^1 X^3 \operatorname{sen} n\pi X \, dX &= 2 \left[-X^3 \frac{\cos n\pi X}{n\pi} + \frac{3}{n\pi} \int_0^1 X^2 \cos n\pi X \, dX \right] = \\
 &= -2 \frac{\cos n\pi}{n\pi} + \frac{6}{n\pi} \left[X^2 \frac{\operatorname{sen} n\pi X}{n\pi} - \frac{2}{n\pi} \int_0^1 X \operatorname{sen} n\pi X \, dX \right] = \\
 &= -2 \frac{\cos n\pi}{n\pi} - \frac{12}{n^2 \pi^2} \int_0^1 X \operatorname{sen} n\pi X \, dX = -2 \frac{\cos n\pi}{n\pi} - \\
 &- \frac{12}{n^2 \pi^2} \left[\frac{1}{n\pi} \left[-X \cos n\pi X + \frac{\operatorname{sen} n\pi X}{n\pi} \right] \right] = \\
 &= \boxed{-\frac{2 \cos n\pi}{n\pi} + \frac{12}{n^3 \pi^3} \cos n\pi}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3 \int_{-1}^0 X^2 \operatorname{sen} n\pi X \, dX &= 3 \left[-X^2 \frac{\cos n\pi X}{n\pi} + \frac{2}{n\pi} \int_{-1}^0 X \cos n\pi X \, dX \right] = \\
 &3 \frac{\cos(-n\pi)}{n\pi} + \frac{6}{n\pi} \left[\frac{1}{n\pi} \left[X \operatorname{sen} n\pi X + \frac{\cos n\pi X}{n\pi} \right] \right] \Big|_{-1}^0 \\
 &= \boxed{3 \frac{\cos n\pi}{n\pi} + \frac{6}{n^3 \pi^3} [1 - \cos n\pi]}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -3 \int_0^1 X^2 \operatorname{sen} n\pi X \, dX &= -3 \left[-X^2 \frac{\cos n\pi X}{n\pi} + \frac{2}{n\pi} \int_0^1 X \cos n\pi X \, dX \right] = \\
 &3 \frac{\cos n\pi}{n\pi} - \frac{6}{n\pi} \left[\frac{1}{n\pi} \left[X \operatorname{sen} n\pi X + \frac{\cos n\pi X}{n\pi} \right] \right] \Big|_0^1
 \end{aligned}$$

$$4 \int_0^1 X \operatorname{sen} n\pi X \, dX = \frac{4}{n\pi} \left[-X \cos n\pi X + \frac{\operatorname{sen} n\pi X}{n\pi} \right] \Big|_0^1$$

$$= \boxed{-4 \frac{\cos n\pi}{n\pi}}$$

Finalmente, pode-se escrever o valor de C_m como sendo igual a:

$$C_m = -\frac{2 \cos n\pi}{n\pi} + \frac{12}{n^3\pi^3} \cos n\pi + \frac{3 \cos n\pi}{n\pi} + \frac{6}{n^3\pi^3} [1 - \cos n\pi]$$

$$+ \frac{3 \cos n\pi}{n\pi} - \frac{6}{n^3\pi^3} [\cos n\pi - 1] - \frac{4 \cos n\pi}{n\pi} =$$

$$= \frac{12}{n^3\pi^3} \cos n\pi + \frac{12}{n^3\pi^3} [1 - \cos n\pi]$$

$$\text{se } n \text{ for ímpar} \quad C_m = -\frac{12}{n^3\pi^3} + \frac{24}{n^3\pi^3} = \frac{12}{n^3\pi^3}$$

$$\text{se } n \text{ for par} \quad C_m = \frac{12}{n^3\pi^3} + 0 = \frac{12}{n^3\pi^3}$$

Assim sendo, a série de Fourier que representa $F(X)$ pode ser escrita:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{12}{n^3\pi^3} \operatorname{sen} n\pi X$$

A solução dos deslocamentos no regime transiente será:

$$V_t = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r H^2}{6c_v} C_m \operatorname{sen} n\pi X e^{-n^2\pi^2 T_v} =$$

$$= \frac{2 r H^2}{\pi^3 c_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\operatorname{sen} n\pi X}{n^3} e^{-n^2\pi^2 T_v}$$

A solução global em termos de deslocamento é:

$$V(X, T_v) = -\frac{r H^2}{c_v} \left[\frac{X^3}{6} - \frac{X^2}{2} + \frac{X}{3} + T_v X - T_v - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sen } n\pi X}{n^3} e^{-n^2 \pi^2 T_v} \right]$$

A solução em termos de deformação específica vertical é:

Como $\epsilon_v(X, T_v) = -\frac{\partial V}{\partial X}$, tem-se que:

$$\epsilon_v(X, T_v) = \frac{r H^2}{c_v} \left[T_v + \frac{1}{6} [3X^2 - 6X + 2] - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi X}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 T_v} \right]$$

A.1.2- ERRO RELATIVO NO CÔMPUTO DE ϵ_v .

O erro relativo (e_{rr}) que se comete quando não se considera a fase transiente no cálculo da deformação específica vertical é dado pela seguinte expressão:

$$e_{rr} = \frac{-\frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi X}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 T_v}}{T_v + \frac{1}{6} [3X^2 - 6X + 2] - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi X}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 T_v}}$$

Na figura (A.1.1) apresenta-se uma curva $e_{rr}-(z/H)$ para diversos valores de T_v .

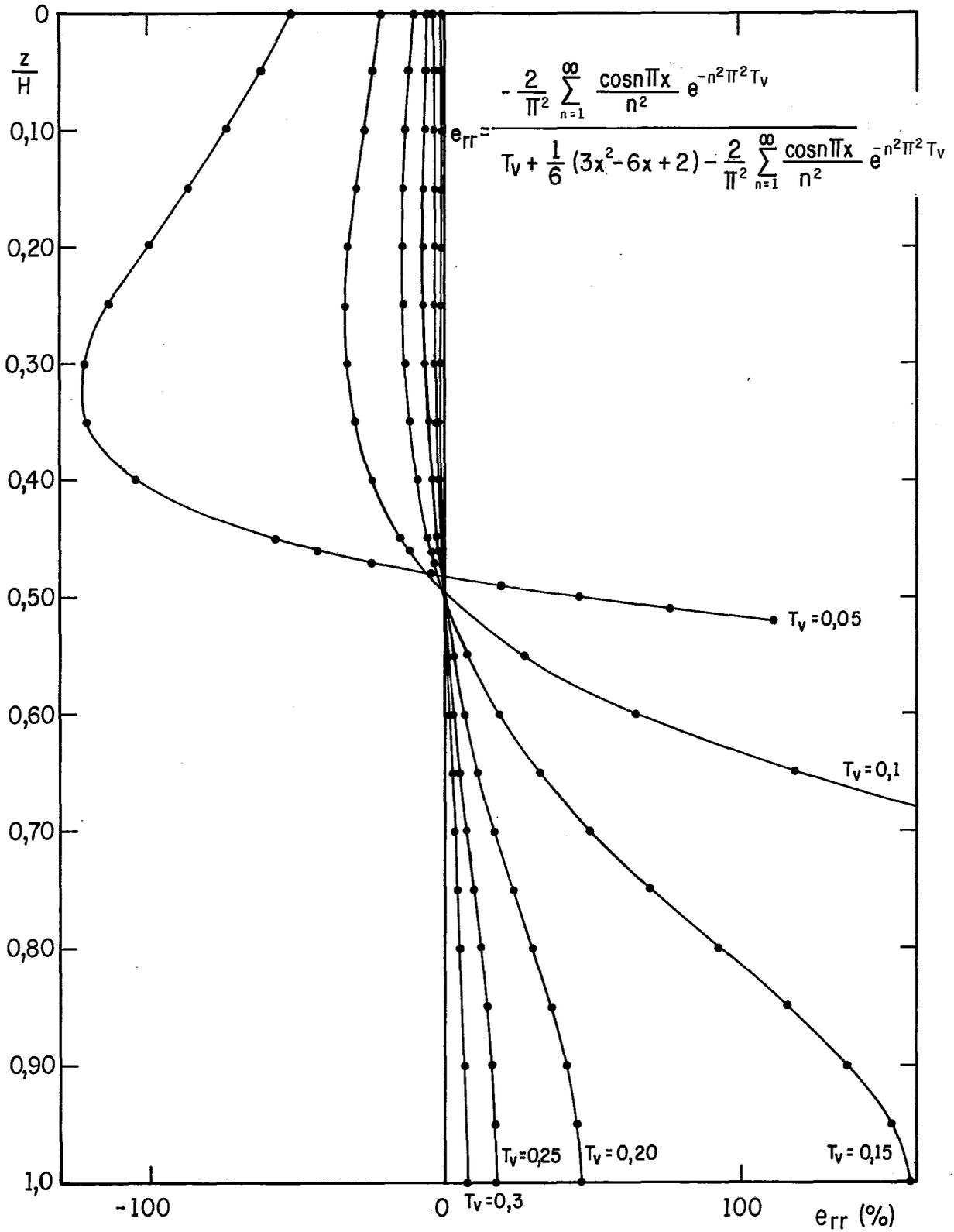


FIG. A.1.1 - Erro relativo no cálculo de ϵ_y quando não se considera a fase transiente.

APÊNDICE A.2.

Serão dados a conhecer nesta seção os programas CRSC e PROCS utilizados, respectivamente, para aquisição e processamento automático de dados do ensaio de adensamento com taxa constante de deformação específica relacionada ao tempo.

A.2.1—PROGRAMA "PROCS".

```

/*****
/*
/*      PROCS.C      */
/*
*****/

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <wfd.h>
#define    F_FLOAT
#include <wfd_glob.h>
#include <macros.h>
#include <wfd_add.h>

/*
_____*
/*      Constantes
_____*

#define    FNAMEL12 /* Tamanho do nome de uma arq.      */
#define NPOINTS    6 /* Número de pontos (+ 1) para o*/
/* cálculo do valor médio      */

/*
_____*
/*      Macros
_____*

#define    DELTA(x) (x.cur - x.old)
#define    AVERAGE(x) ((x.cur + x.old) / 2)

```

```

/*          Tipos          de          variáveis
-----*/
typedef double    SINGLE; /* Variável simples */
typedef struct { /* Variável dupla */
    double old; /* Valor anterior */
    double cur; /* Valor corrente */
} DOUBLE;
typedef double VECTOR [NPOINTS]; /* Variável vetorada */

```

```

/* Contantes fornecidas pelo usuário -----*/
static double e0; /* Índice de vazios inicial */
static double h0; /* Altura inicial do cp */
static double A; /* Área da base do cp */
static double uc; /* Contrapressão */

```

```

/*          Variáveis
-----*/
static VECTOR cv; /* Coeficiente de adensamento */
static VECTOR cvn; /* Cv (teoria não-linear) */
static VECTOR d; /* Módulo edométrico */
static SINGLE dh; /* Deslocamento total */
static VECTOR dn; /* D (teoria não-linear) */
static SINGLE dv; /* Variação de volume */
static DOUBLE ea; /* Deformação específica vertical */
static SINGLE e; /* Índice de vazios */
static SINGLE ev; /* Deformação específica volumétrica */
static SINGLE fc; /* Força */
static DOUBLE h; /* Altura do cp */
static VECTOR mv; /* Módulo edométrico */
static DOUBLE q; /* Razão ub / tt */
static VECTOR te; /* Tensão efetiva */
static DOUBLE tm; /* Tempo decorrido */
static DOUBLE tt; /* Tensão total */
static SINGLE ub; /* Sobrepressão hidrostática */
static SINGLE v0; /* Volume inicial */
static SINGLE ve; /* Volume específico */
static SINGLE vm; /* Velocidade média */

```

```

/*
                                                                 Arquivos
-----*/
typedef enum {
    GR_E,
    GR_V,
    GR_EA,
    GR_EV,
    GR_UB,
    GR_Q,
    GR_CV,
    GR_CVN,
    GR_D,
    GR_DN,
    GR_MV,
    GR_VM,
    NGRAPHS
} FILELIST;

static char finp_nm [FNAMEL];/* Nome do arquivo de entrada
*/
static char prefix [5];      /* Prefixo dos arquivos de saída*/
static FILE *finp;          /* Arquivo de entrada      */
static FILE *fout [NGRAPHS];/* Arquivos de saída      */
static int currow;         /* Linha corrente no finp      */

/* Protótipos das funções públicas -----*/
public void main (void);

/* Protótipos das funções privadas -----*/
static void avg_value (VECTOR X, VECTOR Y, double *x, double
*y);
static int chk_form (void);
static void close_files (void);
static DFORM *def_form (void);
static void do_calc (void);
static int end_volume (void);
static int key_proc (void);
static int open_files (void);

```

```

static int read_data (double *tm, double *ub, double *fc,
                    double *dh, double *dv);
static double sqr (double x);
static void write_data (int graph, double x, double y);

```

```

/*_____
____*/
/*      AVG_VALUE      */
/*          */
/* Objetivo: Calcular o ponto médio de uma seqüência de pontos.
*/
/*_____
____*/

```

```

static void avg_value (X, Y, x, y)
VECTOR X;
VECTOR Y;
double *x;
double *y;
{
    auto double sum;
    regist int i;

    *x = (X [1] + X [NPOINTS-1]) / 2;
    sum = 0.0;
    for (i = 2; i < NPOINTS; i++)
        sum += (Y [i] + Y [i-1]) * (X [i] - X [i-1]);
    *y = sum / 2 / (X [NPOINTS-1] - X [1]);
}

```

```

/*_____
____*/
/*      CHK_FORM      */
/*          */
/* Objetivo: Verifica se o formulário foi preenchido corretamen-*/
/*      te.          */
/*_____
____*/

```

```

static int chk_form ()
{
    regist int status = FALSE;

    if (! *fnp_nm)
        message (" Falta o nome do arquivo de entrada!");
    else
        if (! *prefix)
            message (" Falta o prefixo!");
        else
            status = TRUE;

    return (status);
}

```

```

/* _____
____*/
/*      CLOSE_FILES      */
/*          */
/* Objetivo: Fecha todos os arquivos.          */
/* _____
____*/

```

```

static void close_files ()
{
    regist int fn;

    fclose (fnp);
    for (fn = 0; fn < NGRAPHS; fn++)
        fclose (fout [fn]);
}

```

```

/* _____
____*/
/*      DEF_FORM      */
/*          */

```

```
/* Objetivo: Define o formulário de entrada.          */
```

```
*/
```

```
/*  
-----*/
```

```
static DFORM *def_form ()
{
    regist DFIELD *fldp;

    sfm_opt (AUTOEXIT + VERIFYEXIT, OFF, STDFMP);
    mod_wn (0, 0, RW_QSCRN - 1, CO_QMAX, STDWNP);
    sw_att (LFIELDI2, STDWNP);
    sw_border (BDR_VLNP, STDWNP);
    sw_bdratt (LYELLOW, STDWNP);

    ftxt_def (2, 2, "Valores iniciais", LFIELDI2, STDFMP);
    ftxt_def (3, 2, def_pic ('D', CO_QMAX - 6), LFIELDI2, STDFMP);
    fldp = fld_def (5, 2, "Altura do CP", 22, "#####@###", F_FLOAT,
        (char *) &h0, STDFMP);
    sf_endfp (end_volume, fldp);
    ftxt_def (5, 32, "(cm)", LFIELDI2, STDFMP);
    fldp = fld_def (6, 2, "Área da base do CP", 22, "#####@###",
F_FLOAT,
        (char *) &A, STDFMP);
    sf_endfp (end_volume, fldp);
    ftxt_def (6, 32, "(cm}")", LFIELDI2, STDFMP);
    fldp = fld_def (7, 2, "Volume do CP", 22, "#####@###", F_FLOAT,
        (char *) &v0, STDFMP);
    sf_opt (SKIP, ON, fldp);
    ftxt_def (7, 32, "(cm^3)", LFIELDI2, STDFMP);
    fldp = fld_def (8, 2, "Índice de vazios", 22, "###@#####", F_FLOAT,
        (char *) &e0, STDFMP);
    fldp = fld_def (9, 2, "Contrapressão", 22, "#####@###", F_FLOAT,
        (char *) &uc, STDFMP);
    ftxt_def (9, 32, "(kPa)", LFIELDI2, STDFMP);

    ftxt_def (12, 2, "Nomes dos arquivos", LFIELDI2, STDFMP);
    ftxt_def (13, 2, def_pic ('D', CO_QMAX - 6), LFIELDI2, STDFMP);
```

```

fldp = fld_def (15, 2, "Arquivo de entrada", 22, def_pic (!, FNAMEL),
F_STRING,
  finp_nm, STDFMP);
fldp = fld_def (16, 2, "Prefixo de saída", 22, def_pic (!, 5), F_STRING,
  prefix, STDFMP);

fldp = fld_def (18, 2, "Linha corrente", 22, "9999", F_INT,
  (char *) &currow, STDFMP);
sf_opt (SKIP, ON, fldp);

sfm_atts (LFIELDI2, LFIELDA2, STDFMP);

return (STDFMP);
}

/*_____
____*/
/*      DO_CALC      */
/*      */
/* Objetivo: Fazer todos os cálculos.      */
/*_____
____*/

static void do_calc ()
{
  regist int index = 0;
  auto int currow;

  for (currow = 1; read_data (&tm.cur, &ub, &fc, &dh, &dv); currow++) {
    dh *= 1E-3; /* Converte dh [mm] -> [m]      */
    dv *= 1E-6; /* Converte dv [cm3] -> [m3]      */

    fld_upd ((char *) &currow, fldnum_max (STDFMP), STDFMP);
    e      = e0 - dh * (1 + e0) / h0;
    ve     = 1 + e;
    h.cur  = h0 - dh;
    ea.cur = dh / h0 * 100;
    ev     = dv / v0 * 100;
  }
}

```

```

tt.cur = fc / A;
q.cur = ub / tt.cur;
te [index] = tt.cur - 2.0 / 3.0 * (ub - uc);
if (index && te [index] < te [index-1])
    continue; /* Vá para a próxima iteração */
write_data (GR_E, te [index], e);
write_data (GR_V, te [index], ve);
write_data (GR_EA, te [index], ea.cur);
write_data (GR_EV, te [index], ev);
if (ub >= 0.0)
    write_data (GR_UB, te [index], ub);
write_data (GR_Q, te [index], q.cur);
if (currow > 1) {
    vm = dh / tm.cur;
    write_data (GR_VM, tm.cur / 60, vm * (1E3 * 60));

    cv [index] = DELTA (tt) / DELTA (tm) * sqr (AVERAGE (h)) / (2 *
ub);
    cvn [index] = - sqr (AVERAGE (h)) * log (tt.cur / tt.old) /
        (2 * DELTA (tm) * log (1 - AVERAGE (q)));
    d [index] = (te [index] - te [index-1]) / DELTA (ea) * 100;
    dn [index] = - h0 * (te [index] + te [index-1]) / 2 * log (tt.cur /
tt.old) / DELTA (h);
    mv [index] = 1 / d [index];
}
if (++index == NPOINTS) {
    if (te [NPOINTS-1] > te [1]) {
        auto double x, y;

        avg_value (te, cv, &x, &y);
        if (y > 0.0)
            write_data (GR_CV, x, y * 1E8);

        avg_value (te, cvn, &x, &y);
        if (y > 0.0)
            write_data (GR_CVN, x, y * 1E8);

        avg_value (te, d, &x, &y);

```

```

    if (y > 0.0)
        write_data (GR_D, x, y);

    avg_value (te, dn, &x, &y);
    if (y > 0.0)
        write_data (GR_DN, x, y);

    avg_value (te, mv, &x, &y);
    if (y > 0.0)
        write_data (GR_MV, x, y);
}
te [1] = te [NPOINTS-1];
cv [1] = cv [NPOINTS-1];
cvn [1] = cvn [NPOINTS-1];
d [1] = d [NPOINTS-1];
dn [1] = dn [NPOINTS-1];
mv [1] = mv [NPOINTS-1];
index = 2;
}
ea.old = ea.cur;
h.old = h.cur;
q.old = q.cur;
tm.old = tm.cur;
tt.old = tt.cur;
}
}

/*_____
____*/
/*      END_VOLUME      */
/*          */
/* Objetivo: Calcula o volume do CP.          */
/*_____
____*/

```

```

static int end_volume ()
{
    if (CURFLDP->fld_flag & FLD_ALTERED) {

```

```

fld_get ((char *) &h0, 0, STDFMP);
fld_get ((char *) &A, 1, STDFMP);
v0 = h0 * A;
fld_upd ((char *) &v0, 2, STDFMP);
}

return (1);
}

/* _____
____*/
/*      KEY_PROC      */
/* _____
____*/

static int key_proc ()
{
  fm_save (STDFMP);
  if (chk_form ()) {
    open_files ();      /* Abre os arquivos _____*/

    /* Faz as conversões de unidades _____*/
    h0 *= 1E-2;  /* cm  -> m  */
    A  *= 1E-4;  /* cm} -> m}  */
    v0 *= 1E-6;  /* cm3 -> m3  */

    do_calc ();
    close_files ();
  }

  return (1);
}

/* _____
____*/

```

```

/*          MAIN          */
/*_____*/
_____*/

public void main ()
{
    init_wfd ();
    keyd_def (-K_F10, key_proc);
    push_info (" Ap's preencher, tecle F10 para iniciar o processamento.");

    fm_proc (0, def_form ());

    pop_info ();
}

/*_____*/
_____*/
/*          OPEN_FILES          */
/*          */
/* Objetivo: Abrir todos os arquivos.          */
/*_____*/
_____*/

static int open_files ()
{
    static char *sufix [NGRAPHS] = {
        "E",
        "V",
        "EA",
        "EV",
        "UB",
        "Q",
        "CV",
        "CVN",
        "D",
        "DN",
        "MV",
    }
}

```

```

    "VM"
};

auto char fname [FNAMEL];
regist int fn;

finp = fopen (finp_nm, "r");
for (fn = 0; fn < NGRAPHS; fn++) {
    sprintf (fname, "%s%s.DAT", prefix, sufix [fn]);
    fout [fn] = fopen (fname, "w");
}

return (1);
}

/*-----*/
/*      READ_DATA      */
/*      */
/* Objetivo: Lê os dados de entrada.      */
/*-----*/
/*-----*/

static int read_data (tm,ub,fc,dh,dv)
double *tm; /* tempo */
double *ub; /* sobrepessao hidrostática */
double *fc; /* força */
double *dh; /* deslocamento */
double *dv; /* var. volume */
{
    return (fscanf (finp, " %lf %lf %lf %lf %lf", tm, ub,fc , dh, dv) == 5);
}

/*-----*/
/*-----*/
/*      SQR      */
/*      */

```

```

/* Objetivo: Calcular o quadrado de um número.          */
/*-----*/

static double  sqr (x)
double  x;
{
  return (x * x);
}

/*-----*/
/*          WRITE_DATA          */
/*          */
/* Objetivo: Grava os dados um arquivo.          */
/*-----*/
/*-----*/

static void  write_data (graph, x, y)
int  graph;
double  x;
double  y;
{
  fprintf (fout [graph], "%lf  %lf\n", x, y);
}

```

A.2.2-PROGRAMA "CRSC".

Uses

Crt,
 Printer,
 TPStrDev,
 Dos,

Gpib,
Timer;

Const

```
InterfaceBus = 0;   { N°;da placa controladora GPIB      }
Device       = 22;  { N° de conversor HP3457A default      }
TransducersQtd= 4;  { N° de transdutores do ensaio        }
WindowsQtd   = 3;   { N° de janelas                      }
```

```
{ Comprimentos de 'strings' _____ }
ChannelLen   = 7;   { 'String' de seleção de canal 'CHAN nn' }
FileNameLen  = 12;  { Nome do arquivo de saída           }
```

Type

```
TransducerRec = record
    Channel : string [ChannelLen]; { 'CHAN n'  }
    R0      : real;   { Leitura inicial    }
    K       : real;   { Cte de calibração    }
    R       : real;   { Leitura corrente     }
    Parm    : real;   { Grandeza física     }
end;
```

```
WindowRec    = record
    xl, yl  : integer;
    xh, yh  : integer;
end;
```

```
FieldType    = (F_STRING, F_INT, F_LONG, F_REAL);
```

Var

```
OutFile      : Text;           { Arquivo de saída     }
OutFileName  : string [FileNameLen]; { Nome do arq. de saída }
TestTimer    : TimerRec;      { Cronômetro do ensaio }
TotalTime    : real;         { Duração do ensaio (hs) }
NReadings    : integer;      { N° de leituras feitas }
```

Const

```
PowerSupply  : TransducerRec = (Channel:'CHAN 7'; R0:0; K:0; R:0);
```

```

Transducers   : array [1..TransducersQtd] of TransducerRec = (
    (Channel:'CHAN 1'; R0:0; K:1.05E-5; R:0),
    (Channel:'CHAN 2'; R0:0; K:7.85E-5; R:0),
    (Channel:'CHAN 3'; R0:0; K:4.64E-4; R:0),
    (Channel:'CHAN 4'; R0:0; K:1.61E-4; R:0)
);
WindowsXY     : array [1..WindowsQtd] of WindowRec = (
    (xl:1; yl:1; xh:80; yh:25),
    (xl:1; yl:8; xh:80; yh:23),
    (xl:1; yl:6; xh:80; yh:25)
);

```

```

procedure Credits;

```

```

begin

```

```

    writeln (' Programa para aquisição de dados');

```

```

    writeln ('           de ensaios tipo CRSC');

```

```

    writeln;

```

```

    writeln (' por Eliézio Batista de Oliveira');

```

```

    writeln;

```

```

end;

```

```

procedure SelectWindow (n : integer);

```

```

begin

```

```

    with WindowsXY [n] do

```

```

        Window (xl, yl, xh, yh);

```

```

end;

```

```

procedure Ask (prompt : string; fldtp : FieldType; var data);

```

```

var

```

```

    FieldStr : string absolute data;

```

```

    FieldInt : integer absolute data;

```

```

    FieldLong : longint absolute data;

```

```

    FieldReal : real absolute data;

```

```

begin

```

```

    write (prompt);

```

```

    case fldtp of

```

```

        F_STRING : readln (FieldStr);

```

```

        F_INT    : readln (FieldInt);

```

```

    F_LONG   : readln (FieldLong);
    F_REAL   : readln (FieldReal);
  end;
end;

procedure InitInterface;
begin
  IB_Sic;
  IB_Cac (0);
  IB_Dma (0);
  IB_Eot (TRUE);
  IB_Eos ($1800);
end;

procedure InitConverter;
begin
  IB_Sre (TRUE);
  IB_Esc2 ('PRESET;TERM REAR');
end;

procedure TermConverter;
begin
  IB_Esc2 ('PRESET');
  IB_Sre (FALSE);
end;

procedure ReadTransducer (var Transducer : TransducerRec);
const
  BufLen = 15;
var
  CvtBuf : string [BufLen];
  code   : integer;

begin
  with Transducer do
    begin
      IB_Esc2 (Channel);
      IB_Ler (CvtBuf [1], BufLen);
    end
  end;
end;

```

```

    CvtBuf[0] := Char (BufLen-1);
    val (CvtBuf, R, code);
    if (code <> 0) then
        R := 1;
    end;
end;

procedure CalcParameters;
var
    tdc : integer;
begin
    for tdc := 1 to TransducersQtd do
        with Transducers [tdc] do
            Parm := (R / PowerSupply.R - R0 / PowerSupply.R0) / K;
        end;
    end;

procedure DefineR0;
var
    reply : char;
    tdc : integer;
begin
    repeat
        ClrScr;
        writeln;
        ReadTransducer (PowerSupply);
        with PowerSupply do
            begin
                R0 := R;
                writeln (' Tensão do fonte de alimentação: ', R:1:3, ' V ('
Channel, ')');
            end;
        writeln;
        writeln (' ':5, ' Transdutor Canal Tensão (mV)');
        writeln;
        for tdc := 1 to TransducersQtd do
            begin
                ReadTransducer (Transducers [tdc]);
            end;
        end;
    end;
end;

```

```

with Transducers [tdc] do
  begin
    RO := R;
    writeln (' :5, tdc:7, Channel:12, R*1000:12:3);
  end;
end;
writeln;
writeln;
write (' Leituras satisfatórias ? (S/N) ');
repeat
  reply := upcase (ReadKey);
until reply in ['S', 'N'];
writeln (reply);
until reply = 'S';
end;

```

```

procedure WaitAMoment;

```

```

begin
  writeln;
  writeln (' Para começar tecle <ENTER>.);
  writeln (' Logo após você terá 13 segundos até o início da aquisição. ');
  write (' ');
  readln;
  Delay (10000);      { Espera 10 segundos      }
  Sound (220);       { Emite a nota LA        }
  Delay (3000);      { Espera 3 segundos      }
  NoSound;           { Inibe o som            }
end;

```

```

procedure WriteHeader;

```

```

var
  tdc : integer;
begin
  ClrScr;
  writeln (' Tempo      Sobrepressão      Força      Deslocamento
Volume');
  writeln ('              (kPa)              (kN)              (mm)
(cm^3)');

```

```

SelectWindow (1);
GotoXY (1, 24);
write (' Canal ');
for tdc := 1 to TransducersQtd do
  write (Transducers [tdc].Channel:13);
writeln;
write (' Tensão');
SelectWindow (2);
ClrScr;

  writeln (lst, '   Tempo           Sobrepressão           Força
Deslocamento       Volume');
  writeln (lst, '           mV       kPa       mV       kN       mV
mm       mV       cm^3');
end;

procedure WriteData;
var
  tdc : integer;
  tstr : string;
  x, y : integer;

function TimeStr (time : real) : string;
var
  hour, min, sec : integer;

function PadZero (s : string) : string;
var
  index : integer;
begin
  for index := 1 to length (s) do
    if s [index] = ' ' then
      s [index] := '0';
  PadZero := s;
end;

begin
  ToHHMMSS (time, hour, min, sec);

```

```

    write (TpStr, hour:3, ':', min:2, ':', sec:2);
    TimeStr := PadZero (ReturnStr);
end;

begin
    tstr := TimeStr (ElapsedTime (TestTimer));
    write (tstr:9);
    write (lst, tstr:9);
    write (OutFile, ElapsedTime (TestTimer):9:0);
    CalcParameters;
    for tdc := 1 to TransducersQtd do
        with Transducers [tdc] do
            begin
                write (Parm:13:3);
                write (lst, R*1000:9:4, Parm:9:3);
                write (OutFile, Parm:13:7);
            end;
        writeln;
        writeln (lst);
        writeln (OutFile);
        x := WhereX;      { Guarda a coluna (x) atual      }
        y := WhereY;     { Guarda a linha (y) atual       }
        SelectWindow (1);
        GotoXY (10, 25);
        for tdc := 1 to TransducersQtd do
            with Transducers [tdc] do
                write (R*1000:13:4);
                SelectWindow (2);
                GotoXY (x, y);
            end;
        end;

    procedure InitTest;
    begin
        NReadings := 0;
        assign (OutFile, OutFileName);
        rewrite (OutFile);
        WriteHeader;
        InitTimer (TestTimer);
    end;
end;

```

```
end;
```

```
procedure Acquire (tf : real; rn : integer);
```

```
var
```

```
    tdc : integer;
```

```
    delay : real;
```

```
    tm : TimerRec;
```

```
begin
```

```
    delay := (tf - ElapsedTime (TestTimer)) / (rn - NReadings);
```

```
    repeat
```

```
        InitTimer (tm);
```

```
        for tdc := 1 to TransducersQtd do
```

```
            ReadTransducer (Transducers [tdc]);
```

```
            WriteData;
```

```
            inc (NReadings);
```

```
            Wait (tm, delay);
```

```
        until ElapsedTime (TestTimer) >= tf;
```

```
end;
```

```
procedure TermTest;
```

```
begin
```

```
    close (OutFile);
```

```
end;
```

```
begin
```

```
    IB_SetCard (InterfaceBus);    { Selecciona a interface }
```

```
    IB_SetDisp (Device);          { Selecciona o HP3457A }
```

```
    InitInterface;                { Inicia a interface }
```

```
    InitConverter;                { Inicia o conversor }
```

```
    ClrScr;                       { Limpa a tela }
```

```
    Credits;                      { Escreve os créditos }
```

```
    Ask ('Nome do arquivo de saída: ', F_STRING, OutFileName);
```

```
    Ask ('Duração do ensaio (em horas): ', F_REAL, TotalTime);
```

```
    writeln;
```

```
    SelectWindow (3);
```

```
    DefineR0;
```

```
    WaitAMoment;
```

```
    InitTest;
```

```
Acquire (5.0 * SecsInMin, 10);  
Acquire (2.0 * SecsInHour, 100);  
Acquire (TotalTime * SecsInHour, 500);  
TermTest;  
TermConverter;  
end.
```

APÊNDICE A.3.

CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE PRESSÃO.

A foto (A.3.1) ilustra bem os equipamentos de que se valeu para calibrar o transdutor de pressão WF1252, tomando como referência os valores lidos num manômetro de mercúrio.

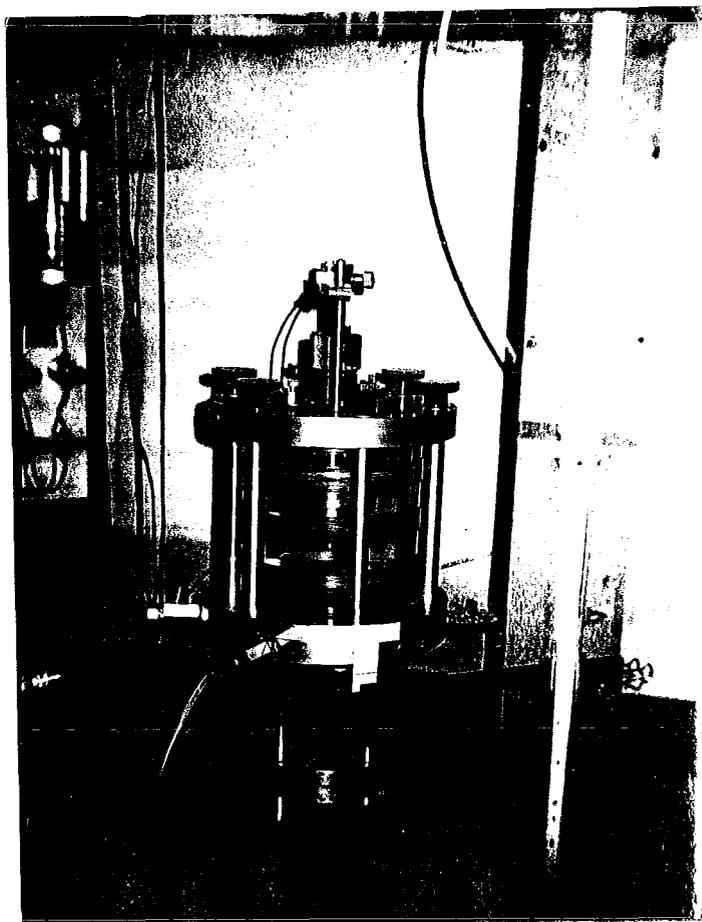


FOTO A.3.1—ASPECTO GERAL DO EQUIPAMENTO DE CALIBRAÇÃO.

Com o auxílio do sistema de potes de mercúrio proposto por BISHOP e HENKEL (1962), podia-se variar lentamente a pressão até 100kPa de tal forma que durante uma calibração se fizessem mais de 50 leituras.

A régua de aço era sempre fixada na posição correspondente ao nível do elemento sensor do aparelho elétrico que se desejava calibrar. Desse modo, a pressão reinante no manômetro de mercúrio igualava-se ao produto do peso específico deste elemento químico pela diferença entre as leituras dos níveis nos ramos direito e esquerdo.

Foram realizadas três calibrações que possibilitaram calcular a constante do transdutor de pressão como sendo igual a $1,05 \times 10^{-2} \text{mV/kPa.V}_{\text{ent}}$. A figura (A.3.1) ilustra um conjunto de resultados obtido segundo o procedimento a que se faz menção neste apêndice.

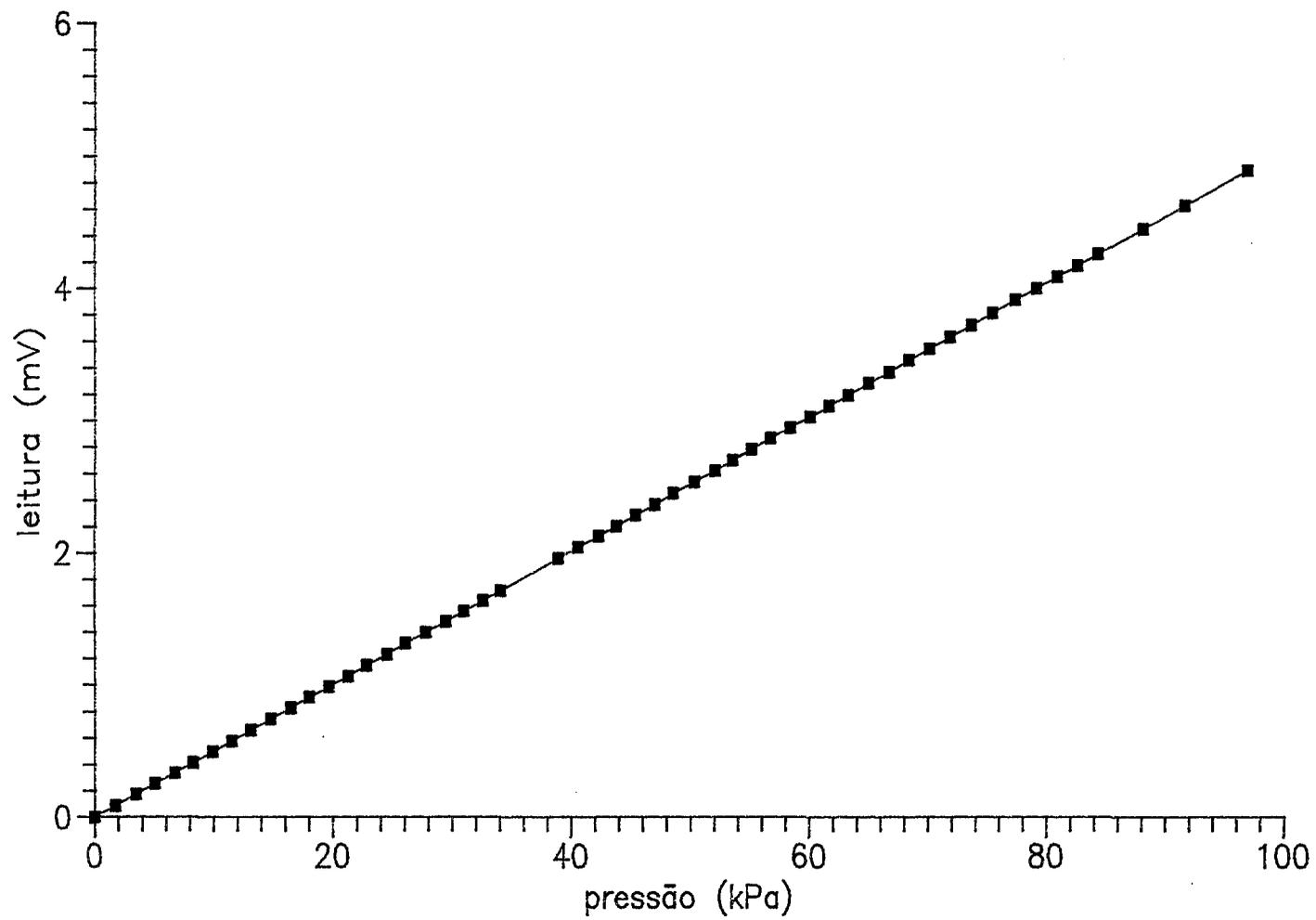


FIG. A.3.1 - Calibração do transdutor de pressão.