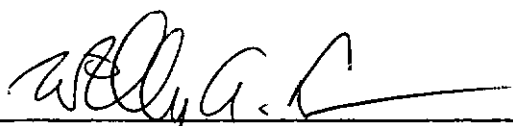


CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO


Luiz Otávio Martins Vieira

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

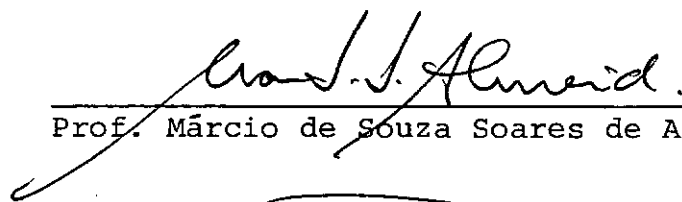
Aprovada por:




Prof. Willy Alvarenga Lacerda
(Presidente)



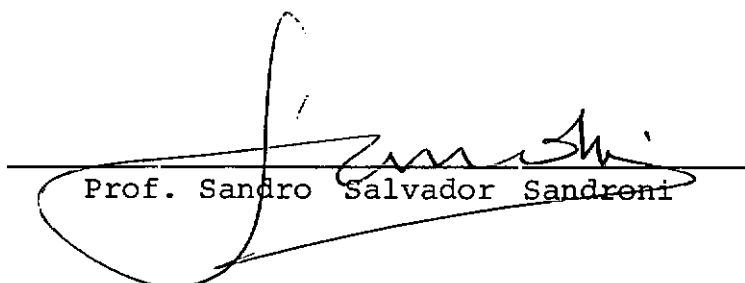
Prof. Ian Schumann Marques Martins



Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida



Prof. Mauro Lucio Guedes Werneck



Prof. Sandro Salvador Sandroni

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 1988

VIEIRA, LUIZ OTÁVIO MARTINS

Contribuição ao Estudo do Adensamento Secundário (Rio de Janeiro) 1988.

xí , 137 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1988)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Compressibilidade 2. Adensamento 3. Reologia
I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

À minha querida Kênnya Kattllen,
aos meus queridos pais e irmãos dedico esta tese.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ian Schumann Marques Martins, um amigo, não só pela sua orientação, mas como também por sua dedicação, organização, capricho e capacidade em tratar com a Mecânica dos Solos, que muito me incentivou em encarar os problemas da Engenharia com mais confiança.

Aos professores da Área de Mecânica dos Solos da PUC/RJ e COPPE/UFRJ que contribuíram de forma efetiva para minha formação.

À Maria José Caetano de Mendonça e Jaciãra Roberta Barbosa pelo cuidado e paciência nos trabalhos de datilografia.

Ao Gilmar Fernandes e Irahay pelos trabalhos de desenho.

À todos os companheiros do Laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE/UFRJ pela convivência.

Ao Gilson Fernandes, amigo e sócio nos negócios, pelo apoio nas horas difíceis.

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

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

LUIZ OTÁVIO MARTINS VIEIRA

Abril de 1988

Orientador: Prof. Willy Alvarenga Lacerda

Programa : Engenharia Civil

Nesta dissertação é feito um estudo das características de compressibilidade dos solos quando submetidos a ensaios oedométricos de longa duração no intuito de se observar o fenômeno da compressão secundária.

Faz-se uma análise crítica de alguns mecanismos propostos para a abordagem da compressão secundária e estuda-se uma nova abordagem que associa a compressão secundária à variação do coeficiente de empuxo no repouso (K_0).

Dá-se, também, uma nova interpretação para o fenômeno da compressão inicial observada nos ensaios oedométricos.

Finalmente, aplica-se a construção de Pacheco Silva modificada por Martins para a determinação da tensão de sobre adensamento e comparam-se os resultados aos obtidos com o método de Casagrande.

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

LUIZ OTÁVIO MARTINS VIEIRA

April, 1988

Chairman : Prof. Willy Alvarenga Lacerda
Department: Civil Engineering

A study of soil compressibility in the oedometer under longterm loading is made in order to observe the phenomenon of secondary compression.

A critical analysis of some proposed approaches to secondary compression was carried out and a new approach that associates secondary compression to the changes in time of the coefficient of lateral earth pressure (K_0) was also studied.

A new interpretation of the immediate compression observed in oedometer tests is given.

Finally, the Pacheco Silva's construction modified by Martins for the determination of the overconsolidation stress was applied to the data and compared with the results obtained by the Casagrande's Construction.

NOTAÇÕES UTILIZADAS

a_v	- Coeficiente de compressibilidade
C_c	- Coeficiente de compressão
C_v	- Coeficiente de adensamento
C_α ou $C_{\alpha\epsilon}$	- Coeficiente de compressão secundária
e	- Índice de vazios
k	- Coeficiente de permeabilidade
K_o	- Coeficiente de empuxo no repouso
K_{on}	- Coeficiente de empuxo no repouso de um solo normalmen te adensado
M	- Módulo de compressibilidade volumétrica
p'	- Tensão octaédrica efetiva
q	- Metade da tensão desviadora
r	- Recalque total por adensamento
r_s	- Recalque por adensamento secundário
t	- Tempo
t_{rc}	- Tempo de remoção do carregamento
t_p	- Tempo correspondente ou final do adensamento primário
T_v	- Fator tempo
U_z	- Grau de adensamento

\bar{U}_z	- Grau de adensamento médio
U_{zp}	- Grau de adensamento primário
U_{zs}	- Grau de adensamento secundário
U_p	- Grau médio de adensamento primário
U_s	- Grau médio de adensamento secundário
u	- Excesso de pressão neutra
z	- Variável espacial
$\Delta\sigma$	- Tensão de pressão
$\sigma_1 - \sigma_2$	- Tensão desviadora
σ'_v	- Tensão vertical efetiva
σ'_{vm}	- Tensão de sobreadensamento
$\sigma'_{vm}(Q)$	- Tensão de "quasi-sobreadensamento" (Leonards e Altschaeffl) ou tensão crítica (Bjerrum)
γ_w	- Peso específico da água
ϵ_v	- Deformação volumétrica específica
ϵ_{vs}	- Deformação volumétrica específica devida ao adensamento secundário
ϵ_{vp}	- Deformação volumétrica específica devida ao adensamento primário
λ	- Constante de proporcionalidade que controla a velocidade de compressão secundária
θ	- Parâmetro que regula o tempo em que a compressão secundária se manifesta

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL	1
I.1 - Introdução	1
I.2 - Objetivo	2
I.3 - Tópicos da Pesquisa	2
CAPÍTULO II - TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL	3
II.1 - Introdução	3
II.2 - Teoria do Adensamento de Terzaghi e Frölich	5
II.3 - Comparação das Curvas Tempo-Recalque Teórica e de Laboratório	11
II.4 - Identificação da Compressão Secundária	18
CAPÍTULO III - ADENSAMENTO SECUNDÁRIO	20
III.1 - Introdução	20
III.2 - Mecanismos da Compressão Secundária	22
III.3 - Abordagem do Fenômeno do Adensamento Secundário	26
III.4 - Fatores que Influem no Adensamento Secundário ..	37

	Página
III.4.1 - Tempo	37
III.4.2 - Tensão de Adensamento	37
III.4.3 - História de Tensões	38
III.4.4 - Índice de Compressão	40
III.4.5 - Amolgamento	41
III.4.6 - Duração de um Carregamento Anterior	42
III.4.7 - Tensões Cisalhantes	42
III.4.8 - Razão Incremental de Carregamento	43
III.4.9 - Temperatura	43
III.4.10 - Vibração	44
III.5 - Crítica à Abordagem do Fenômeno do Adensamento <u>Se</u> cundário	45
CAPÍTULO IV - COMPRESSÃO SECUNDÁRIA - UMA ABORDAGEM RA- CIONAL	47
IV.1 - Introdução	47
IV.2 - Compressão Secundária - Mecanismo de LACERDA E MARTINS	47
IV.3 - Teoria do Adensamento com Compressão Secundária .	55
IV.4 - Comentários sobre a Abordagem de LACERDA E MARTINS	80

	Página
CAPÍTULO V - ENSAIOS REALIZADOS	88
V.1 - Objetivos	88
V.2 - Obtenção das Amostras	88
V.3 - Ensaio Realizados	92
V.4 - Resultados	95
V.5 - Análise dos Resultados	123
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PES- QUISAS	129
VI.1 - Conclusões	129
VI.2 - Sugestões para Futuras Pesquisas	130
BIBLIOGRAFIA	132

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL

I.1 - INTRODUÇÃO

Ao se aplicar um carregamento a uma massa de solo, as deformações que irão ocorrer dependem não só do estado de tensões aplicado e das propriedades do solo como também da forma pela qual o estado de tensões é atingido (caminho de tensões) e do tempo no qual a solicitação é feita, além de outras coisas.

Tem sido crescente o interesse pela busca de formulações que prevejam com maior fidelidade as relações tensão-deformação-tempo para os solos. De particular interesse tem sido a pesquisa dos mecanismos responsáveis pela compressibilidade dos solos durante o adensamento unidimensional.

As discrepâncias observadas entre as curvas de adensamento unidimensional de laboratório e as previstas pela teoria de Terzaghi e Frölich têm origem, principalmente, no chamado fenômeno da compressão secundária, fenômeno este que embora tenha sido abordado matematicamente (ver por exemplo, TAYLOR e MERCHANT (42)), continua ainda hoje sem estar totalmente compreendido.

Buscou-se, nesse trabalho, concentrar esforços na realização de ensaios de laboratório com amostras semi-indeformadas de boa qualidade, submetidas a ensaios oedométricos de longa duração, almejando-se um estudo mais apurado de fenômeno da compressão secundária.

I.2 - OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é estudar, ainda que indiretamente, a associação da variação do coeficiente de empuxo no repouso com o fenômeno da compressão secundária segundo os mecanismos imaginados por LACERDA (18), KAVAZANJIAN e MITCHELL (15), LACERDA e MARTINS (19).

I.3 - TÓPICOS DA PESQUISA

O autor julgou necessário abordar nesta dissertação para efeito de clareza da abordagem, alguns assuntos intimamente ligados ao tema. Com isso, faz-se no Capítulo II um breve resumo da teoria do adensamento unidimensional, diagnosticando-se aí a compressão secundária.

No Capítulo III faz-se um estudo crítico das formulações existentes para a abordagem do adensamento secundário.

No Capítulo IV, faz-se uma abordagem racional do adensamento secundário, conforme proposto por MARTINS e LACERDA (28).

No Capítulo V, são apresentados os resultados dos ensaios realizados pelo autor e a análise dos resultados.

No Capítulo VI, apresentam-se as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

CAPÍTULO II - TEORIA DO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

II.1 - INTRODUÇÃO

A aplicação de tensões em qualquer material provoca deformações. Em alguns materiais essas deformações ocorrem instantaneamente, ao passo que em outros materiais elas ocorrem ao longo do tempo.

Há casos em que uma parcela das deformações se manifesta instantaneamente e a parcela restante se faz ao longo do tempo. Entretanto, qualquer que seja o caso, o comportamento do material é comandado pelas assim chamadas relações tensão-deformação-tempo.

O tipo mais simples de relação tensão-deformação-tempo é encontrado nos materiais elásticos lineares onde as deformações são proporcionais às tensões e independentes do tempo. No caso de solos submetidos a um carregamento qualquer, as relações tensão-deformação-tempo tornam-se bastante complexas já que os solos são, em geral, não-elásticos e anisotrópicos. Com isso, a abordagem matemática dos problemas que envolvam as relações tensão-deformação-tempo se torna bastante difícil. Existe, entretanto, um caso simples de interesse prático que envolve a relação tensão-deformação-tempo dos solos e que permite uma abordagem matemática relativamente simples. Trata-se do adensamento unidimensional.

Chama-se de adensamento ao processo gradual que envolve simultaneamente a lenta expulsão de água dos vazios do solo e a compressão^(*) gradual do seu arcabouço sólido. Essa definição é geral e é válida tanto para o caso unidimensional como tridimensional.

O adensamento unidimensional ocorre no campo nos casos em que a espessura da camada que adensa é pequena em relação às dimensões da área carregada. Essa condição é reproduzida em laboratório pelo ensaio oedométrico.

Na realidade, o adensamento é composto do fenômeno de expulsão da água (efeito hidrodinâmico) e do chamado efeito secundário. Esse efeito secundário ainda não está completamente entendido e pretende-se no decorrer dessa dissertação chamar atenção para sua importância.

A teoria do adensamento de Terzaghi e Frölich além de se basear em hipóteses simplificadoras que nem sempre se verificam na realidade desconsidera também o efeito da compressão secundária. Ocorre que muitas vezes o efeito secundário não pode ser desprezado pois as deformações a ele associadas são consideráveis. Nesses casos a teoria do adensamento de Terzaghi e Frolich não consegue prever de forma satisfatória a curva de adensamento (deformação x tempo).

(*) Compressão: relação entre a variação de volume do solo e o estado de tensões efetivas sob condições de estabilidade de deformações.

II.2 - TEORIA DO ADENSAMENTO DE TERZAGHI & FRÖLICH

A Figura (II.1) representa um trecho da curva $ex\sigma'_v$ para um incremento de tensão de σ'_A a σ'_C . Terzaghi e Frölich admitem que a relação $ex\sigma'_v$ pode ser representada por uma linha reta. Consideram também, que o tempo não influi na relação $ex\sigma'_v$. Com base nessas hipóteses simplificadoras (além de outras enumeradas adiante), o processo de adensamento pode ser explicado da seguinte forma: antes da aplicação do incremento de tensão vertical, a amostra está sob as condições representadas pelo ponto A (σ'_A , e_A) da Figura (II.1). Logo após a aplicação do incremento de tensão, a tensão total na amostra sofrerá um aumento, porém, o índice de vazios permanecerá e_A . O aumento da tensão não se traduzirá em aumento de tensão efetiva até que o índice de vazios seja e_C , conseqüentemente, a tensão efetiva no solo permanece σ'_A , ou seja, nesse instante inicial não ocorrem deformações no solo, pois não houve variação de tensões efetivas. Isto ocorre porque a água tendo baixa compressibilidade e estando o solo saturado, o incremento de tensão é praticamente suportado quase que exclusivamente pela água dos vazios. Se a amostra de solo não fosse permitida a drenagem, essa condição se manteria indefinidamente. No entanto, a drenagem nos extremos da amostra faz com que o excesso de pressão neutra ali se anule. Como o excesso de pressão neutra no centro da amostra ainda é $u_i = \sigma_A - \sigma_C$, gera-se um gradiente hidráulico que acarreta uma percolação em direção às superfícies drenantes. O índice de vazios vai então gradualmente decrescendo e a tensão efetiva aumentando. Esse processo gradual é mais avançado junto às superfícies drenantes da amostra e menos avançado no meio.

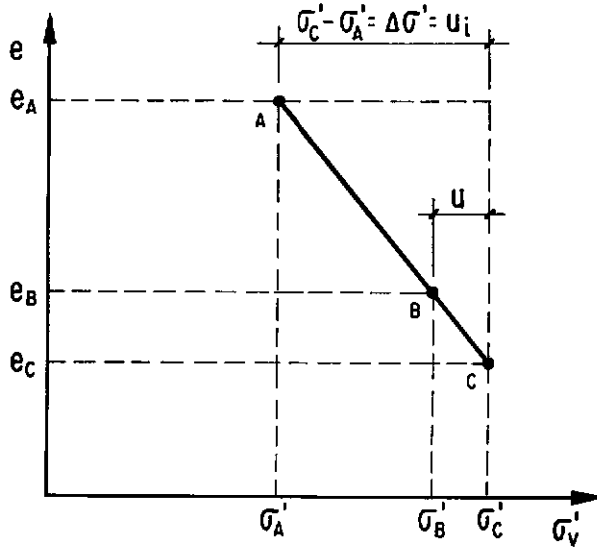


FIGURA II.1 - Relação índice de vazios (e) tensão vertical efetiva (σ'_v)

Como uma medida do grau de evolução do processo de adensamento, define-se por grau de adensamento e denota-se por U_z , a razão entre a variação do índice de vazios num instante t e a variação total do índice de vazios a ocorrer. Essa razão é igual a AB/AC na Figura (II.1).

$$U_z = \frac{e_A - e_B}{e_A - e_C} = \frac{\sigma'_B - \sigma'_A}{\sigma'_C - \sigma'_A} = \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} \quad (\text{II.1})$$

onde u e u_i são os excessos de pressão neutra num momento qualquer e no início do processo, respectivamente.

As hipóteses básicas da teoria de Terzaghi e Frölich são:

- 1) O solo é homogêneo;
- 2) O solo é saturado;

- 3) A compressibilidade dos grãos e da água é desprezível em relação à compressibilidade do esqueleto sólido;
- 4) Não há diferença de comportamento entre massas de solo de pequenas e grandes dimensões;
- 5) A compressão é unidimensional;
- 6) O escoamento é unidirecional;
- 7) É válida a lei de Darcy;
- 8) Alguns parâmetros do solo que variam com o estado de tensões são considerados constantes;
- 9) A relação $e \propto \sigma'_v$ pode ser representada por uma reta (ver Figura (II.1)).

A 1.^a hipótese está intimamente relacionada à espessura da camada compressível, visto que, quanto mais espessa a amostra maior a amplitude de variações no estado de tensões efetivas e, conseqüentemente, do índice de vazios.

A 2.^a e 3.^a hipóteses são muitas vezes satisfeitas em se tratando de solos sedimentares.

A 4.^a hipótese é de interesse acadêmico e tem pouco interesse sob o ponto de vista prático.

A 5.^a e 6.^a hipóteses são condições impostas pelos ensaios de laboratório.

A 7.^a hipótese é geralmente aceita porém, ainda há o que se estudar neste assunto principalmente no que concerne à validade da lei de Darcy quando os gradientes hidráulicos são muito baixos ou muito altos. Uma discussão rápida, porém interessante, sobre o assunto pode ser encontrado em LEONARDS (23).

A 8.^a hipótese introduz alguns erros mas não traz grandes conseqüências sob o ponto de vista prático.

A 9.^a hipótese é segundo TAYLOR (43), a responsável pela validade limitada da teoria.

Com base nessas hipóteses chega-se à equação que governa o processo do adensamento unidimensional.

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

onde:

$$c_v = \frac{k (1 + e)}{a_v \gamma_w} = \frac{k}{m_v \gamma_w} \quad (\text{II.3})$$

sendo:

k = coeficiente de permeabilidade

e = índice de vazios

a_v = coeficiente de compressibilidade

γ_w = peso específico da água

u = excesso de pressão neutra

z = variável espacial

t = tempo

c_v = coeficiente de adensamento

Resolvendo a Equação (II.2) com as condições de contorno da Figura (II.2), ver TAYLOR (43), chega-se à seguinte expressão para o excesso de pressão neutra u :

$$u(z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2 u_0}{M} \operatorname{sen} \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v} \quad (\text{II.4})$$

onde:

$$M = \frac{1}{2} \pi (2m+1) \quad \text{e} \quad T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (\text{II.5})$$

A grandeza T_v é adimensional e é chamada de fator tempo.

Condições de contorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{para } z = 0 \quad ; \quad u = 0 \\ \text{para } z = 2H \quad ; \quad u = 0 \\ \text{para } t = 0 \quad ; \quad u = u_0 \end{array} \right.$$

FIGURA II.2 - Condições de contorno para a Equação (II.2)

Para um momento genérico t , entre $t=0^+$ e $t=\infty$, a distribuição de excessos de pressão neutra na camada está indicada na Figura (II.3).

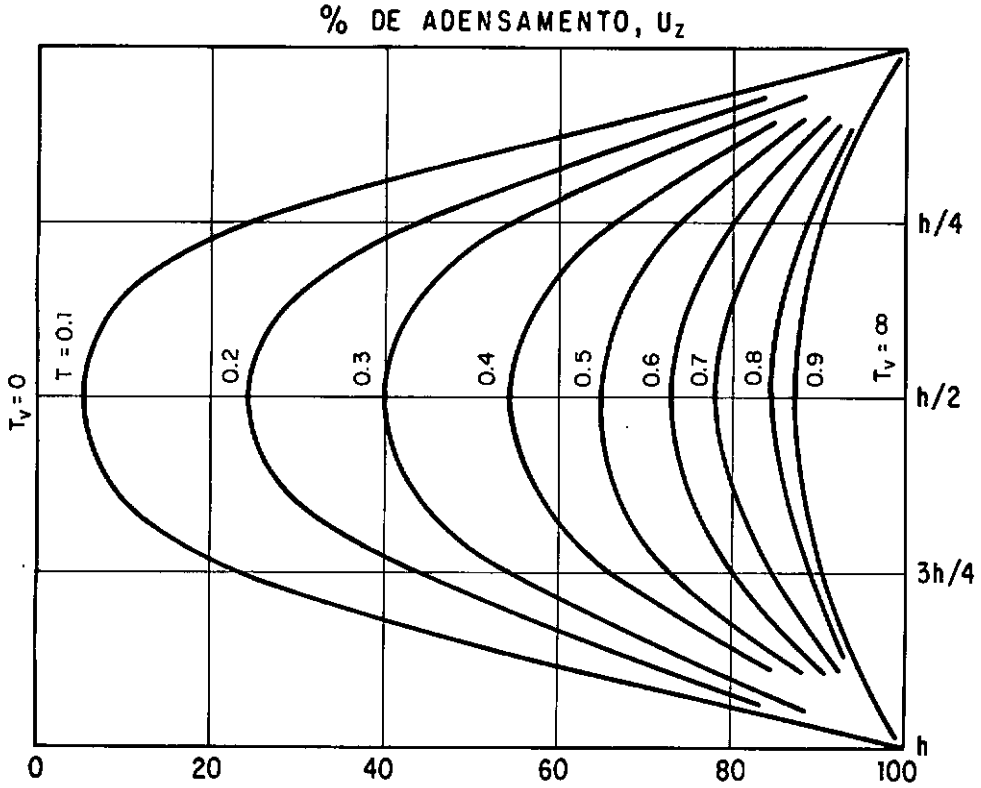


FIGURA II.3 - Distribuição dos excessos de pressão neutra ao longo da camada

Em termos de grau de adensamento, definido pelas Equações (II.1) tem-se:

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \operatorname{sen} \frac{Mz}{H} e^{(-M^2 T_v)} \quad (\text{II.6})$$

O grau de adensamento médio (\bar{U}_z) para toda a camada em qualquer tempo t , pode ser calculado por

$$\bar{U}_z = \frac{1}{H} \int_0^H \frac{e - e_0}{e_f - e_0} dz \quad (\text{II.7})$$

ou alternativamente por

$$\bar{U}_z = \frac{1}{H} \int_0^H \left(1 - \frac{u}{u_0}\right) dz \quad (\text{II.8})$$

isso leva à seguinte expressão para \bar{U}_z

$$\bar{U}_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{(-M^2 T_V)} \quad (\text{II.9}).$$

Deve-se notar que a expressão (II.9) aplica-se somente ao caso de excesso de pressão neutra inicial constante ao longo da camada. No entanto, outros casos de excesso de pressão neutra inicial podem ser facilmente resolvidos, ver TAYLOR (43).

II.3 - COMPARAÇÃO DAS CURVAS TEMPO-RECALQUE TEÓRICA E DE LABORATÓRIO

Usando as hipóteses simplificadoras enumeradas em (II.2), Terzaghi obteve, a expressão (II.4) como solução para a equação do adensamento unidimensional no caso em que o excesso de pressão neutra inicial é constante com a profundidade.

Em termos do grau de adensamento médio definido pelas expressões (II.7), a expressão (II.4) toma a forma da expressão (II.9). A representação geométrica da expressão (II.9) está apresentada na Figura (II.4). Observa-se que a expressão (II.9) dá o grau de adensamento médio em função do fator tempo T_V .

Chama-se a esta curva $\bar{U}_z \times T_v$ de curva teórica do adensamento.

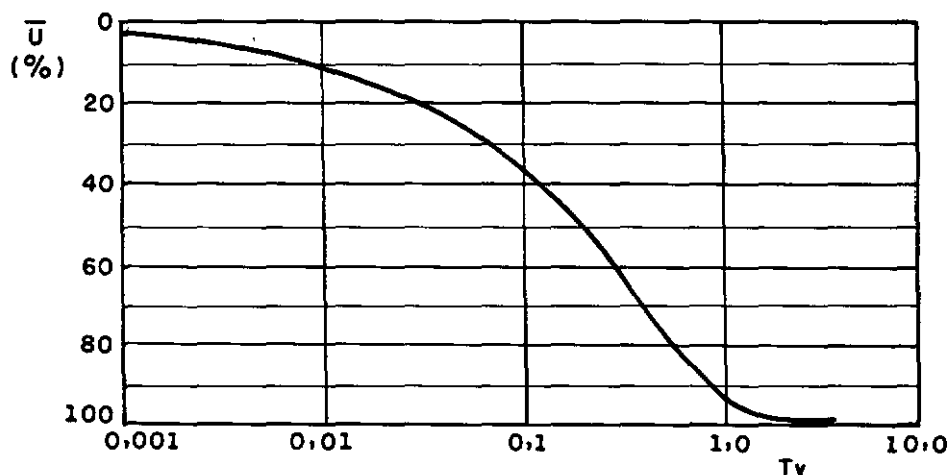


FIGURA II.4 - Porcentagem média de adensamento $\bar{U}_z \times$ fator tempo T_v

Observa-se que a curva tempo-recalque experimental de laboratório é bem representada pela teórica até um grau de adensamento médio $\bar{U}_z = 60\%$ passando a partir daí a se desviar da teórica, CASAGRANDE e FADUM (6).

Para se obter os parâmetros de adensamento de um determinado solo, em particular o coeficiente de adensamento c_v , tenta-se ajustar a curva de laboratório à curva teórica. Existem dois métodos de ajuste da curva experimental à curva teórica. O método de Casagrande e o método de Taylor.

o Método de CASAGRANDE

A Figura (II.5) mostra uma curva deformação x tempo (escala logarítmica) de laboratório. A curva teórica, apresentada na Figura (II.4) consiste basicamente de três partes: uma parte inicial, côncava para baixo; uma parte intermediária, apro

ximadamente retilínea e uma parte final assintótica à reta $\bar{U}_z = 100\%$.

Para a determinação do coeficiente de adensamento c_v tomam-se o fator tempo T_v e o tempo t associados ao mesmo grau de adensamento médio \bar{U}_z . Para isto é preciso determinar na curva experimental os pontos correspondentes a $\bar{U}_z = 0\%$ e $\bar{U}_z = 100\%$. O ponto correspondente a $\bar{U}_z = 0\%$ pode ser determinado observando-se que para \bar{U}_z menor ou igual à 60%, a curva teórica pode ser aproximada com grande acurácia pela parábola $T_v = \frac{\pi}{4} \bar{U}_z^2$. A partir desta observação selecionam-se dois pontos no trecho inicial da curva de adensamento para os quais os valores de tempo estão na razão de 4:1 e a distância vertical entre eles (Δy) é medida. Essa mesma distância Δy é dobrada para cima (ver Figura (II.5)) e a ordenada assim obtida corresponderá a $\bar{U}_z = 0\%$.

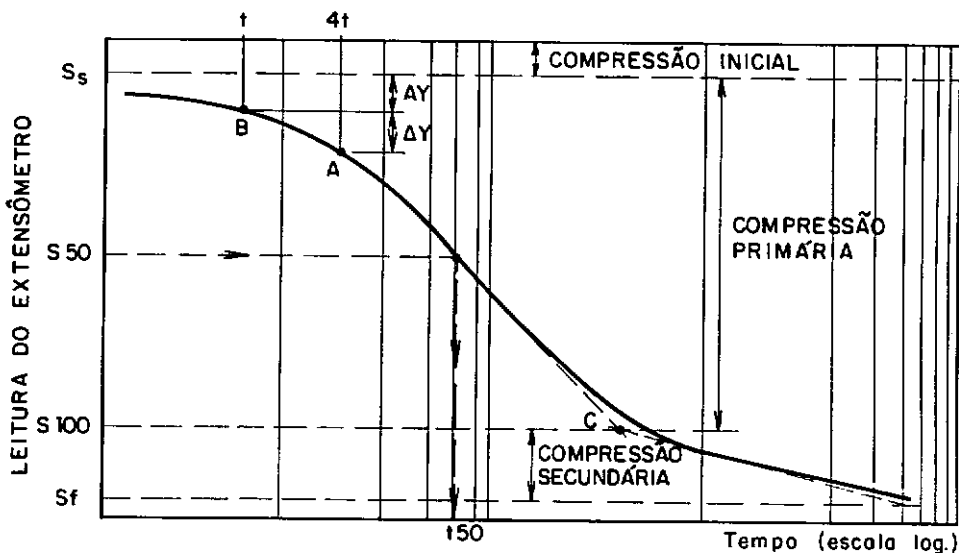


FIG. II.5 - Determinação do coeficiente de adensamento pelo método de Casagrande

O ponto correspondente a $\bar{U}_z = 100\%$ é determinado empiricamente pela interseção da tangente à curva no ponto de inflexão e o prolongamento do trecho que define a compressão secundária (ponto C na Figura (II.5)). A ordenada assim obtida é denotada por S_{100} . O ponto correspondente a um grau de adensamento médio de 50% (S_{50}) equidistará dos pontos S_s e S_{100} . Obtém-se então, da própria curva de adensamento o tempo correspondente a $\bar{U}_z = 50\%$ denotado por t_{50} . A partir daí, observando-se que para $\bar{U}_z = 50\%$ o fator tempo associado vale $T_v = 0,196$ determina-se o coeficiente de adensamento por:

$$c_v = \frac{0,196 d^2}{t_{50}} \quad (\text{II.10})$$

sendo d a distância de drenagem (nos ensaios de adensamento com duas fronteiras drenantes d vale a metade da espessura do corpo de prova).

o Método de TAYLOR

A Figura (II.6) apresenta a curva teórica de adensamento no plano $\bar{U}_z \times \sqrt{T_v}$. Como a relação entre \bar{U}_z e T_v é aproximadamente parabólica para $\bar{U}_z \leq 60\%$, a curva $\bar{U}_z \times \sqrt{T_v}$ é linear até $\bar{U}_z \leq 60\%$. Observa-se também que a abscissa do ponto correspondente a $\bar{U}_z = 90\%$ (ponto C) vale 1,15 vezes a abscissa do ponto B, ou seja, $\overline{AC} = 1,15 \overline{AB}$. Essa particularidade da curva teórica é usada para determinação do ponto da curva experimental correspondente a $\bar{U}_z = 90\%$.

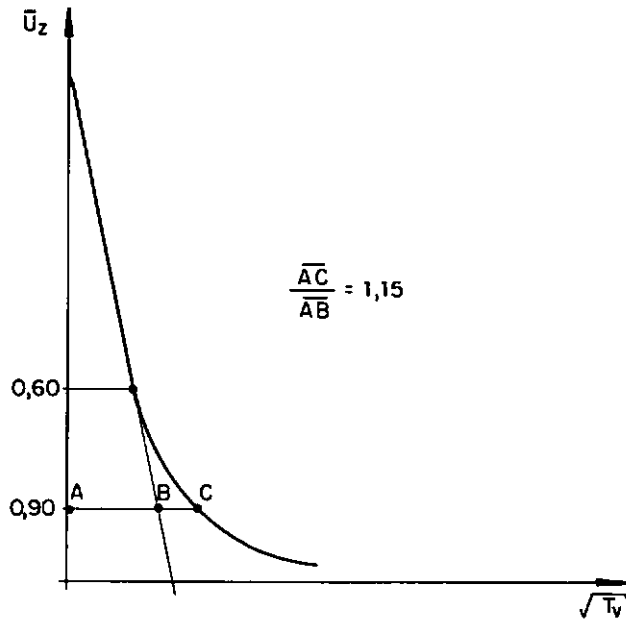


FIGURA II.6 - Curva teórica $\bar{U}_z \cdot \sqrt{T_v}$

A curva experimental (Figura (II.7)) consiste de um trecho inicial curvo que representa a compressão inicial, atribuída principalmente à existência de gases na amostra, um trecho retilíneo e finalmente um novo trecho curvo.

O ponto correspondente a $\bar{U}_z = 90\%$ é obtido pela interseção da linha DE (que tem abcissa 1,15 vezes correspondente à parte retilínea da curva experimental), com a curva experimental (ponto E na Figura (II.7)). Dessa forma tem-se

$$c_v = \frac{0,848 d^2}{t_{90}} \quad (\text{II.11})$$

Uma vez que $T_v = 0,848$ para $\bar{U}_z = 90\%$.

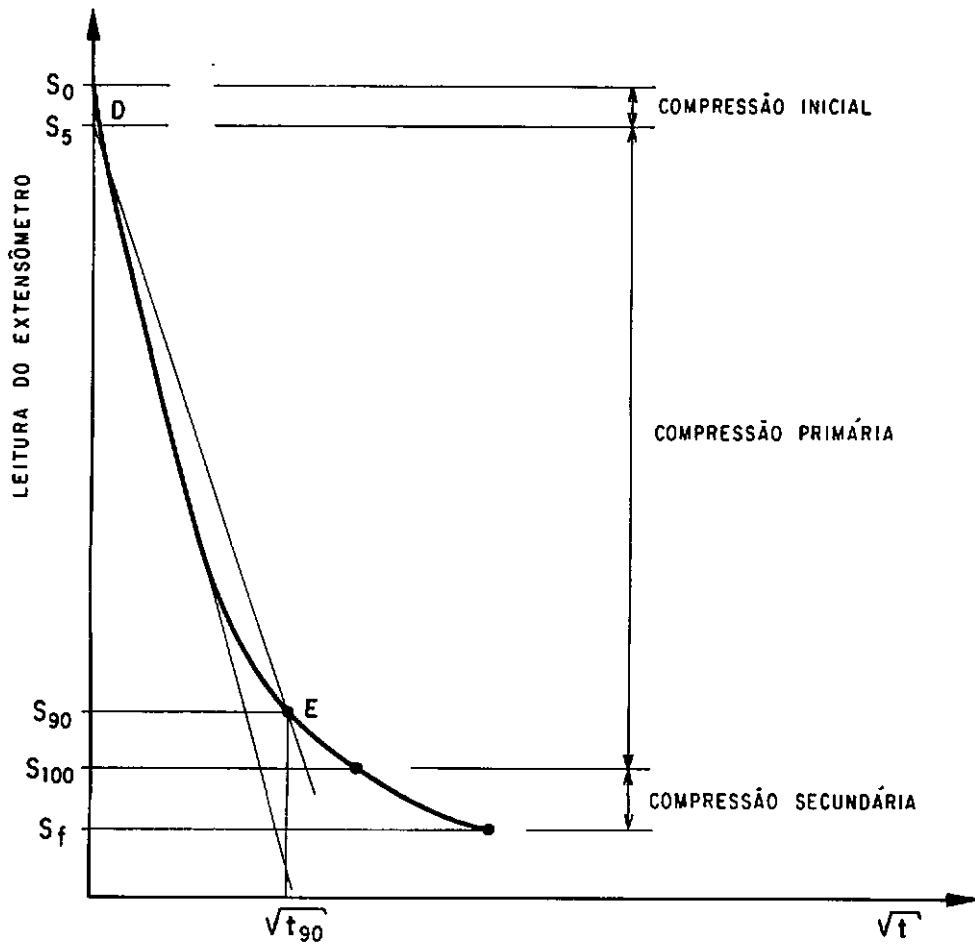


FIGURA II.7 - Curva experimental deformação $\times \sqrt{t}$

Da exposição acima, observa-se que a curva de compressão é composta de três partes:

- i) Compressão inicial de S_0 a S_5
- ii) Compressão primária de S_5 a S_{100}
- iii) Compressão secundária de S_{100} a S_f

Define-se a relação de compressão e denota-se por

r a razão

$$r = \frac{S_s - S_{100}}{S_0 - S_f} = \frac{\text{compressão primária}}{\text{compressão total}} \quad (\text{II.12})$$

Nota-se que esse valor é sempre menor que 1, sendo isso devido ao efeito da compressão inicial e da compressão secundária.

Há que se notar ainda o fato citado por LEONARD'S e GIRAULT (22) de que a curva deformação x tempo (curva de adensamento) depende da razão de incremento de carregamento (relação entre o incremento de tensão e a tensão do estágio anterior).

Nota-se na Figura (II.8) que para grandes incrementos de carregamento, obtêm-se curvas do tipo I, onde a teoria de Terzaghi e Frölich é aplicável e o procedimento descrito acima para o cálculo de c_v é válido. No entanto, se a razão de incremento de carregamento é reduzida, a compressão secundária pode tornar-se mais ponderável e a forma da curva muda do tipo I para o tipo II ou III, e portanto, fica difícil a obtenção de c_v pelo procedimento acima citado.

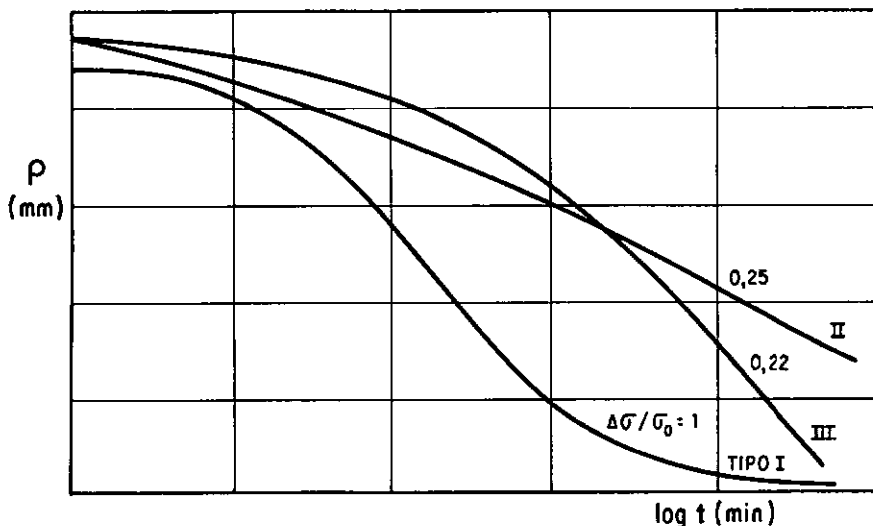


FIGURA 11.8 - Formatos das curvas de adensamentos para diversos valores da relação incremento de tensão-tensão do estágio anterior $\Delta\sigma/\sigma$

Para razão de incremento de carregamento suficientemente pequenas, o tempo onde o adensamento primário se completa não pode ser determinado pelo método convencional de Casagrande (LEONARDS e GIRAULT (22)).

Nota-se que quando $\Delta\sigma/\sigma$ é suficientemente grande para se desenvolverem curvas do tipo I, a construção de Casagrande permite determinar o ponto de 100% do adensamento primário (S_{100} na Figura (II.5)) com boa aproximação, mesmo quando a compressão secundária é grande.

Do exposto acima pode-se concluir que para curvas do tipo I, a teoria de Terzaghi e Frölich se aplica razoavelmente bem, havendo discordância apenas no trecho inicial (compressão inicial), e no trecho final após o S_{100} (início da compressão secundária). Para curvas do tipo II ou III a teoria de Terzaghi & Frölich não se aplica.

II.4 - IDENTIFICAÇÃO DA COMPRESSÃO SECUNDÁRIA

A Figura (II.9) da teoria de adensamento de Terzaghi e Frölich prevê que para grandes valores de t ($t \rightarrow \infty$) a curva torna-se assintótica a uma linha horizontal correspondente a $\bar{U}_2 = 100\%$. No entanto, ensaios de laboratório mostram que ao invés de se aproximarem dessa assíntota horizontal, as curvas continuam conforme mostrado na Figura (II.9).

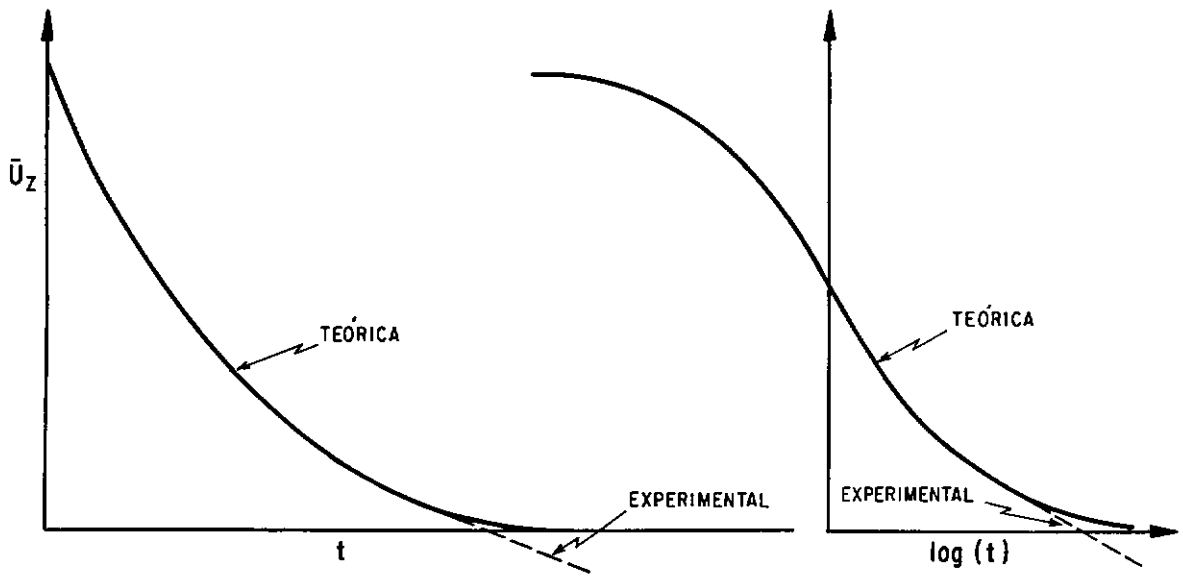


FIGURA II.9 - Identificação da compressão secundária

À compressão adicional representada pela distância vertical entre a curva teórica (cheia) e a experimental (pontilhada), dá-se o nome de compressão secundária.

Faz-se na Seção IV uma abordagem desse fenômeno.

CAPÍTULO III - ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

III.1 - INTRODUÇÃO

Uma das conseqüências da teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi é que, finda a dissipação do excesso de pressão neutra cessam também as deformações. A rigor, o excesso de pressão neutra nunca se dissipa haja visto a duração infinita do fenômeno. Entretanto, as deformações que ocorrem mesmo após o excesso de pressão neutra ter se tornado praticamente nulo são excessivas para serem atribuídas unicamente ao incremento da tensão vertical efetiva consequente da dissipação do excesso de pressão neutra remanescente. A esse excesso de deformação que não pode ser atribuído à dissipação do excesso de pressão neutra remanescente dá-se o nome de adensamento secundário ou compressão secundária (Figura III.1).

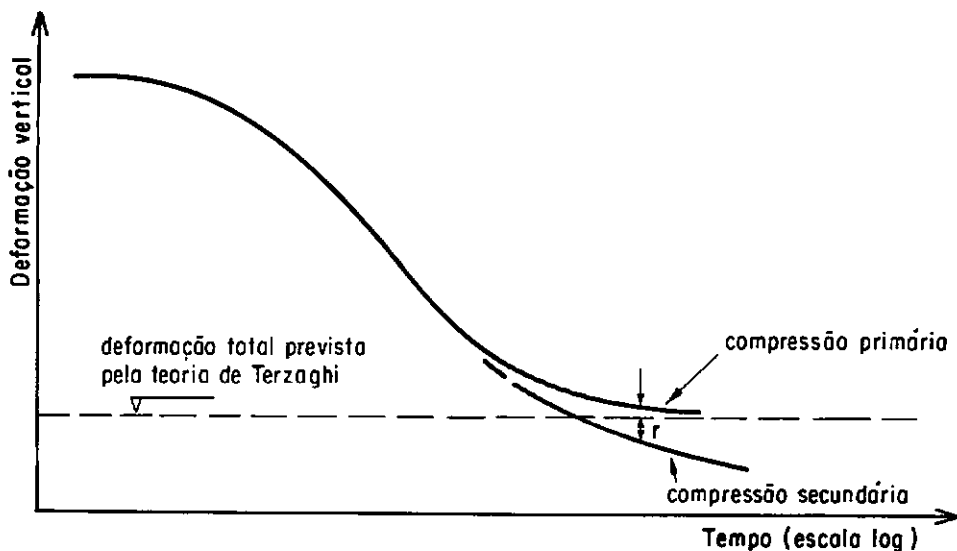


Figura III.1 - Definição da compressão secundária

Tem-se definido a compressão secundária como toda a deformação que ocorre após a dissipação de praticamente todo o excesso de pressão neutra. A rigor esta definição é falha pois se esquece que, mesmo na fase mais adiantada do processo, estão presentes tanto o adensamento secundário como o primário (Figura III.1). Aliás, a divisão do fenômeno em adensamento primário e adensamento secundário é um tanto quanto arbitrária BJERRUM (4) haja vista que os dois efeitos, primário e secundário, ocorrem simultaneamente e devem fazer parte de um fenômeno mais complexo que o idealizado pela teoria de Terzaghi.

Alternativamente, há quem defina o adensamento secundário como sendo a deformação que ocorre sob estado de tensões efetivas constante. Com o surgimento de uma corrente que defende o desenvolvimento do adensamento secundário com o crescimento do coeficiente de empuxo no repouso (LACERDA(18); MARTINS (27); KAVAZANJIAN & MITCHELL (15); LACERDA & MARTINS (19) e HSIEH & KAVAZANJIAN (13)) essa definição deve passar a ser encarada com reservas.

Deve-se ressaltar que, embora vários mecanismos tenham sido propostos, a natureza do fenômeno compressão secundária continua não totalmente conhecida.

Além das medições diretas do crescimento de K_0 realizadas por LACERDA (17), TATSUOKA (in KAVAZANJIAN & MITCHELL (15)) e HSIEH & KAVAZANJIAN (13) o autor quer apresentar alguns argumentos que fortificam o mecanismo que associa a compressão secundária ao crescimento do coeficiente de empuxo no repouso. Além disso,

são apresentados alguns resultados consistentes com o referido mecanismo.

III.2 - MECANISMOS DA COMPRESSÃO SECUNDÁRIA

BARDEN (3), revendo mecanismos que foram propostos para explicar a compressão secundária, classifica os mecanismos mais comumente propostos em três grupos, a saber:

- (1) mecanismo baseado na "viscosidade estrutural" do solo devido à viscosidade da água adsorvida (TERZAGHI (44));
- (2) mecanismo baseado na ruptura de ligações ("jumping bonds") como preconizado pela "The Rate Process Theory" (MITCHELL (34));
- (3) mecanismo baseado na existência de uma estrutura com macro e microporos (De JONG & VERRULJT (9)).

Para verificar a validade do primeiro mecanismo, seria necessária a remoção da água adsorvida de forma tal que se garantisse uma quantidade de água inferior àquela que permitisse a formação de apenas uma monocamada em torno dos grãos. Segundo CASTRO (7) a umidade na qual esta condição ocorresse seria, para o solo a ser testado (areia da Praia de São Francisco-Niterói), da ordem de 10^{-11} . Esta condição é praticamente impossível de ser obtida em laboratório ficando assim prejudicada a análise do primeiro mecanismo.

Para verificar a validade do terceiro mecanismo foi realizado um ensaio de adensamento unidimensional numa amostra de areia fofa uniforme (índice de vazios inicial $e_0 = 0,755$). A referida areia era constituída de grãos de quartzo com formato sub-angular a sub-arredondado. O corpo de prova foi preparado por chuveiramento utilizando-se a fração granulométrica passando na peneira nº 50 e retida na peneira nº 100. Com esse expediente acredita-se ter-se evitado a formação de macro e microporos na moldagem do corpo de prova.

O ensaio foi realizado numa sequência de carregamento em que a tensão vertical aplicada era o dobro do valor da tensão do estágio anterior ($\Delta\sigma/\sigma = 1,0$). Iniciou-se com uma tensão vertical de $12,5 \text{ kN/m}^2$ levando-se até 3200 kN/m^2 . Procedeu-se à saturação do corpo de prova 1 minuto após a aplicação da tensão de $12,5 \text{ kN/m}^2$. Todos os estágios tiveram duração de 24 ou 48 horas. Em todos os estágios observou-se que, durante este intervalo de tempo, não houve tendência de estabilização das deformações. Esse comportamento típico pode ser visto na Figura III.2 onde se apresentam as curvas de deformação x tempo para os estágios de 25 kN/m^2 , 100 kN/m^2 , 400 kN/m^2 e 1600 kN/m^2 .

Estimando-se o coeficiente de adensamento a partir de um coeficiente de permeabilidade $k = 10^{-4} \text{ cm/s}$, valor razoável como limite inferior para a areia ensaiada, o tempo necessário para a ocorrência de 99% do adensamento seria da ordem de 10^{-1} s ! Na Figura III.2 observa-se que, mesmo após decorridos 6s, um tempo bem superior (da ordem de 100 vezes) ao estimado para a dissipação de 99% do excesso de pressão neutra, as deformações

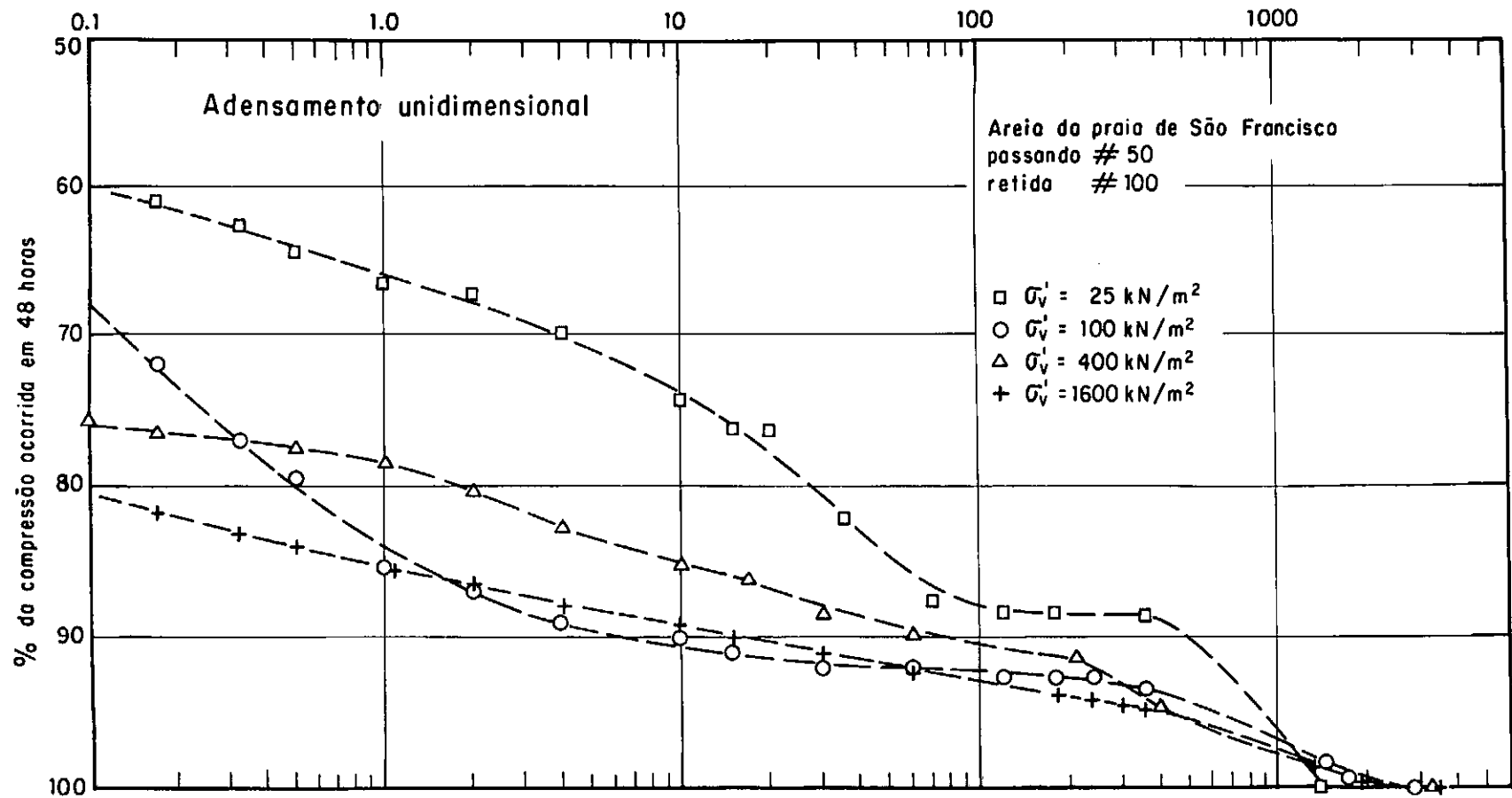


Figura III.2 - Curvas deformação x tempo para uma areia pura uniforme saturada

continuam a ocorrer atingindo valores bem superiores aos que se poderiam prever pela Teoria de Terzaghi. Consequentemente, conclui-se daí que a compressão secundária não só está presente como o faz de maneira marcante. Para avaliar quão expressiva é a compressão secundária pode-se tomar, ainda que arbitrariamente, qualquer tempo maior que 10^{-1} s, como sendo "divisor" entre os adensamentos primário e secundário. No caso é conveniente tomar o tempo de 6s como esse "divisor". Tomando-se a razão entre a deformação ocorrida após 6s e a deformação total ocorrida no estágio pode-se, de certa forma, quantificar a compressão secundária. Os valores dessa razão estão apresentados na Tabela III.1 para todos os estágios de carregamento.

TENSÃO NO ESTÁGIO (KN/m ²)	TEMPO DE DURAÇÃO DO ESTÁGIO (horas)	DEFORMAÇÃO APÓS 6s DEFORMAÇÃO NO ESTÁGIO (%)
12,5	24	12
25	24	40
50	24	31
100	48	32
200	48	40
400	48	26
800	48	17
1600	48	19
3200	48	20

Tabela III.1 - Quantificação da compressão secundária (areia da praia de São Francisco - Niterói, passando ϕ 50 e retida ϕ 100)

Observa-se na Tabela III.1 que a compressão secundária é responsável por parcela significativa da compressão total chegando em alguns casos a 40%.

Baseado no fato de que a areia é uniforme, é difícil imaginar que sua estrutura apresente micro e macroporos. Por outro lado, as curvas da Figura III.2 e os resultados da Tabela III.1 mostram que a compressão secundária está presente de forma marcante. Por esta razão é razoável concluir que o terceiro mecanismo proposto para explicar a compressão secundária não se aplica ao solo ensaiado.

Em vista dos argumentos apresentados anteriormente é difícil aceitar o mecanismo baseado na existência de macro e microporos. Por outro lado, devido à impossibilidade de se conseguir uma amostra de solo sem água adsorvida, o primeiro mecanismo deve continuar sendo levado em conta como mecanismo possível. No entanto, é o segundo mecanismo aquele que se mostra mais condizente com os resultados das pesquisas mais recentes sobre compressão secundária, assunto que será discutido mais adiante.

III.3 - A ABORDAGEM DO FENÔMENO DO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

A abordagem do adensamento secundário tem sido feita até hoje segundo duas correntes principais distintas: uma empírica e a outra baseada em modelos reológicos, todas se preocupando em resolver o problema de forma quantitativa em detrimento da explicação do fenômeno físico.

A abordagem mais antiga é empírica e surgiu com BUISMAN (5) passando por HAEFELI e SCHAAD (12), KOPPEJAN (16) e evoluindo até o estágio em que se encontra em LADD (21) e MESRI e GODLEWSKI (32).

Nas abordagens em modelos reológicos destacam-se as de: GIBSON e LO (10), WAHLS (45), LO (26) e BARDEN (3).

Apresenta-se nesta dissertação, por ser mais difundida e de uso mais fácil, a abordagem empírica apresentada por LADD (21) e os aperfeiçoamentos propostos por MESRI e GODLEWSKI (32).

A abordagem prática proposta por LADD (21) admite que o adensamento secundário tem início após o "término" do primário. O parâmetro utilizado para quantificar a compressão secundária nessa abordagem é o coeficiente de compressão secundária denotado por $C_{\alpha\epsilon}$ ou C_{α} e definidos por (Figura III.3).

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon v}{\Delta\log t}$$

ou por
$$C_{\alpha} = \frac{-\Delta e}{\Delta\log t}$$

LADD (21) admite as seguintes hipóteses simplificadoras na abordagem de casos práticos que envolvam adensamento secundário:

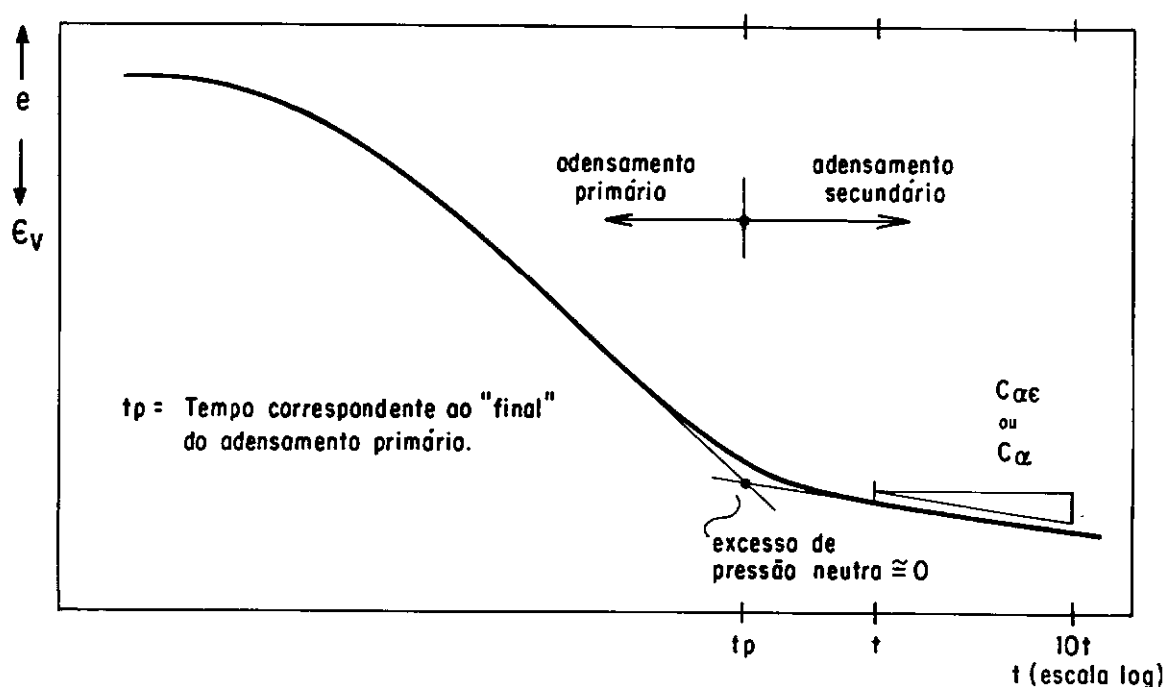


Figura III.3 - Definição do coeficiente de compressão secundária

- (1) $C_{\alpha\epsilon}$ (ou C_α) independentes do tempo;
- (2) $C_{\alpha\epsilon}$ (ou C_α) independentes da espessura da camada que adensa;
- (3) $C_{\alpha\epsilon}$ (ou C_α) independentes da razão de incremento da tensão desde que a curva de adensamento seja do tipo I de LEONARDS & GIRAULT (21);
- (4) $C_{\alpha\epsilon}$ (ou C_α) independente da tensão de adensamento para argilas normalmente adensadas que apresentem o trecho de compressão virgem retilíneo.

Dentre as quatro hipóteses acima enunciadas são as de números (1) e (4) as que têm efeitos mais restritivos sobre a abordagem. A combinação das hipóteses (1) e (4) pode ser visto na Figura III.4.

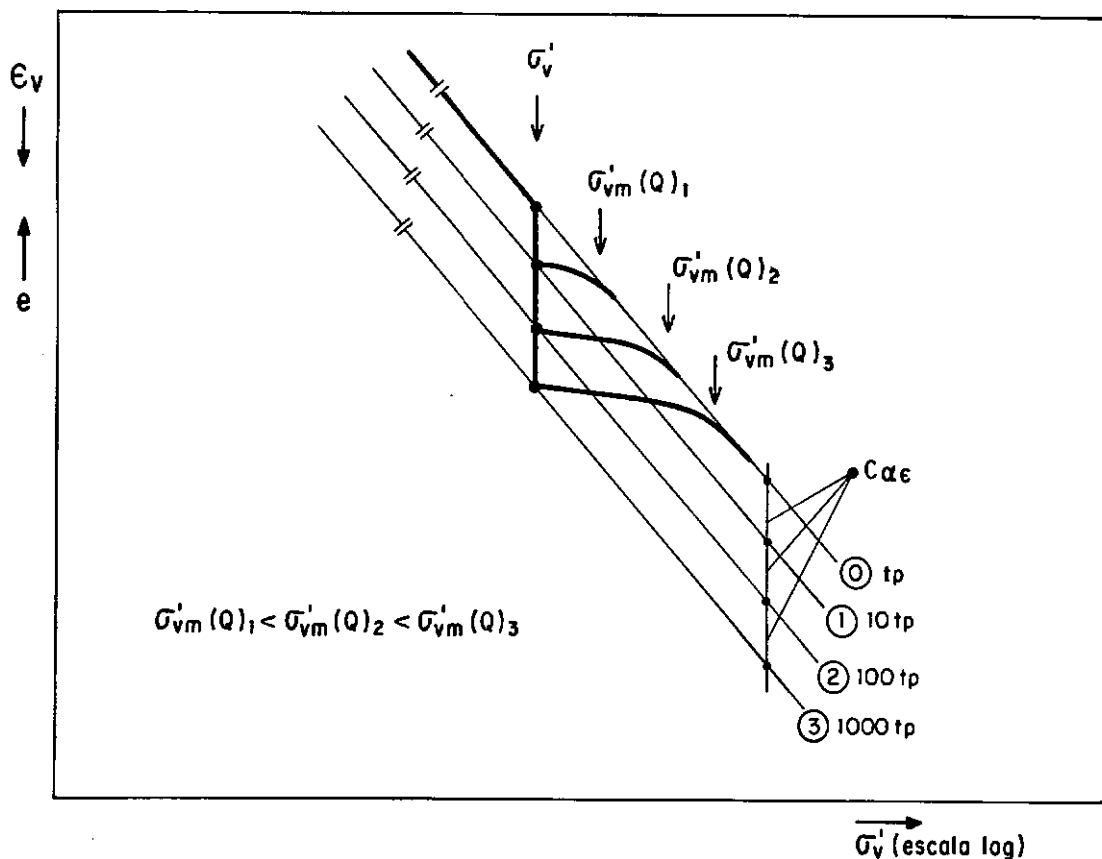


Figura III.4 - Efeito das hipóteses simplificadoras (1) e (4)

Na Figura III.4 as curvas 0, 1, 2 e 3 correspondem a 0, 1, 2 e 3 ciclos de adensamento secundário. O paralelismo destas curvas representa a hipótese (4), ao passo que o espaçamento uniforme entre elas representa a hipótese (1).

Observa-se na Figura III.4 que a compressão secundária gera uma falsa tensão de sobreadensamento, tanto maior quanto tenha sido o tempo em que a amostra se submeteu ao adensamento secundário ($\sigma'_{vm}(Q)_1 < \sigma'_{vm}(Q)_2 < \sigma'_{vm}(Q)_3$). A essa falsa tensão de sobreadensamento LEONARDS & ALTSCHAEFFL(24) deram o nome de tensão de quasi-sobreadensamento, BJERRUM (4) chamou de tensão crítica.

A hipótese (4) se restringe as argilas normalmen-

te adensadas posto que o coeficiente de compressão secundária $C_{\alpha\varepsilon}$ varia de forma significativa com a razão de sobreadensamento. Na Figura III.5 é apresentada a faixa de variação de $C_{\alpha\varepsilon}$ com a relação σ'_v/σ'_{vm} (relação entre a tensão vertical efetiva atuante e a tensão de sobreadensamento).

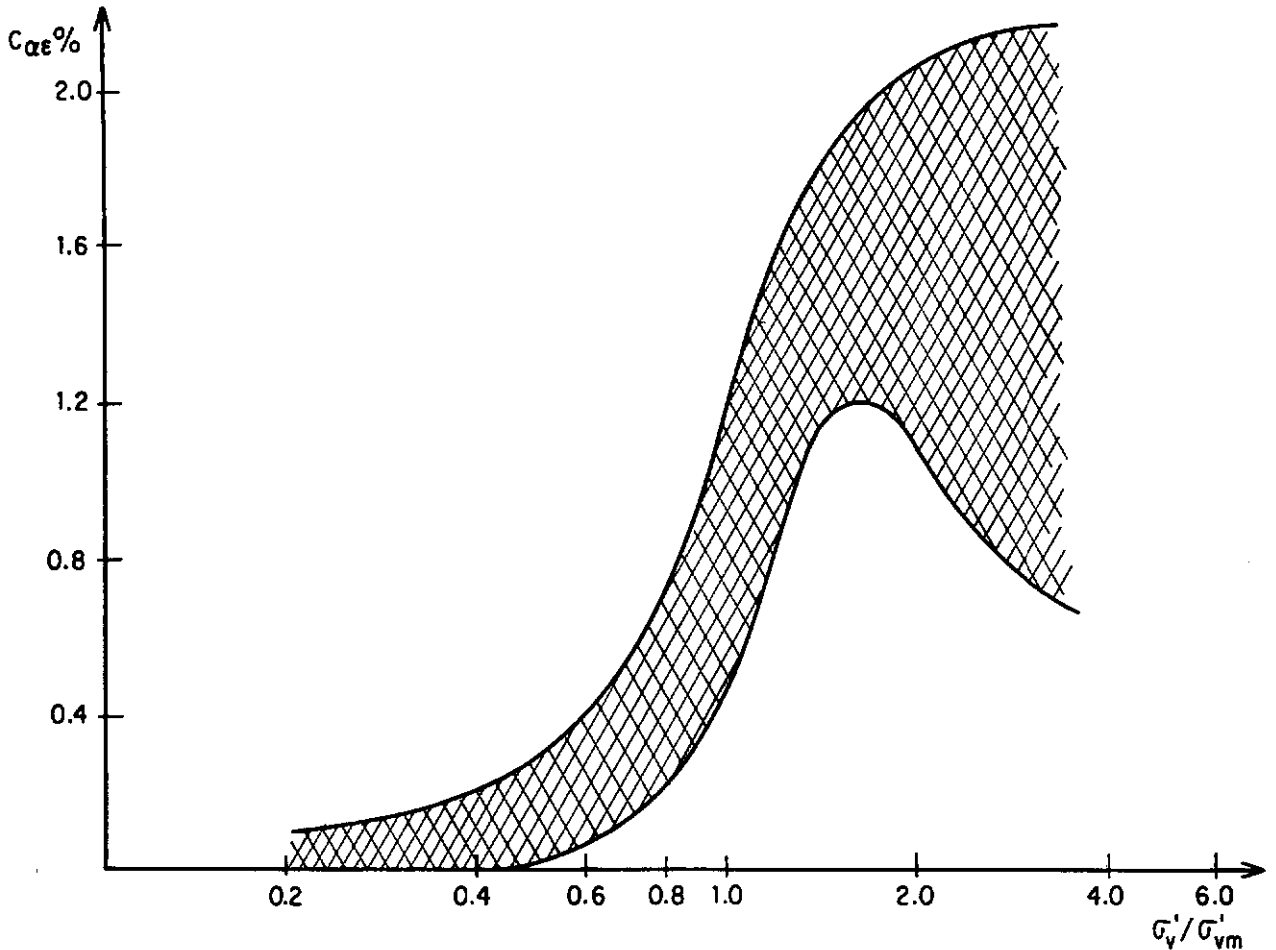


Figura III.5 - Faixa de variação do coeficiente de compressão secundária com a história de tensões

A prática recomendada para a estimativa da compressão secundária segundo LADD (21) compreende:

(a) Recompressão de argilas pré-adensadas

Se a razão de sobreadensamento for maior ou igual

a 2 ($OCR \geq 2$), a velocidade da compressão secundária será extremamente baixa para ser de algum valor prático.

Para razões de sobreadensamento menores que 2 estudar o comportamento de $C_{\alpha\varepsilon}$ com OCR, adotar o $C_{\alpha\varepsilon}$ correspondente ao OCR em questão e, a partir daí, proceder como no item (b). Os dados devem ser obtidos a partir de amostras sobreadensadas em laboratório. Para diminuir o efeito do amolgamento na amostragem é recomendável no laboratório reproduzir o mesmo OCR de campo submetendo a amostra a uma tensão de sobreadensamento maior que a tensão de sobreadensamento de campo.

(b) Compressão de argilas sobreadensadas até o domínio de normalmente adensadas

Nesse caso o recalque por adensamento secundário será dado por:

$$r_s = C_{\alpha\varepsilon} H_o \log (t/t_p) \quad (\text{III.3})$$

ou

$$r_s = \frac{C_\alpha}{1+e_o} H_o \log (t/t_p) \quad (\text{III.4})$$

onde e_o é o índice de vazios inicial, H_o a espessura inicial da camada que adensa, t o tempo para o qual se quer conhecer o recalque e t_p o tempo correspondente ao "final" do adensamento primário.

Esse cálculo, embora simples, envolve um procedi-

mento arbitrário que é a fixação do tempo correspondente ao final do primário. Assim resultados diferentes podem ser obtidos dependendo do grau de adensamento arbitrado para o "final" do primário. MARTINS (27) sugere contornar esta dificuldade traçando-se um gráfico recalque x tempo em que são plotados os recalques(r) devidos ao adensamento primário ($r(t) = \bar{U}(T) \cdot H_o$) somando-se a estes valores os recalques devidos à compressão secundária (r_s). Isto é feito de forma que o ponto correspondente ao final do primário fica definido pela equação

$$\left. \frac{dr}{d \log t} \right|_{t=t_p} = C_{\alpha \varepsilon} \cdot H_o \quad (\text{III.5})$$

Um gráfico recalque x tempo construído de acordo com as idéias expostas acima é apresentado na Figura III.6.

MESRI & GODLEWSKI (32) na tentativa de aperfeiçoar a abordagem de LADD (21) enunciam, baseados numa análise empírica, o seguinte postulado: "PARA QUALQUER SOLO EXISTE UMA RELAÇÃO ÚNICA ENTRE $C_\alpha = \partial e / \partial \log t$ E $C_c = \partial e / \partial \log \sigma'_v$ VÁLIDA PARA QUALQUER TEMPO, ÍNDICE DE VAZIOS E TENSÃO EFETIVA. Uma consequência dessa relação é a possibilidade de se prever a forma da curva de adensamento no ramo secundário (ver Figura III.7).

MESRI & GODLEWSKI (32) após o estudo da compressão secundário de diversos solos, concluem que a relação C_α / C_c se situa na faixa 0,025 - 0,10 e sugerem, a partir daí, uma abordagem para o fenômeno da compressão secundária que consiste no seguinte: a partir de um ensaio de adensamento convencional obtém-se a curva e x $\log \sigma'_v$ correspondente ao final do adensamento

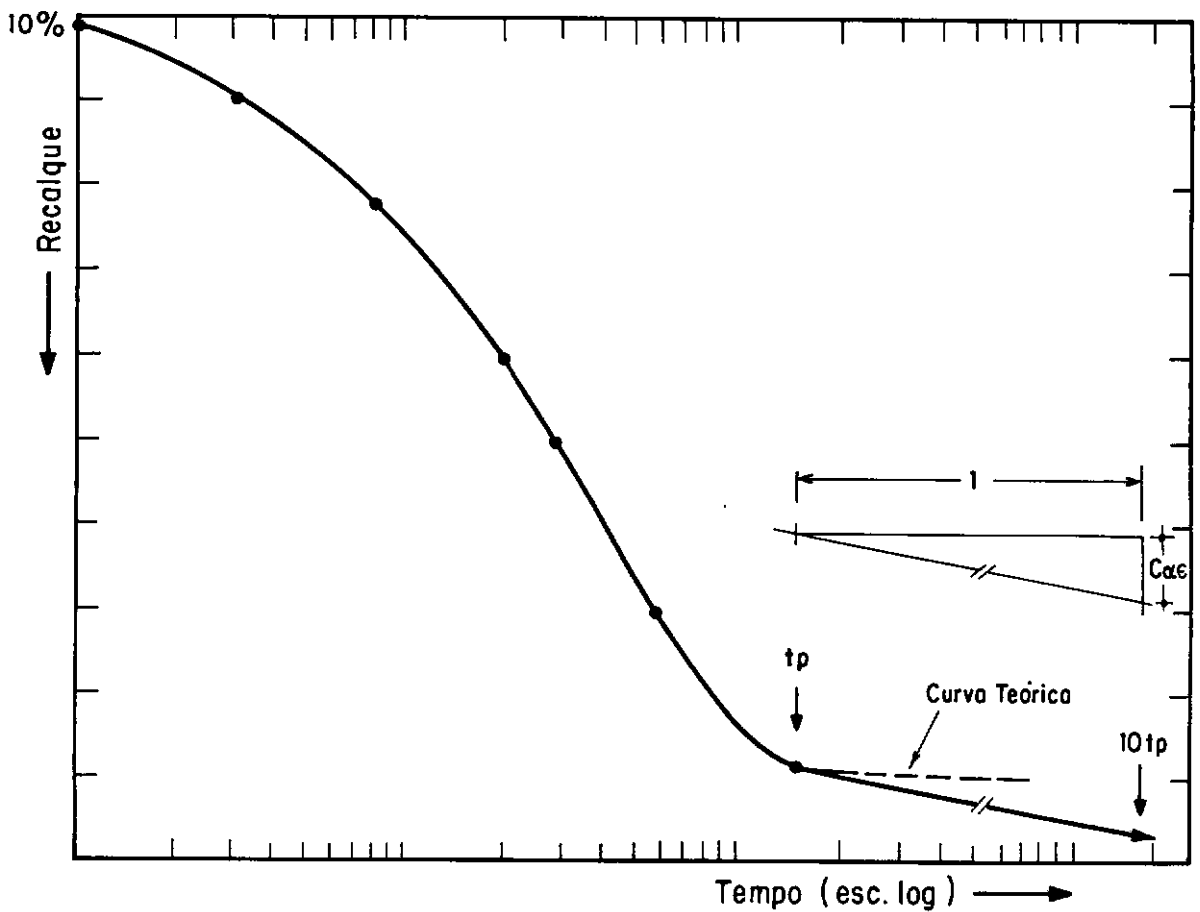


Figura III.6 - Gráfico recalque x tempo levando em conta a compressão secundária

primário, o que pode ser feito, por exemplo, através da construção de Taylor (gráfico deformação $\times \sqrt{t}$). Continuando, determina-se o valor de C_α correspondente ao trecho imediatamente após a transição primário-secundário (Figura III.8). Determina-se um valor para a relação C_α/C_c , daí em diante considerado constante. Desta forma é possível, partindo-se da curva e $\times \log \sigma'_v$ correspondente ao final do primário (t_p) construir a curva e $\times \log \sigma'_v$ correspondente a $10 t_p$, $100 t_p$, $1000 t_p$ e assim por diante. Admite-se neste caso que C_α permaneça constante entre t_p e $10 t_p$, $10 t_p$ e $100 t_p$, etc ... É importante ressaltar que segundo a concep-

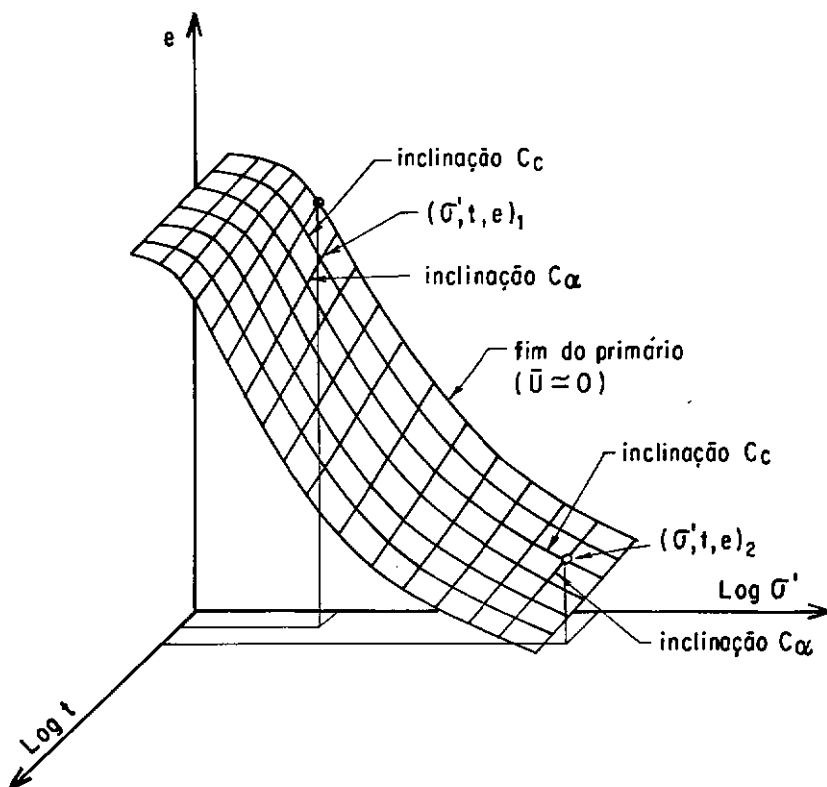


Figura III.7 - Gráfico $e \times \log \sigma'_v \times \log t$ mostrando a relação entre C_α e C_c durante a compressão secundária, segundo MESRI & GODLEWSKI (32)

ção de MESRI & GODLEWSKI (32). C_α pode variar com o tempo e que esta variação de C_α com o tempo reflete a variação de C_c com o tempo. A Figura III.8 de Mesri & Castro ilustra este aspecto.

É interessante também ressaltar a tentativa de prever o formato da curva compressão x logaritmo do tempo, proposta por MESRI & GODLEWSKI (32) e apresentada nos seguintes termos: a curva compressão x logaritmo do tempo da teoria de Terzaghi tem um ponto de inflexão onde a concavidade muda de sentido. A expressão da tangente à curva $e \times \log t$ no ponto de inflexão é:

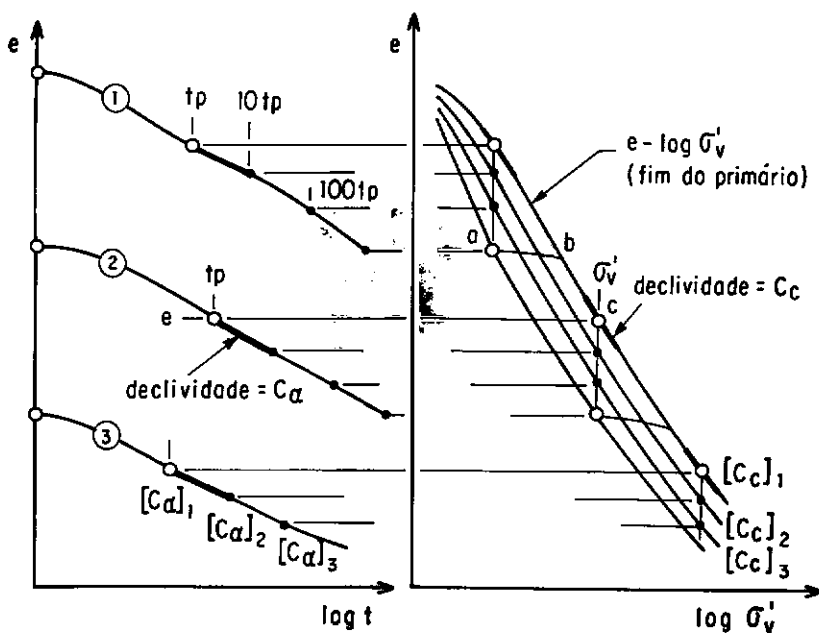


Figura III.8 - Valores correspondentes de C_α e C_c em qualquer "instante" (e , σ'_v , t) durante a compressão secundária segundo MESRI e CASTRO (33)

$$\frac{\partial e}{\partial \log t} = 0,7 \Delta e_{100} \quad (\text{III.6})$$

onde Δe_{100} significa a variação do índice de vazios correspondente ao fim do primário. Para incrementos de tensão onde a tensão vertical inicial σ'_{vo} é maior que a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) ou tensão de quasi-sobreadensamento ($\sigma'_{vm}(Q)$).

$$\frac{\partial e}{\partial \log t} = 0,7 C_c \log \left(1 + \frac{\Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} \right) \quad (\text{III.7})$$

sendo $\Delta \sigma$ o incremento de tensão vertical. Se $\Delta \sigma / \sigma'_{vo}$ for igual à unidade

$$\frac{\frac{\partial e}{\partial \log t}}{C_c} = 0,21 \quad (\text{III.8})$$

Como o valor de $(\partial e / \partial \log t) / C_c = 0,21$ é maior que o dobro do valor máximo observado de $C_\alpha / C_c = 0,10$, o ponto de inflexão será observado em todas as curvas $e \log t$ de todos os solos cujos $\sigma'_{vo} \geq \sigma'_{vm}$ (ou $\sigma'_{vo} > \sigma'_{vm}(Q)$) e $\frac{\Delta \sigma}{\sigma'_{vo}} = 1$. Por outro lado, como um exemplo, se $\Delta \sigma / \sigma'_{vo} = 0,2$, então $(\partial e / \partial \log t) / C_c = 0,056$, o ponto de inflexão não existirá. Em resumo são as seguintes as principais conclusões de MESRI e GODLEWSKI (32).

- (1) Para qualquer solo natural existe uma relação única entre C_α e C_c ;
- (2) Para uma variedade grande de solos analisados C_α / C_c está na faixa de 0,025 a 0,10;
- (3) A relação existente entre C_α e C_c é válida para qualquer terço (e, σ'_{vo}, t) ;
- (4) O valor limite de $C_\alpha / C_c \leq 0,1$ pode ser usado para se prever o formato da curva de compressão x logaritmo do tempo;
- (5) Há evidências experimentais de que os valores medidos de C_α não são função da relação incremental da tensão $(\Delta \sigma / \sigma'_{vo})$ embora se reconheça que C_α seja fortemente dependente do valor da tensão efetiva final.

III.4 - FATORES QUE INFLUEM NO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

III.4.1 - Tempo

Segundo MESRI (31) a variação do coeficiente de compressão secundária com o tempo não pode ser estabelecida, mesmo que o ensaio leve alguns anos, pois, além do limite de tempo os resultados de tais ensaios são limitados por alguns fatores que podem produzir alterações físico-químicas nas amostras tais como cimentação e crescimento de bactérias. Além disso, as condições de carregamento no laboratório podem mudar com o tempo aumentando o atrito lateral entre a amostra e o anel ou flutuações na temperatura podem fazer com que haja variações no diâmetro do anel provocando variação na tensão horizontal.

Não há, entretanto, como negar que C_{α} decresça com o tempo. Se isso não ocorrer não é difícil mostrar que existirá um tempo tal que, a partir daquele instante, o índice de vazios torna-se menor do que zero o que é absurdo.

III.4.2 - Tensão de Adensamento

A relação entre o coeficiente de compressão secundária e a tensão de adensamento não é clara por diversas razões. A primeira razão se prende ao fato de que os diversos autores usam maneiras diferentes para definir a velocidade da compressão secundária. A segunda razão diz respeito ao fato de ser a tensão vertical efetiva, sob a qual é feita a medida do coeficiente de compressão secundária, aplicada de diferentes maneiras.

MESRI (31) executou uma série de ensaios oedométricos numa argila orgânica sedimentada em laboratório. Os corpos de prova foram carregados com relações incrementais $\Delta\sigma/\sigma = 1$ e cada estágio de carga teve somente duração suficiente para que ocorresse o adensamento primário. Os corpos de prova normalmente adensados foram então submetidos a tensões finais diferentes que permaneceram por seis meses. Os resultados destes ensaios mostraram o decréscimo do coeficiente de compressão secundária com a tensão normal efetiva.

III.4.3 - História de Tensões

Há concordância geral de que o sobreadensamento faz decrescer de forma marcante o coeficiente C_α . Com respeito à influência da razão de sobreadensamento (OCR) vale notar que o comportamento de C_α é similar ao do índice de compressão C_c , isto é, C_α aumenta com a tensão de compressão atingindo um máximo numa faixa entre $1,5 \sigma'_{vm}$ e $3,0 \sigma'_{vm}$ para daí em diante decrescer com σ'_v .

A Figura III.9 mostra a variação do coeficiente de compressão secundária $C_{\alpha \epsilon}$ com a relação σ'_v/σ'_{vm} para alguns solos. Os dados correspondem a carregamentos iniciais em amostras indeformadas de boa qualidade ou a ciclos de descarga-recarga que se realizam a partir de tensões imediatamente superiores a tensão de sobreadensamento. Observa-se na Figura III.9, como mencionado, o decréscimo marcante de $C_{\alpha \epsilon}$ com OCR.

Dentro deste item é importante ressaltar os efeitos de um carregamento temporário sobre o fenômeno do adensamen-

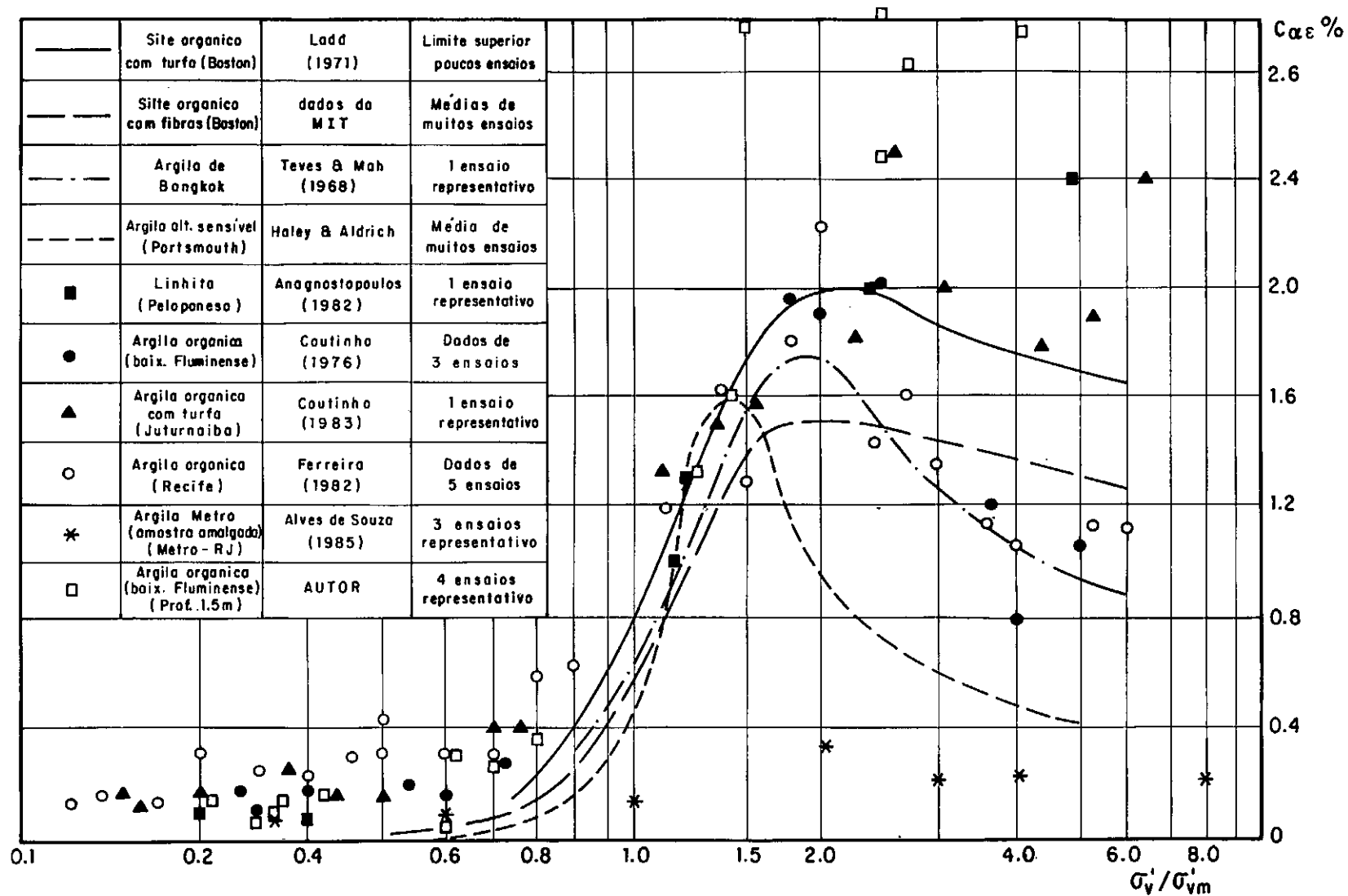


Figura III.9 - Variação do coeficiente de compressão secundária com a história de tensões

to. Sobre o assunto parece não haver um apanhado melhor do que o de JOHNSON (14). Um número limitado de ensaios (JOHNSON in MORAN et al (35)) indicam que dois efeitos estão associados ao carregamento temporário como indicado esquematicamente na Figura III.10. Esta figura apresenta os resultados correspondentes ao mesmo estágio de carga de quatro ensaios distintos de adensamento oedométrico. Num tempo t_{rc} (tempo de remoção de carga), maior que o tempo necessário ao adensamento primário (t_p), mantêm-se em um dos ensaios, a carga aplicada. Nos outros três ensaios, retiram-se também no tempo t_{rc} , diferentes parcelas da carga atuante. Para um período de tempo após a retirada parcial da carga, observa-se pouca ou nenhuma compressão secundária, ocorrendo eventualmente, um inchamento (que não está representado na Figura III.10). Decorrido certo período de tempo, a compressão secundária reaparece, agora porém com uma velocidade menor que a que ocorre com a amostra que não sofreu alívio de carga. O intervalo de tempo após o alívio da carga, durante o qual não há compressão secundária, é maior quanto maior for o valor da parcela de carga retirada, ou seja, quanto maior a razão de sobreadensamento. Além disso, quando a compressão secundária reaparece, o coeficiente de compressão secundária C_α é tanto menor quanto maior tiver sido o alívio de carga.

III.4.4 - Índice de Compressão

O coeficiente de compressão secundária é maior nos solos que apresentam maior índice de compressão e, dentre os solos com mesmo índice de compressão, têm C_α maior os solos que se situam abaixo da linha A do gráfico de plasticidade de Casa grande.

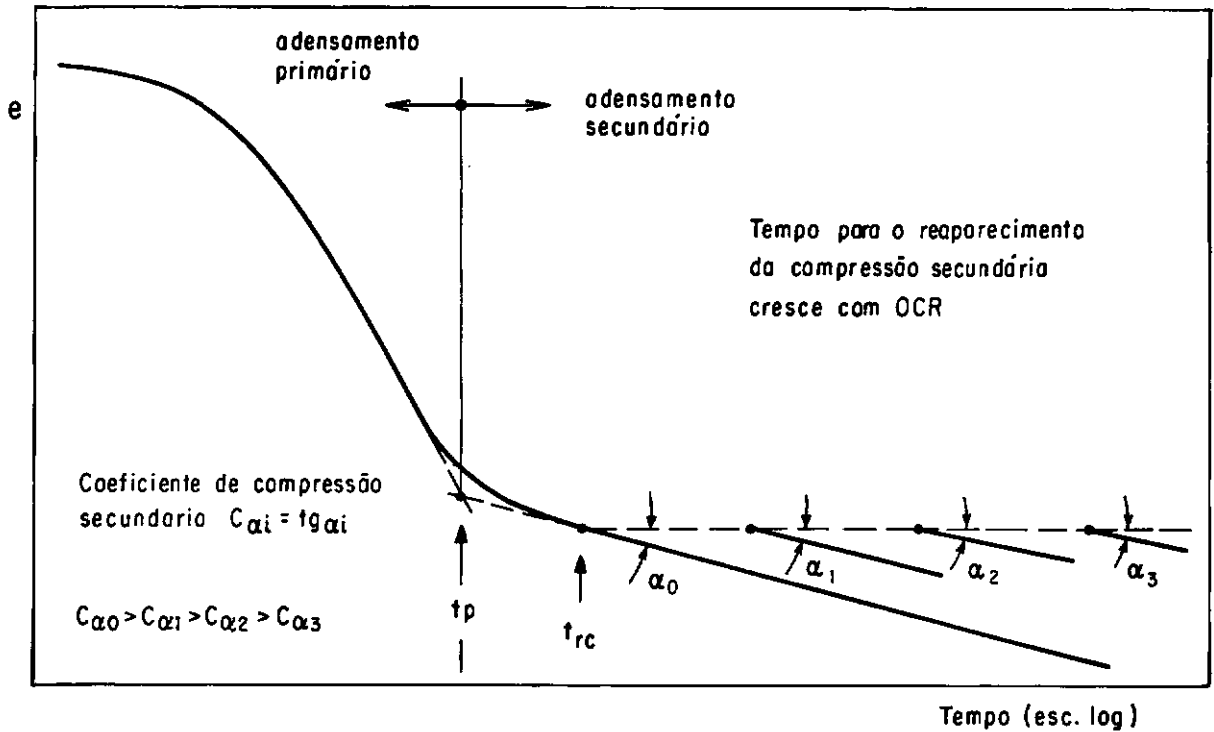


Figura III.10 - Efeito do alívio de carga sobre a compressão secundária em amostras no laboratório (JOHNSON (14))

III.4.5 - Amolgamento

O amolgamento de uma amostra modifica a estrutura do solo, estrutura esta que depende da composição e da físico-química dos solos. O amolgamento de forma geral, provoca o decréscimo do coeficiente de compressão secundária. Além disso, as amostras indeformadas estão sujeitas a uma maior compressão secundária que as amostras amolgadas. Observa-se que o coeficiente de compressão secundária de uma amostra amolgada cresce com a tensão efetiva até um determinado nível de tensão, onde, dependendo da composição do solo e da umidade, atinge um máximo decrescendo daí em diante e se aproximando dos valores de C_{α} da amostra indeformada.

III.4.6 - Duração de um Carregamento Anterior

Parece também haver concordância geral quanto à influência da duração de um estágio de carga sobre o valor do coeficiente de compressão secundária medido no estágio subsequente. A influência da duração do estágio de carga sobre o coeficiente de adensamento secundário é similar ao efeito provocado pela pré-compressão. Sabe-se que o adensamento secundário gera um efeito de sobreadensamento ("aging"). Esse efeito de sobreadensamento mostra-se através de uma falsa tensão de sobreadensamento conhecida pelo nome de tensão crítica (BJERRUM (4)) ou tensão de quasi-préadensamento (LEONARDS & ALTSCHAEFFL (24)). Se após o estágio de carga de longa duração o incremento de tensão for tal que não ultrapasse a tensão de quasi-préadensamento o coeficiente de compressão secundária será muito menor do que os correspondentes às tensões que ultrapassam a tensão de quasi-préadensamento.

III.4.7 - Tensões Cisalhantes

A presença de tensões cisalhantes segundo MESRI (31) influencia a velocidade da compressão secundária sem ser entretanto o fator que a governa. Parece, entretanto, não haver distinção nos comentários de MESRI (31) entre as diversas formas de carregamento.

LADD & PRESTON (20) estudando o problema, concluíram que estados de tensão (com simetria axial) em que as tensões cisalhantes são inferiores às existentes no adensamento oedométrico

trico terão pouco efeito na velocidade de compressão secundária.

KAVAZANJIAN & MITCHELL (15) e LACERDA & MARTINS (19) acreditam ser a existência de tensões cisalhantes a causa do fenômeno compressão secundária. Tais autores defendem ainda que no adensamento oedométrico as tensões cisalhantes devem se dissipar com o tempo fazendo com que o coeficiente de empuxo no repouso K_0 tenda a 1.

III.4.8 - Razão Incremental de Carregamento

A maioria dos pesquisadores parecem ser de opinião de que o coeficiente de compressão secundária é independente do incremento de tensão vertical ou da razão de incremento da tensão vertical. Na opinião de MESRI (31) a influência deste fator e mesmo da velocidade de carregamento precisa ser investigada. Esta é, aliás, uma questão importante especialmente no que tange à aplicação de ensaios de laboratório a problemas de campo onde a velocidade de carregamento e as condições de drenagem podem ser substancialmente diferentes das condições de laboratório.

III.4.9 - Temperatura

MITCHELL (34) na "The Rate Process Theory" prevê um aumento na velocidade de creep com o aumento da temperatura. Entretanto, poucos dados existem para a comprovação desta assertiva.

LADD (21) é de opinião que o aumento de temperatura provavelmente aumenta o coeficiente de compressão secundária C_α mas salienta que esse efeito é pequeno se comparado com outros fatores que influenciam C_α .

LO (26) indica que a temperatura pode alterar o formato das curvas de compressão secundária.

MESRI (31) analisando resultados obtidos por HABIBAGAH (11) ressalta que tem se dado mais importância à temperatura do que ela realmente merece. Para reforçar esta afirmativa apresenta dados obtidos a partir de uma amostra de argila moldada em laboratório em que o coeficiente de compressão secundária se mostra independente da temperatura. MESRI (31) descreve ainda que durante a compressão secundária num dos corpos de prova a temperatura foi elevada de 25°C para 50°C e então mantida por diversos dias. Houve uma compressão imediata mas, após poucos dias, o coeficiente de compressão secundária a 50°C atingiu o mesmo valor que possuía a 25°C. A única influência que a temperatura teve sobre a argila ensaiada foi a de acelerar o adensamento primário devido aparentemente à diminuição da viscosidade da água.

O autor é de opinião que mais estudos são necessários no sentido de melhor se conhecer a influência da temperatura sobre o adensamento secundário.

III.4.10 - Vibração

LO (26) apresenta dados de um ensaio de adensamen

to em que o efeito de vibração se mostra através de deslocamentos abruptos da curva de compressão. É interessante observar entretanto, que o formato da curva se mantém.

III.5 - CRÍTICAS À ABORDAGEM DO FENÔMENO DO ADENSAMENTO SECUNDÁRIO

As críticas às abordagens do adensamento secundário podem começar pela consideração isolada dos adensamentos primário e secundário, isto é, pelo fato de se admitir que o adensamento secundário só se inicia após o término do adensamento primário. Esta divisão é, além de arbitrária, inconsistente com a própria teoria do adensamento de Terzaghi & Frölich já que o adensamento primário tem duração infinita.

Outra crítica tão séria quanto a anterior diz respeito à constância de C_α como suposto por inúmeros autores. MESRI & GODLEWSKI (32) afirmam que em geral C_α permanece constante, de cresce ou aumenta com o tempo. Na verdade C_α tem que decrescer com o tempo. Além disso, $\lim_{t \rightarrow \infty} C_\alpha = 0$. Caso contrário existirá um tempo limite t_{lim} tal que para um tempo $t > t_{lim}$ o índice de vazios se torna negativo o que é absurdo.

BJERRUM (4) ao apresentar o fenômeno do envelhecimento das argilas (Figura III.11) já havia deixado explícito que C_α deveria decrescer com o tempo. Neste aspecto vale ainda lembrar que a Figura III.11 é consistente com o comportamento observado na Figura III.9. Isto porque um solo "envelhecido" tem comportamento semelhante a de um solo sobreadensado. Assim tanto na Figura III.9 como na Figura III.11 tanto um solo sobreadensado como um solo envelhecido apresentam baixos coeficientes

de compressão secundária.

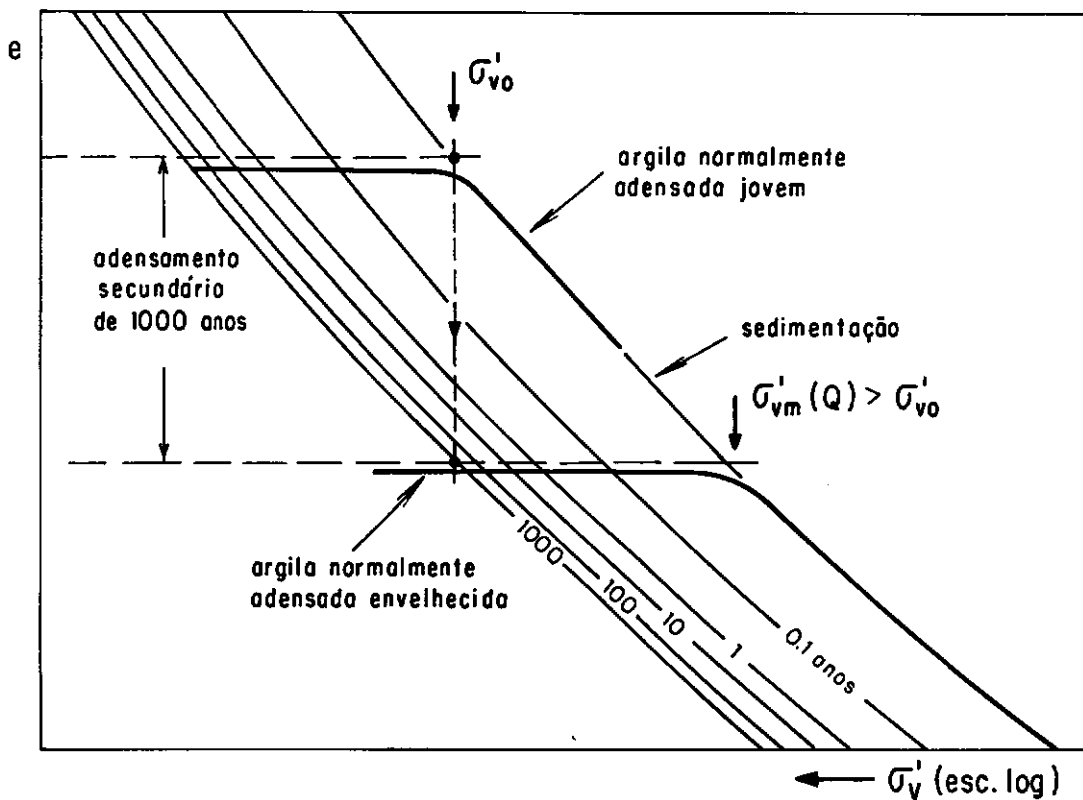


Figura III.11 - Efeito do envelhecimento sobre a compressão secundária (apud Bjerrum,)

Finalizando, é indiscutível a validade prática das abordagens descritas principalmente no que toca a dados para projeto. Entretanto, tais abordagens ficam aquém da que relaciona a compressão secundária ao crescimento do coeficiente de empuxo no repouso K_0 explicando e atribuindo o fenômeno à relaxação de tensões.

CAPÍTULO IV - COMPRESSÃO SECUNDÁRIA - UMA ABORDAGEM RACIONAL

IV.1 - INTRODUÇÃO

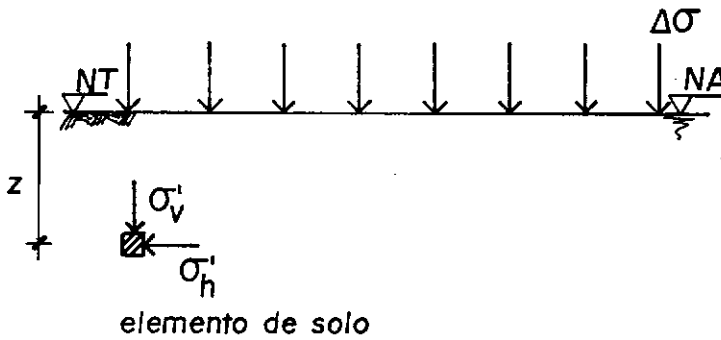
Observou-se no Capítulo III que apesar de existirem mecanismos que expliquem o fenômeno da compressão secundária em bases físicas tais mecanismos carecem de maior elaboração e consistência. Isto pode ser avaliado, por exemplo, ao se constatar que nenhum mecanismo prevê quando a compressão secundária cessa.

SCHMERTMANN (39) em artigo intitulado: "A Simple Question About Consolidation", pergunta o que ocorre durante o adensamento com o coeficiente de empuxo no repouso; cresce, diminui ou permanece constante? A julgar pelas respostas à pergunta, ALLAM & SRIDHARAN (1), McROBERTS (30), NAGARAJ (36) e SOYDEMIR (41) a pergunta continuou no ar. Ainda recentemente MARTINS (27) e KAVAZANJIAN & MITCHELL (14) apresentaram alguns argumentos que, aliados às evidências experimentais apresentadas por LACERDA (17), indicam que o fenômeno da compressão secundária está intimamente ligado ao aumento de K_0 com o tempo, possibilidade para a qual LACERDA (18) chamou atenção. Ultimamente, HSIEH & KAVAZANJIAN (13) e MESRI & CASTRO (33) apresentaram evidências experimentais sobre o crescimento de K_0 durante a compressão secundária. Esta idéia do crescimento de K_0 durante o adensamento secundário serviu como ponto básico para LACERDA & MARTINS (19) reunirem vários argumentos para idealizar o mecanismo que se passa a descrever.

IV.2 - COMPRESSÃO SECUNDÁRIA - MECANISMO DE LACERDA & MARTINS

Considere inicialmente o maciço de solo, normal

mente adensado, de superfície horizontal da Figura IV.1. Considerando o elemento de solo da Figura IV.1 e admitindo que durante



Condição inicial (imediatamente após o carregamento)

$$\sigma'_{vo} = \gamma' z$$

$$\sigma'_{ho} = K_{on} \sigma'_{vo}$$

Condição final (ao final do adensamento primário)

$$\sigma'_{vf} = \gamma' z + \Delta\sigma$$

$$\sigma'_{hf} = K_{on} \sigma'_{vf}$$

Figura IV.1 - Maciço normalmente adensado, de superfície horizontal submetido a um adensamento unidimensional

o adensamento primário o coeficiente de empuxo no repouso de um solo normalmente adensado (K_{on}) permaneça constante, o caminho de tensões efetivas correspondente ao adensamento primário do elemento de solo da Figura IV.1 está representado na Figura IV.2 pelo segmento AB sobre a reta K_{on} . Apresenta-se também na Figura IV.2 a reta K_f que representa os estados de ruptura.

Se por hipótese admitir-se que durante a compressão secundária K_o decresce, o caminho de tensões efetivas a ser seguido é BD, ou seja, a medida que a compressão secundária ocorre o maciço da Figura IV.1 adquire uma condição cada vez menos

estável o que parece absurdo. Restam então duas alternativas: ou o caminho fica estacionário em B com K_o constante ou desenvolve-se ao longo de BC já que σ'_{vf} permanece constante. As evidências experimentais LACERDA (17), HSIEH e KAVAZANJIAN (13), MESRI & CASTRO (33) levam a crer que o caminho de tensões efetivas a ser percorrido está sobre BC.

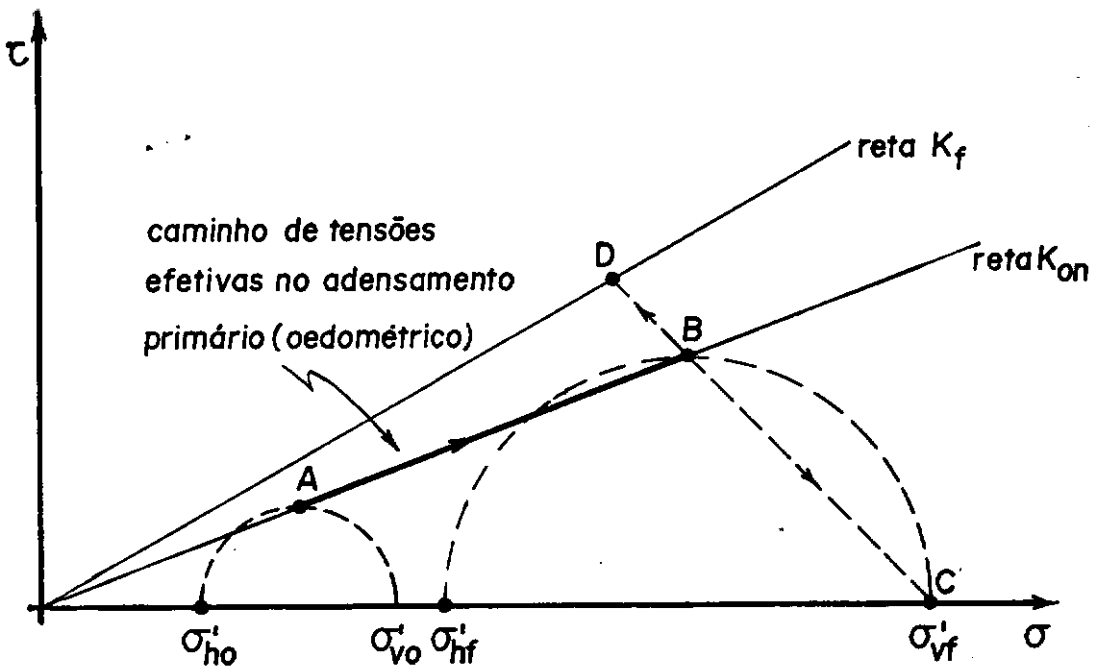


Figura IV.2 - Caminhos de tensões durante o adensamento unidimensional

Para explicar o mecanismo de compressão secundária como visto por LACERDA & MARTINS (19) considere o gráfico $\log \sigma'_v$ da Figura IV.3. Considerando que durante a compressão secundária a tensão vertical efetiva permanece constante e admitindo que toda compressão esteja associada a um aumento da tensão octaédrica efetiva (p') (o que é bastante razoável) o único meio de aumentar p' , provocando uma compressão adicional, seria através do aumento da tensão horizontal efetiva, ou seja, aumento de K_o ao longo da compressão secundária. Isto posto ter-se-ia, na Fi-

ra IV.3 $\sigma'_{vB} \equiv \sigma'_{vC}$ e $\sigma'_{hB} < \sigma'_{hC}$ e, como consequência $p'_C > p'_B$. Esta consideração é muito interessante pois permite que o fenômeno da compressão secundária seja também abrangido, o que não era feito até então, pelo princípio das tensões efetivas.

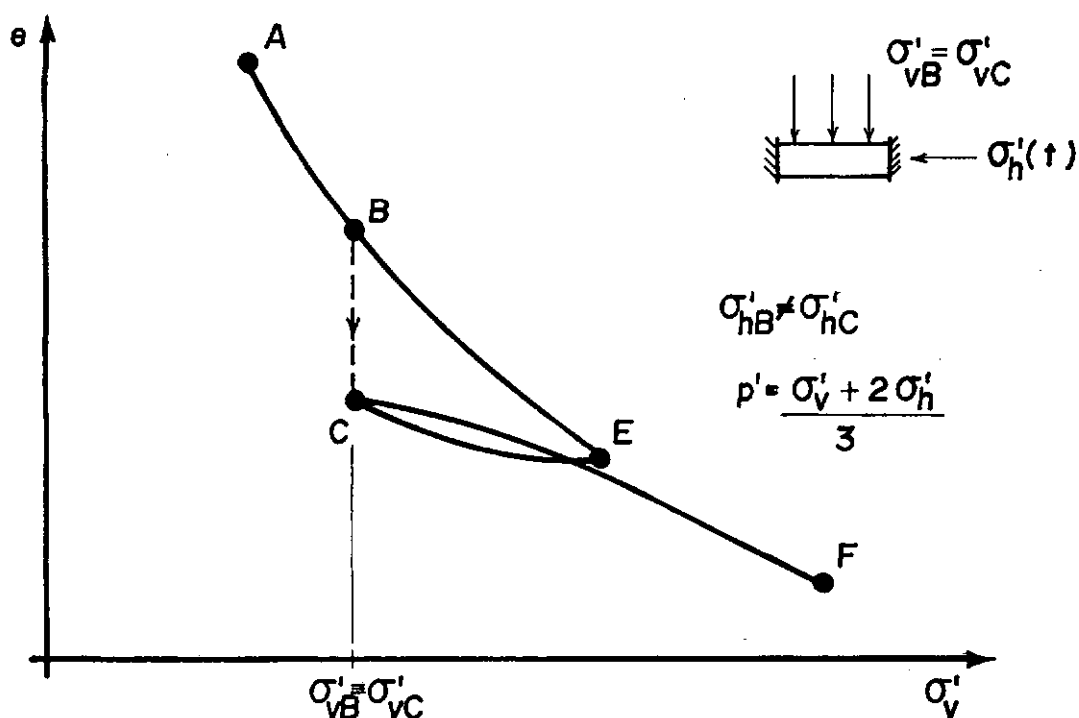


Figura IV.3 - Representação da compressão secundária no ensaio oedométrico

Numa descrição mecânica simplista LACERDA & MARTINS (18) chamam atenção para o fato de que no adensamento unidimensional de argilas normalmente adensadas, como $K_{on} < 1$ há em qualquer plano (com exceção dos horizontal e vertical), tensões cisalhantes. Essas tensões cisalhantes são, em última instância, o somatório das componentes segundo o plano considerado das forças de contato intergranulares por unidade de área. Imagina-se que, a longo prazo, as ligações entre partículas não suportam as forças cisalhantes nos contatos. Com isso, as tensões cisalhantes ao longo de todos os planos da massa de solo vão se dissipando e

tendendo a zero com o tempo. Isso faz com que a tensão horizontal efetiva σ'_h aumentem ou ainda, que a tensão desviadora ($\sigma'_v - \sigma'_h$) diminua, fenômeno conhecido como relaxação de tensões. Disso se poderia concluir que o fenômeno cessa quando $\sigma'_v = \sigma'_h$, ou seja, $K_o = 1$ com o que também estão de acordo KAVAZANJIAN & MITCHEL(15). Nesse caso, o caminho de tensões efetivas correspondente à compressão secundária estaria representado na Figura IV.2 pelo trecho BC.

Um argumento que vem em apoio ao mecanismo descrito acima pode ser melhor apresentado observando-se novamente a Figura IV.3. Partindo-se do ponto A uma outra alternativa para se atingir o ponto C seria permitir o adensamento até o ponto E e depois um descarregamento até C. Neste caso seria gerada uma razão de sobreadensamento com conseqüente aumento de K_o , fenômeno amplamente conhecido em Mecânica dos Solos.

A argumentação pode ainda ser enriquecida com uma modificação da Figura III.11 de Bjerrum apresentada na Figura IV.4. Nesta Figura, de acordo com o que foi exposto, aparece uma curva limite de compressão secundária correspondente a um tempo infinito e para a qual $K_o = 1$.

A Figura IV.4 mostra ainda que a medida que a compressão secundária ocorre o coeficiente de compressão secundária C_α diminui tendendo a zero quando o tempo tende a infinito ao passo que K_o tende a 1. Com esta análise LACERDA & MARTINS (19) introduziram mais um eixo na Figura IV.4 para produzir a Figura IV.5 onde podem ser representadas tanto a Figura IV.3 como a Figura IV.4.

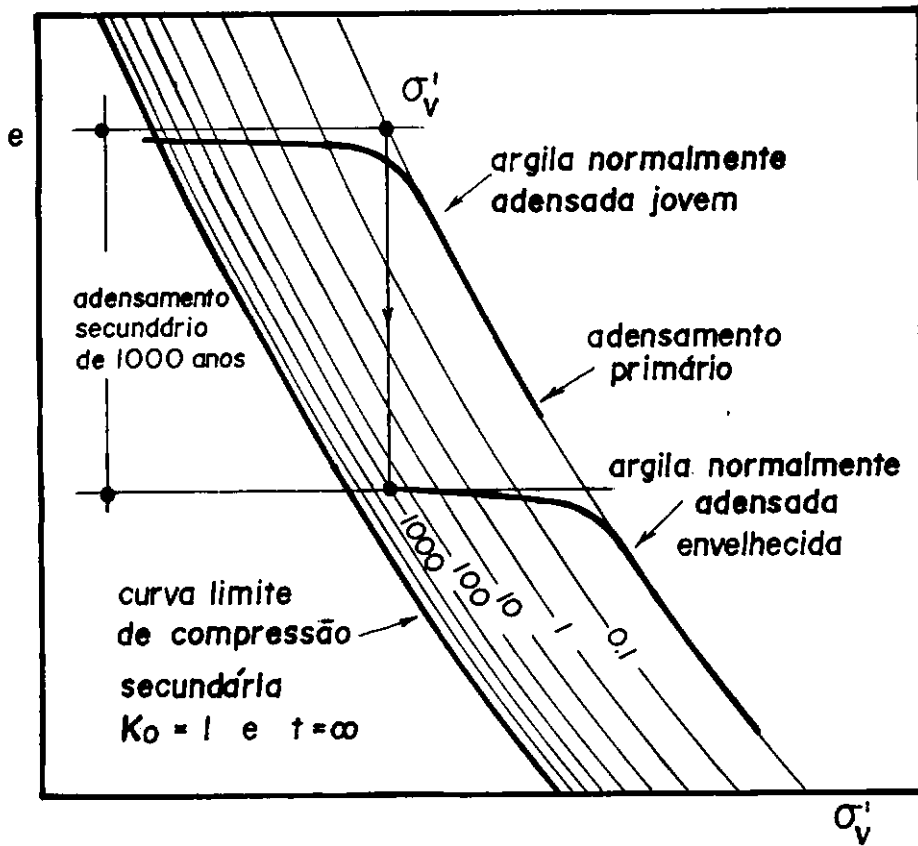


Figura IV.4 - Complementação da Figura de Bjerrum

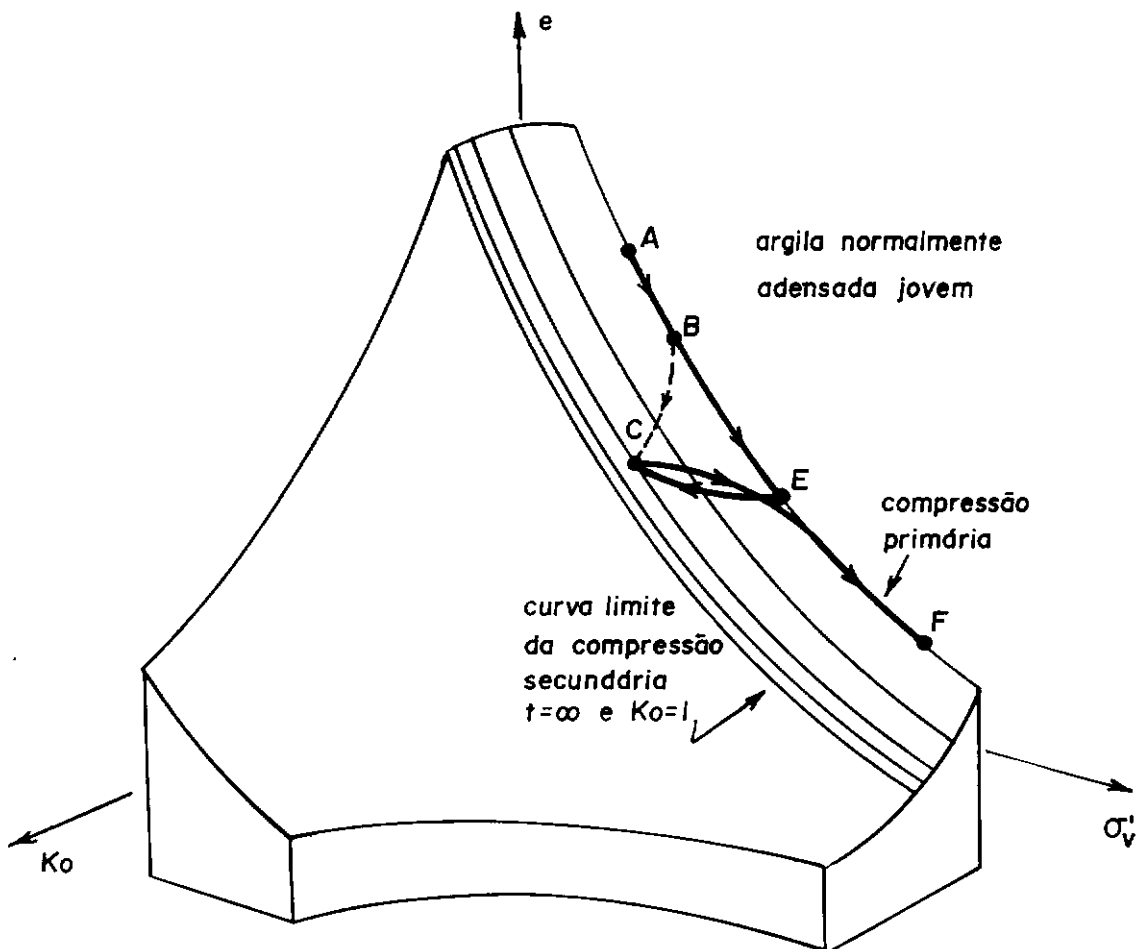


Figura IV.5 - Relação $e \times \sigma'_v \times K_0$ segundo LACERDA & MARTINS (19)

Deve-se observar que a projeção das curvas da Figura IV.5 sobre o plano $e \times \sigma'_v$ reproduzem a Figura IV.4.

Nessa argumentação não se pode esquecer ainda que, independentemente de se ter um sobreadensamento verdadeiro ou falso ("aging") K_0 cresce com OCR ao passo que C_α decresce com OCR o que vem tornar mais consistente o mecanismo idealizado e justificar a possibilidade da relação mostrada na Figura IV.5.

Finalmente, não se pode deixar de mencionar que muitas vezes pode-se gerar um OCR tal que $K_0 > 1$. Nesse caso, o mecanismo proposto prevê uma diminuição de σ'_h com consequente expansão secundária do corpo de prova. Assim sendo a linha do gráfico $e \times \sigma'_v$ correspondente a $K_0 = 1$ será o lugar geométrico dos pontos que representam estados estáveis. Isto permite adicionar à Figura IV.4 as curvas que representariam a região de expansão como na Figura IV.6.

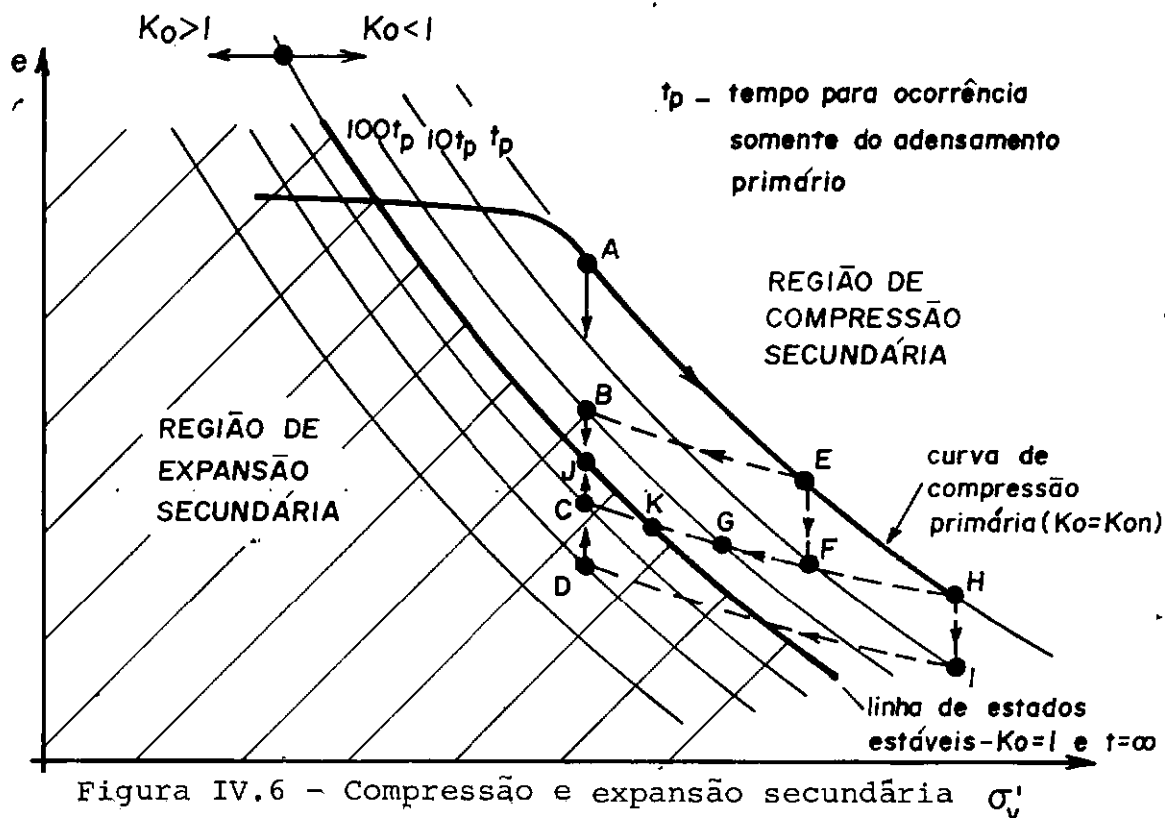


Figura IV.6 - Compressão e expansão secundária σ'_v

Observa-se na Figura IV.6 que com a curva $\epsilon \times \sigma'_v$ correspondente à $K_0 = 1$ o plano $\epsilon \times \sigma'_v$ fica dividido em duas regiões, uma em que $K_0 < 1$ onde há compressão secundária e outra com $K_0 > 1$ onde há expansão secundária.

Observa-se também que, de acordo com o mecanismo idealizado, as velocidades de compressão ou expansão secundária são proporcionais à distância do ponto (ϵ, σ'_v) à linha de estados estáveis. Assim nos estados representados pelos pontos A, E e H as velocidades de compressão secundária serão maiores que as dos estados F e I que por sua vez são maiores que as velocidades nos pontos B e G até que no ponto J a velocidade se anula. A Figura IV.6 deixa claro também que a velocidade da compressão ou expansão secundária não é só função da razão de sobreadensamento OCR. Segundo o mecanismo proposto espera-se que a velocidade de expansão secundária no ponto D seja maior do que no ponto C embora ambos os estados estejam com o mesmo OCR.

Deve-se chamar a atenção para o fato de que a Figura IV.6 é consistente com os resultados de descarregamento descritos por JOHNSON (14). Imagine uma compressão primária se processando de A até E seguido de uma compressão secundária EF e posterior descarregamento até o ponto G. Segundo JOHNSON (14) (ver Figura III.10) após a expansão primária, correspondente à diferença de ordenadas dos pontos F e G, decorre um tempo (que se é tentado a imaginar como sendo igual à 90 tp) ao fim do qual retorna a compressão secundária agora com uma velocidade menor, correspondente ao estado no ponto G. Uma extrapolação do raciocínio conduziria a um descarregamento onde a compressão secundária seria nula como, por exemplo, o descarregamento HK.

Finalmente, não se pode deixar de ressaltar que segundo a Figura IV.6 a compressão secundária torna-se mais importante quanto menor for a relação entre as tensões verticais efetivas final e inicial.

Este mecanismo foi traduzido matematicamente por MARTINS & LACERDA (28) numa Teoria do Adensamento com compressão secundária.

IV.3 - TEORIA DO ADENSAMENTO COM COMPRESSÃO SECUNDÁRIA

No caso do ensaio oedométrico ao final do adensamento primário a tensão vertical efetiva (σ'_v) torna-se constante. Se as tensões cisalhantes tendem a se dissipar isso acontecerá gerando aumento da tensão efetiva horizontal σ'_h o que significa dizer que o coeficiente de empuxo no repouso K_0 deve crescer até 1. Atingido o valor 1 não existirão mais tensões cisalhantes e o fenômeno cessará.

Deve-se ressaltar que de acordo com o mecanismo exposto, o aumento de σ'_h decorre da dissipação das tensões cisalhantes, fenômeno conhecido como relaxação de tensões. Assim sendo, é de se esperar que a velocidade de dissipação das tensões cisalhantes ou da tensão desviadora ($\sigma_1 - \sigma_3$) seja proporcional ao seu valor corrente. De acordo com este processo a expectativa é a de que a tensão desviadora diminua gradativamente o mesmo acontecendo com sua velocidade de dissipação até que ambas, a tensão desviadora e a velocidade da relaxação, se tornem nulas e o fenômeno cesse o que de acordo com este mecanismo, deve acontecer somente a um tempo infinito.

Cabe, aqui, fazer duas observações importantes. A primeira conduz à conclusão de que se o fenômeno é devido à existência de tensões cisalhantes ele deve ocorrer, ainda que em menor escala, também durante o adensamento primário. Isto está ilustrado na Figura IV.2 onde se vê que a medida em que o adensamento se processa, aumenta a tensão desviadora. Esta argumentação explicaria o porque do adensamento secundário se manifestar de forma mais marcante ao "final do primário". A segunda diz respeito ao fato de que com essa abordagem o fenômeno da compressão secundária se enquadraria dentro do princípio das tensões efetivas.

Antes de entrar no desenvolvimento da teoria é conveniente definir

$$p' = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (\text{IV.1})$$

e

$$q = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \quad (\text{IV.2})$$

Pode-se admitir, sem perda de generalidade, que no caso do adensamento oedométrico $\sigma'_1 = \sigma'_v$ (tensão vertical efetiva) e $\sigma'_3 = \sigma'_h$ (tensão horizontal efetiva). Sabe-se também que, nesse caso, por definição

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (\text{IV.3})$$

o que permite escrever

$$p' = \frac{\sigma'_v (1 + 2 K_o)}{3} \quad (\text{IV.4})$$

e

$$q = \frac{\sigma'_v (1 - K_o)}{2} \quad (\text{IV.5})$$

Admitem-se como hipóteses que o solo seja isotrôpico e há uma relaxação (dissipação) das tensões cisalhantes com o tempo. Admite-se, também, que tal relaxação se dá de tal forma que a taxa de variação da tensão desviadora no tempo seja proporcional ao valor corrente da tensão desviadora. Com isso escreve-se

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda q \quad (\text{IV.6})$$

sendo λ uma constante de proporcionalidade, que depende do solo e que controla a velocidade da compressão secundária.

Diz o princípio das tensões efetivas que a cada variação de volume está associada uma variação do estado de tensões efetivas. De acordo com a hipótese que admite isotropia pode-se escrever

$$\epsilon_v = \frac{\Delta p'}{M'} \quad (\text{IV.7})$$

onde o símbolo Δ significa variação, ϵ_v deformação volumétrica específica e M o módulo de compressibilidade volumétrica.

Como no ensaio oedométrico p' varia com o tempo pode-se derivar a expressão IV.4 em relação ao tempo e

$$\frac{dp'}{dt} = \frac{\partial p'}{\partial \sigma'_v} \frac{d\sigma'_v}{dt} + \frac{\partial p'}{\partial K_o} \frac{dK_o}{dt} \quad (\text{IV.8})$$

Usando agora a equação (IV.5) e lembrando que durante o adensamento $\sigma'_v = \sigma'_v(t)$ e $K_o = K_o(t)$ escreve-se

$$q(t) = \frac{\sigma'_v(t) [1 - K_o(t)]}{2} \quad (\text{IV.9})$$

A variação de q com o tempo é dada por

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\partial q}{\partial \sigma'_v} \frac{d\sigma'_v}{dt} + \frac{\partial q}{\partial K_o} \frac{dK_o}{dt} \quad (\text{IV.10})$$

ou seja,

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{2} \left[(1 - K_o(t)) \frac{d\sigma'_v}{dt} - \sigma'_v(t) \frac{dK_o}{dt} \right] \quad (\text{IV.10a})$$

Igualando-se IV.6 e IV.10a obtêm-se

$$\frac{1}{\sigma'_v} \frac{d\sigma'_v}{dt} + \lambda = \frac{1}{1 - K_o} \frac{dK_o}{dt} \quad (\text{IV.11})$$

Lembrando, entretanto que $\frac{1}{f} \frac{df}{dx} = \frac{d(\ln f)}{dx}$ pode-se reescrever IV-11 como

$$\frac{d (\ln \sigma'_v)}{dt} + \lambda = \frac{-d [\ln (1 - K_o)]}{dt} \quad (\text{IV.12})$$

que integrada fica

$$-\left\{ \ln [1 - K_o(t)] - \ln [1 - K_o(0)] \right\} = \ln \sigma'_v(t) - \ln \sigma'_v(0) + \lambda t \quad (\text{IV.13})$$

Chamando $K_o(0) = K_{on}$ e $\sigma'_v(0) = \sigma'_{vo}$ a eq. (IV.13) pode ser reescrita como

$$\frac{\sigma'_v(t) [1 - K_o(t)]}{\sigma'_{vo} [1 - K_{on}]} = e^{-\lambda t} \quad (\text{IV.14})$$

Observar que quando $t=0$, $\sigma'_v = \sigma'_{vo}$ e $K_o(t) = K_{on}$ e que para $t = \infty$, $K_o = 1$.

Para resolver a eq. IV.8 é preciso determinar $\frac{dK_o}{dt}$ o que pode ser feito através da eq. IV.14. Assim

$$\frac{dK_o}{dt} = \lambda [1 - K_o(t)] + \frac{[1 - K_o(t)]}{\sigma'_v(t)} \frac{d\sigma'_v}{dt} \quad (\text{IV.15})$$

A eq. IV.8 pode ser escrita, explicitando suas derivadas como

$$\frac{dp'}{dt} = \frac{1}{3} \left[(1 + 2 K_o) \frac{d\sigma'_v}{dt} + 2 \sigma'_v \frac{dK_o}{dt} \right] \quad (\text{IV.16})$$

Substituindo o resultado de (IV.15) em (IV.16) vem

$$\frac{dp'}{dt} = \frac{d\sigma'_v}{dt} + \frac{2}{3} \lambda \sigma'_{vo} (1 - K_{on}) e^{-\lambda t} \quad (IV.17)$$

Integrando-se (IV.17) obtêm-se

$$p'(t) - p'(0) = \sigma'_v(t) - \sigma'_v(0) + \frac{2}{3} \sigma'_{vo} (1 - K_{on}) \left[1 - e^{-\lambda t} \right] \quad (IV.18)$$

Usando agora a equação (IV.7) pode-se expressar a deformação volumétrica ϵ'_v ao longo do tempo como

$$\epsilon'_v(t) = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{vo}}{M'} + \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{vo}}{M'} (1 - K_{on}) \left[1 - e^{-\lambda t} \right] \quad (IV.19)$$

Na equação (IV.19) podem ser identificadas duas parcelas de deformação volumétrica. A primeira está associada ao adensamento primário e pode ser escrita como

$$\epsilon_{vp}(t) = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{vo}}{M'} \quad (IV.20)$$

Ora, a parcela devida ao adensamento primário pode ser calculada pela teoria de Terzaghi e Frölich e, portanto, a equação 20 pode ser reescrita como (ver por exemplo Taylor p. 208-249).

$$\epsilon_{vp}(t) = \frac{\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}}{M'} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \left[\text{sen} (2n+1) \frac{\pi}{2} \frac{z}{H} \right] \cdot e^{\frac{-\pi^2 (2n+1)^2 T_v}{4}} \right\} \quad (IV.21)$$

onde (ver Figura IV.7),

σ'_{vf} - tensão vertical efetiva ao final do adensamento

z - distância ao topo da camada que adensa

$2H$ - espessura da camada que adensa

T_v - fator tempo

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (\text{IV.22})$$

sendo c_v o coeficiente de adensamento da teoria de Terzaghi & Frölich.

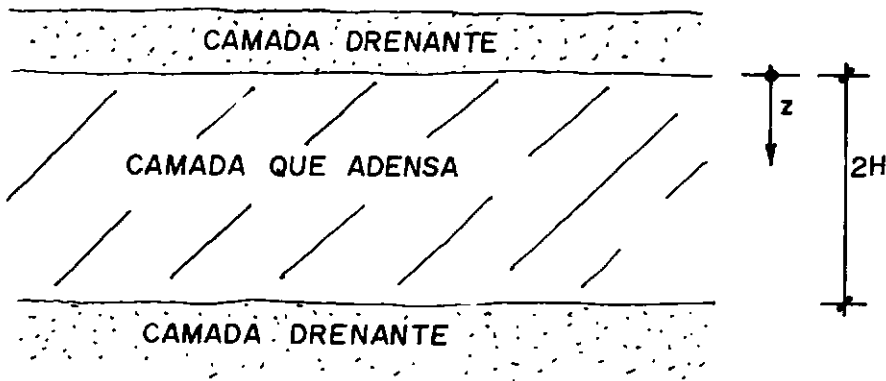


Figura IV.7 - Significado de alguns símbolos da Eq. IV.21

A segunda parcela que independe de z , está associada ao adensamento secundário e pode ser escrita por

$$\epsilon_{vs}(t) = \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{vo}}{M'} (1 - K_{on}) (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{IV.23})$$

Pode-se compreender melhor o desdobramento da Eq. IV.19 observando-se a Figura IV.8.

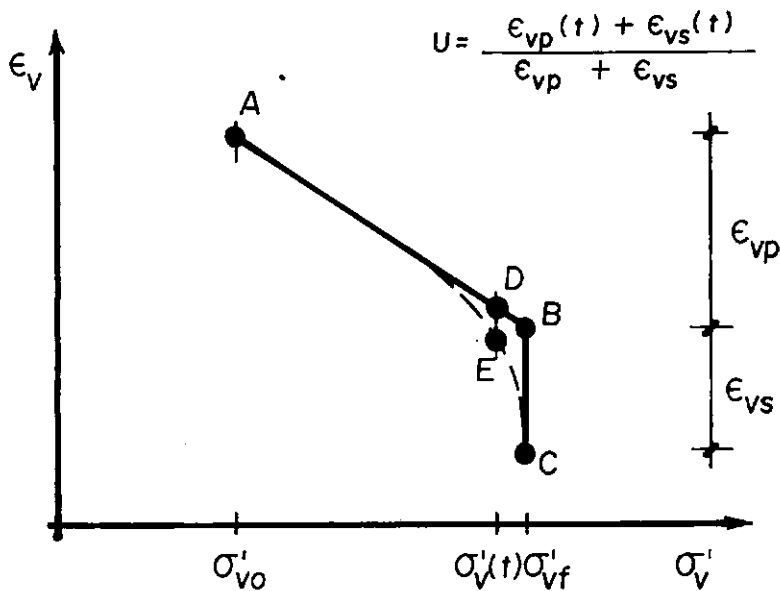


Figura IV.8 - Divisão esquemática da compressão

De acordo com o mecanismo idealizado os fenômenos dos adensamentos primário e secundário ocorrem simultaneamente. Com isso, o caminho a ser percorrido na Figura IV.8 provavelmente deve ser AEC e não ABC.

A deformação volumétrica total correspondente ao adensamento primário é representada na Figura IV.8 por ϵ_{vp} e dada por:

$$\epsilon_{vp} = \frac{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}}{M'} \quad (IV.24)$$

A deformação volumétrica total correspondente ao adensamento secundário é representada na Figura IV.8 por ϵ_{vs} e dada por

$$\epsilon_{vs} = \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{vo}}{M'} (1 - K_{on}) \quad (IV.25)$$

Num instante t qualquer do processo (ponto E da Figura IV.8) de fine-se a porcentagem de adensamento primário U_{zp} como

$$U_{zp} = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}} = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{vo}}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}} = \frac{\epsilon_{vp}(t)}{\epsilon_{vp}} \quad (IV.26)$$

De forma análoga, no ponto E (Figura IV.8) a porcentagem de adensamento secundário U_{zs} é definido como

$$U_{zs} = \frac{\overline{DE}}{\overline{BC}} = \frac{\epsilon_{vs}(t)}{\epsilon_{vs}} \quad (IV.27a)$$

e que de acordo com (IV.23) e (IV.25) pode ser reescrita como

$$U_{zs} = 1 - e^{-\lambda t} \quad (IV.27b)$$

Isto posto, define-se a porcentagem de adensamento global U_z como

$$U_z = \frac{\epsilon_{vp}(t) + \epsilon_{vs}(t)}{\epsilon_{vp} + \epsilon_{vs}} \quad (IV.28)$$

ou seja,

$$U_z(z, t) = \frac{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N} \left(\text{sen } \frac{NZ}{H} \right) e^{-N^2 T_V} \right] + \frac{2}{3} \sigma'_{vo} (1 - K_{on}) (1 - e^{-\lambda t})}{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}) + \frac{2}{3} \sigma'_{vo} (1 - K_{on})} \quad (IV.29)$$

sendo $N = \frac{\pi}{2} (2n + 1)$.

A porcentagem média de adensamento será dada por

$$U = \frac{\frac{1}{2H} \int_0^{2H} \epsilon_v(z, t) dz}{\frac{1}{2H} \int_0^{2H} \epsilon_v(z, \infty) dz} \quad (\text{IV.30})$$

Substituindo-se na Eq. (IV.30) as expressões de $\epsilon_v(z, t)$ e $\epsilon_v(z, \infty)$ para o caso particular em que $\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}$ é constante ao longo da camada e integrando obtém-se:

$$U = \frac{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} e^{-N^2 T_v} \right] + \frac{2}{3} \sigma'_{vo} (1 - K_{on}) (1 - e^{-\lambda t})}{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{vo}) + \frac{2}{3} \sigma'_{vo} (1 - K_{on})} \quad (\text{IV.31})$$

Lembrando que $T_v = \frac{c_v t}{H^2}$, pode-se fazer $\lambda t = \theta T_v$ e dividir nu numerador e denominador de IV.31 por σ'_{vo} para finalmente obter

$$U = \frac{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} e^{-N^2 T_v} \right] + \frac{2}{3} (1 - K_{on}) (1 - e^{-\theta T_v})}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{on})} \quad (\text{IV.32})$$

Examinando a Eq. (IV.32) observa-se que ela pode ser desdobrada em duas parcelas. Uma correspondente à compressão primária dada por

$$U_p = \frac{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} e^{-N^2 T_v} \right]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{on})} \quad (IV.33)$$

e uma correspondente à compressão secundária dada por

$$U_s = \frac{\frac{2}{3} (1 - K_{on}) (1 - e^{-\theta T_v})}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vo}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{on})} \quad (IV.34)$$

Examinando (IV.33) e (IV.34) conclui-se que, de acordo com a formulação apresentada, a compressão secundária será tão menor quanto maior a relação $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$. Quando $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ tende a infinito U_s tende a zero e a (IV.33) se transforma na conhecida solução de Terzaghi. Observa-se também que quanto mais próximo de 1 for o valor de K_{on} menor será a compressão secundária.

Apresentam-se na Figura (IV.9) para efeito comparativo, curvas $U \times T_v$ para quatro valores da relação $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ e um determinado par de valores de θ e K_{on} . Apresentam-se na Figura (IV.10) curvas $U \times T_v$ para as quais se fez variar o valor de θ mantendo-se constante o valor de K_{on} . Observa-se na Figura (IV.10) que o parâmetro θ regula o tempo em que a compressão secundária se manifesta funcionando de forma semelhante ao coeficiente de adensamento c_v .

Nas Tabelas IV.1 a IV.12 apresentam-se valores numéricos de U_p , U_s e U para diversos valores de T_v , θ , K_{on} e $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$. Estas tabelas tem a finalidade de facilitar a determinação dos parâmetros c_v e θ .

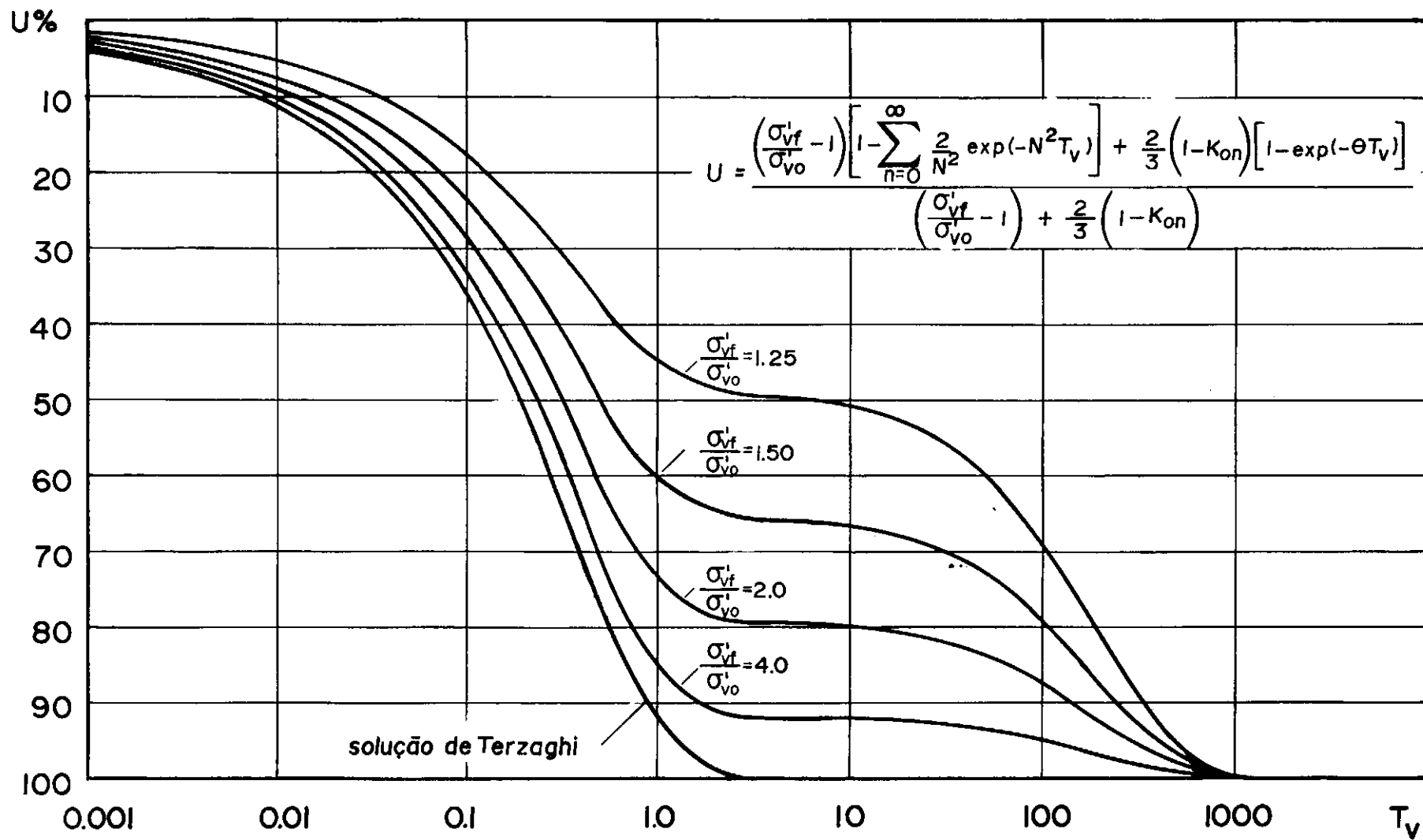


Fig.IV.9 Curvas $U \times T_v$ para diferentes valores $\sigma'_{vf} / \sigma'_{vo}$, $K_{on} = 0.6$ e $\Theta = 0.005$

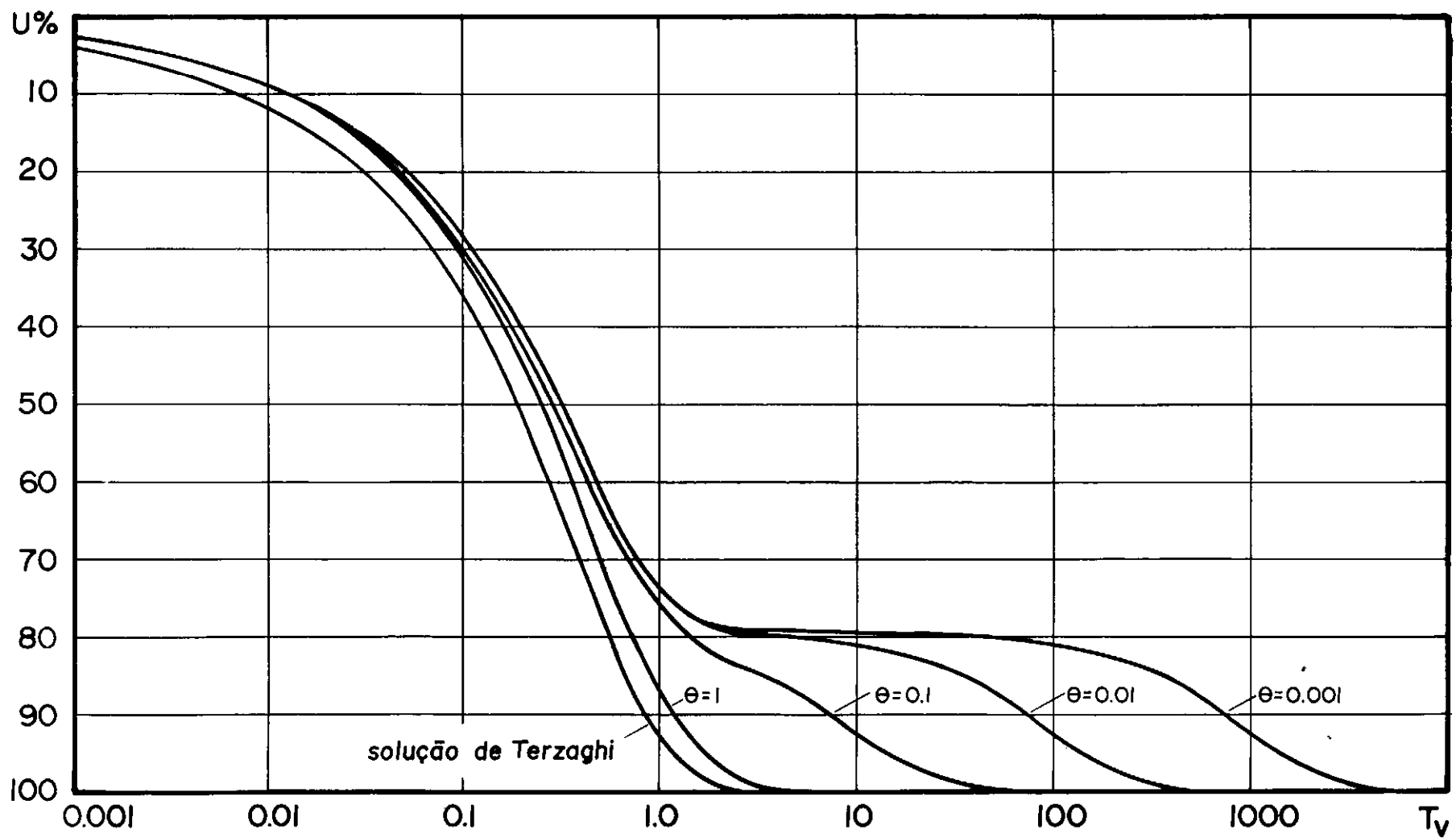


Fig. IV.10 Curvas $U \times T_v$ para diferentes valores de θ , $K_{on} = 0.6$ e $\sigma'_{vf} / \sigma'_{v0} = 2$

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	1.6	0.0	1.6	0.0	1.6	0.0	1.6	0.0	1.6
0.002	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2
0.004	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1
0.006	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8
0.008	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3
0.01	4.8	0.0	4.8	0.0	4.8	0.0	4.8	0.0	4.8
0.02	6.8	0.0	6.8	0.0	6.8	0.0	6.8	0.0	6.9
0.04	9.7	0.0	9.7	0.0	9.7	0.0	9.7	0.0	9.7
0.06	11.8	0.0	11.8	0.0	11.8	0.0	11.9	0.0	11.9
0.08	13.7	0.0	13.7	0.0	13.7	0.0	13.7	0.0	13.7
0.1	15.3	0.0	15.3	0.0	15.3	0.0	15.3	0.1	15.3
0.2	21.6	0.0	21.6	0.0	21.6	0.1	21.7	0.1	21.7
0.4	29.9	0.0	29.9	0.0	29.9	0.1	30	0.2	30.1
0.6	35.0	0.0	35.0	0.0	35.0	0.2	35.1	0.3	35.3
0.8	38.0	0.0	38.1	0.0	38.1	0.2	38.3	0.5	38.5
1.0	39.9	0.0	39.9	0.1	40.0	0.3	40.2	0.6	40.5
2.0	42.6	0.1	42.7	0.1	42.7	0.6	43.2	1.1	45.1
4.0	42.9	0.1	43.0	0.2	43.1	1.1	44.0	2.2	45.1
6.0	42.9	0.2	43.0	0.3	43.2	1.7	44.5	3.3	46.2
8.0	42.9	0.2	43.1	0.5	43.3	2.2	45.1	4.4	47.3
10	42.9	0.3	43.2	0.6	43.5	2.8	45.6	5.4	48.3
20	42.9	0.6	43.5	1.1	44.0	5.4	48.3	10.4	53.2
40	42.9	1.1	44.0	2.2	45.1	10.4	53.2	18.8	61.7
80	42.9	2.2	45.1	4.4	47.3	18.8	61.7	31.5	74.3
100	42.9	2.8	45.6	5.4	48.3	22.5	65.3	36.1	79.0
200	42.9	5.4	48.3	10.4	53.2	36.1	79.0	49.4	92.3
400	42.9	10.4	53.2	18.8	61.7	49.4	92.3	56.1	99.0
800	42.9	18.8	61.7	31.5	74.3	56.1	99.0	57.1	100
1000	42.9	22.5	65.3	36.1	79.0	56.8	99.6	57.1	100
2000	42.9	36.1	79.0	49.4	92.3	57.1	100	57.1	100
4000	42.9	49.4	92.3	56.1	99.0	57.1	100	57.1	100
8000	42.9	56.1	99.0	57.1	100	57.1	100	57.1	100

Tabela IV.1 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.25$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.50

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	1.7	0.0	1.7	0.0	1.7	0.0	1.7	0.0	1.7
0.002	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3
0.004	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3
0.006	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0
0.008	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6
0.01	5.1	0.0	5.1	0.0	5.1	0.0	5.1	0.0	5.1
0.02	7.3	0.0	7.3	0.0	7.3	0.0	7.3	0.0	7.3
0.04	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3
0.06	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6
0.08	14.5	0.0	14.5	0.0	14.5	0.0	14.5	0.0	14.6
0.1	16.2	0.0	16.2	0.0	16.2	0.0	16.2	0.1	16.3
0.2	22.9	0.0	22.9	0.0	22.9	0.1	23.0	0.1	23.0
0.4	31.7	0.0	31.7	0.0	31.7	0.1	31.8	0.2	31.9
0.6	37.1	0.0	37.1	0.0	37.1	0.2	37.2	0.3	37.4
0.8	40.3	0.0	40.4	0.0	40.4	0.2	40.6	0.4	40.8
1.0	42.3	0.0	42.4	0.1	42.4	0.3	42.6	0.5	42.9
2.0	45.2	0.1	45.2	0.1	45.3	0.5	45.7	1.1	46.3
4.0	45.5	0.1	45.6	0.2	45.7	1.1	46.5	2.1	47.6
6.0	45.5	0.2	45.6	0.3	45.8	1.6	47.1	3.2	48.6
8.0	45.5	0.2	45.7	0.4	45.9	2.1	47.6	4.2	49.6
10	45.5	0.3	45.7	0.5	46.0	2.7	48.1	5.2	50.6
20	45.5	0.5	46.0	1.1	46.5	5.2	50.6	9.9	55.3
40	45.5	1.1	46.5	2.1	47.6	9.9	55.3	18.0	63.4
80	45.5	2.1	47.6	4.2	49.6	18.0	63.4	30.0	75.5
100	45.5	2.7	48.1	5.2	50.6	21.5	66.9	34.5	79.9
200	45.5	5.2	50.6	9.9	55.3	34.5	79.9	47.2	92.6
400	45.5	9.9	55.3	18.0	63.4	47.2	92.6	53.5	99.0
800	45.5	18.0	63.4	30.0	75.5	53.5	99.0	54.5	100
1000	45.5	21.5	66.9	34.5	79.9	54.2	99.6	54.5	100
2000	45.5	34.5	79.9	47.2	92.6	54.5	100	54.5	100
4000	45.5	47.2	92.6	53.5	99.0	54.5	100	54.5	100
8000	45.5	53.5	99.0	54.5	100	54.5	100	54.5	100

Tabela IV.2 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.25$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.55

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	1.8	0.0	1.8	0.0	1.8	0.0	1.8	0.0	1.8
0.002	2.5	0.0	2.5	0.0	2.5	0.0	2.5	0.0	2.5
0.004	3.5	0.0	3.5	0.0	3.5	0.0	3.5	0.0	3.5
0.006	4.2	0.0	4.2	0.0	4.2	0.0	4.2	0.0	4.2
0.008	4.9	0.0	4.9	0.0	4.9	0.0	4.9	0.0	4.9
0.01	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5
0.02	7.7	0.0	7.7	0.0	7.7	0.0	7.7	0.0	7.7
0.04	10.9	0.0	10.9	0.0	10.9	0.0	10.9	0.0	10.9
0.06	13.4	0.0	13.4	0.0	13.4	0.0	13.4	0.0	13.4
0.08	15.4	0.0	15.4	0.0	15.4	0.0	15.5	0.0	15.5
0.1	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3
0.2	24.4	0.0	24.4	0.0	24.4	0.0	24.4	0.1	24.5
0.4	33.8	0.0	33.8	0.0	33.8	0.1	33.9	0.2	34.0
0.6	39.5	0.0	39.5	0.0	39.5	0.2	39.6	0.3	39.8
0.8	42.9	0.0	43.0	0.0	43.0	0.2	43.1	0.4	43.4
1.0	45.1	0.0	45.1	0.1	45.1	0.3	45.3	0.5	45.6
2.0	48.1	0.1	48.2	0.1	48.2	0.5	48.6	1.0	49.1
4.0	48.4	0.1	48.5	0.2	48.6	1.0	49.4	2.0	50.4
6.0	48.4	0.2	48.6	0.3	48.7	1.5	49.9	3.0	51.4
8.0	48.4	0.2	48.6	0.4	48.8	2.0	50.4	4.0	52.4
10	48.4	0.3	48.6	0.5	48.9	2.5	50.9	4.9	53.3
20	48.4	0.5	48.9	1.0	49.4	4.9	53.3	9.4	57.7
40	48.4	1.0	49.4	2.0	50.4	9.4	57.7	17.0	65.4
80	48.4	2.0	50.4	4.0	52.4	17.0	65.4	28.4	76.8
100	48.4	2.5	50.9	4.9	53.3	20.3	68.7	32.6	81.0
200	48.4	4.9	53.3	9.4	57.7	32.6	81.0	44.6	93.0
400	48.4	9.4	57.7	17.0	65.4	44.6	93.0	50.7	99.1
800	48.4	17.0	65.4	28.4	76.8	50.7	99.1	51.6	100
1000	48.4	20.3	68.7	32.6	81.0	51.3	99.7	51.6	100
2000	48.4	22.6	81.0	44.6	93.0	51.6	100	51.6	100
4000	48.4	44.6	93.0	50.7	99.1	51.6	100	51.6	100
8000	48.4	50.7	99.1	51.6	100	51.6	100	51.6	100

Tabela IV.3 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.25$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.60

T_v	U_P %	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		U_S %	U %	U_S %	U %	U_S %	U %	U_S %	U %
0.001	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2	0.0	2.2
0.002	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1	0.0	3.1
0.004	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3	0.0	4.3
0.006	5.3	0.0	5.3	0.0	5.3	0.0	5.3	0.0	5.3
0.008	6.1	0.0	6.1	0.0	6.1	0.0	6.1	0.0	6.1
0.01	6.8	0.0	6.8	0.0	6.8	0.0	6.8	0.0	6.8
0.02	9.6	0.0	9.6	0.0	9.6	0.0	9.6	0.0	9.6
0.04	13.5	0.0	13.5	0.0	13.5	0.0	13.5	0.0	13.5
0.06	16.6	0.0	16.6	0.0	16.6	0.0	16.6	0.0	16.6
0.08	19.1	0.0	19.1	0.0	19.1	0.0	19.1	0.0	19.1
0.1	21.4	0.0	21.4	0.0	21.4	0.0	21.4	0.0	21.4
0.2	30.2	0.0	30.2	0.0	30.2	0.0	30.2	0.1	30.3
0.4	41.9	0.0	41.9	0.0	41.9	0.1	42.0	0.2	42.1
0.6	48.9	0.0	48.9	0.0	48.9	0.2	49.1	0.3	49.2
0.8	53.2	0.0	53.3	0.0	53.3	0.2	53.4	0.3	53.6
1.0	55.9	0.0	55.9	0.0	55.9	0.2	56.1	0.4	56.3
2.0	59.7	0.0	59.7	0.1	59.8	0.4	60.1	0.8	60.5
4.0	60.0	0.1	60.1	0.2	60.2	0.8	60.8	1.6	61.6
6.0	60.0	0.1	60.1	0.2	60.2	1.2	61.2	2.3	62.3
8.0	60.0	0.2	60.2	0.3	60.3	1.6	61.6	3.1	63.1
10	60.0	0.2	60.2	0.4	60.4	2.0	62.0	3.8	63.8
20	60.0	0.4	60.4	0.8	60.8	3.8	63.8	7.3	67.3
40	60.0	0.8	60.8	1.6	61.6	7.3	67.3	13.2	73.2
80	60.0	1.6	61.6	3.1	63.1	13.2	73.2	22.0	82.0
100	60.0	2.0	62.0	3.8	63.8	15.7	75.7	25.3	85.3
200	60.0	3.8	63.8	7.3	67.3	25.3	85.3	34.6	94.6
400	60.0	7.3	67.3	13.2	73.2	34.6	94.6	39.3	99.3
800	60.0	13.2	73.2	22.0	82.0	39.3	99.3	40.0	100
1000	60.0	15.7	75.7	25.3	85.3	39.7	99.7	40.0	100
2000	60.0	25.3	85.3	34.6	94.6	40.0	100	40.0	100
4000	60.0	34.6	94.6	39.3	99.3	40.0	100	40.0	100
8000	60.0	39.3	99.3	40.0	100	40.0	100	40.0	100

Tabela IV.4 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.5$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.50

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3	0.0	2.3
0.002	3.2	0.0	3.2	0.0	3.2	0.0	3.2	0.0	3.2
0.004	4.5	0.0	4.5	0.0	4.5	0.0	4.5	0.0	4.5
0.006	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5
0.008	6.3	0.0	6.3	0.0	6.3	0.0	6.3	0.0	6.3
0.01	7.1	0.0	7.1	0.0	7.1	0.0	7.1	0.0	7.1
0.02	10.0	0.0	10.0	0.0	10.0	0.0	10.0	0.0	10.0
0.04	14.1	0.0	14.1	0.0	14.1	0.0	14.1	0.0	14.1
0.06	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3	0.0	17.3
0.08	19.9	0.0	19.9	0.0	19.9	0.0	19.9	0.0	19.9
0.1	22.3	0.0	22.3	0.0	22.3	0.0	23.3	0.0	22.3
0.2	31.5	0.0	31.5	0.0	31.5	0.0	31.5	0.1	31.6
0.4	43.6	0.0	43.6	0.0	43.6	0.1	43.7	0.2	43.8
0.6	51.0	0.0	51.0	0.0	51.1	0.1	51.1	0.2	51.2
0.8	55.5	0.0	55.5	0.0	55.5	0.1	55.6	0.3	55.8
1.0	58.2	0.0	58.2	0.0	58.2	0.2	58.4	0.4	58.6
2.0	62.1	0.0	62.1	0.1	62.2	0.4	62.5	0.7	62.9
4.0	62.5	0.1	62.6	0.1	62.6	0.7	63.2	1.5	64.0
6.0	62.5	0.1	62.6	0.2	62.7	1.1	63.6	2.2	64.7
8.0	62.5	0.1	62.6	0.3	62.8	1.5	64.0	2.9	65.4
10	62.5	0.2	62.7	0.4	62.9	1.8	64.3	3.6	66.1
20	62.5	0.4	62.9	0.7	63.2	3.6	66.1	6.8	69.3
40	62.5	0.7	63.2	1.5	64.0	6.8	69.3	12.4	74.9
80	62.5	1.5	64.0	2.9	65.4	12.4	79.9	20.7	83.2
100	62.5	1.8	64.3	3.6	66.1	14.8	77.3	23.7	86.2
200	62.5	3.6	66.1	6.8	69.3	23.7	86.2	32.4	94.9
400	62.5	6.8	69.3	12.4	74.9	32.4	94.9	36.8	99.3
800	62.5	12.4	74.9	20.7	83.2	36.8	99.3	37.5	100
1000	62.5	14.8	77.3	23.7	86.2	37.2	99.7	37.5	100
2000	62.5	23.7	86.2	32.4	94.9	37.5	100	37.5	100
4000	62.5	32.4	94.9	36.8	99.3	37.5	100	37.5	100
8000	62.5	36.8	99.3	37.5	100	37.5	100	37.5	100

Tabela IV.5 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.50$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.55

T_v	U_P %	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		U_S %	U %	U_S %	U %	U_S %	U %	U_S %	U %
0.001	2.4	0.0	2.4	0.0	2.4	0.0	2.4	0.0	2.4
0.002	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3
0.004	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7
0.006	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7
0.008	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6
0.01	7.4	0.0	7.4	0.0	7.4	0.0	7.4	0.0	7.4
0.02	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4
0.04	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7
0.06	18.0	0.0	18.0	0.0	18.0	0.0	18.0	0.0	18.0
0.08	20.8	0.0	20.8	0.0	20.8	0.0	20.8	0.0	20.8
0.1	23.3	0.0	23.3	0.0	23.3	0.0	23.3	0.0	23.3
0.2	32.9	0.0	32.9	0.0	32.9	0.0	32.9	0.0	32.9
0.4	45.5	0.0	45.5	0.0	45.5	0.1	45.6	0.2	45.7
0.6	53.2	0.0	53.2	0.0	53.2	0.1	53.3	0.2	53.4
0.8	57.9	0.0	57.9	0.0	57.9	0.1	58.0	0.3	58.2
1.0	60.7	0.1	60.8	0.1	60.8	0.2	60.9	0.4	61.1
2.0	64.8	0.1	64.9	0.1	64.9	0.3	65.1	0.7	65.5
4.0	65.2	0.1	65.3	0.2	65.4	0.7	65.9	1.4	66.6
6.0	65.2	0.1	65.3	0.2	65.4	1.0	66.2	2.0	67.2
8.0	65.2	0.1	65.4	0.3	65.5	1.4	66.6	2.7	67.9
10	65.2	0.2	65.4	0.3	65.6	1.7	66.9	3.3	68.5
20	65.2	0.3	65.5	0.7	65.9	3.3	68.5	6.3	71.5
40	65.2	0.7	65.9	1.4	66.6	6.3	71.5	11.5	76.7
80	65.2	1.4	66.6	2.7	67.9	11.5	76.7	19.2	84.4
100	65.2	1.7	66.9	3.3	68.5	13.7	78.9	22.0	87.2
200	65.2	3.3	68.5	6.3	71.5	22.0	87.2	30.1	95.3
400	65.2	6.3	71.5	11.5	76.7	30.1	95.3	34.1	99.4
800	65.2	11.5	76.7	19.2	84.4	34.1	99.4	34.8	100
1000	65.2	13.7	78.9	22.0	87.2	34.5	99.8	34.8	100
2000	65.2	22.0	87.2	30.1	95.3	34.8	100	34.8	100
4000	65.2	30.1	95.3	34.1	99.3	34.8	100	34.8	100
8000	65.2	34.1	99.4	34.8	100	34.8	100	34.8	100

Tabela IV.6 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.50$$

$$\text{Coeficiente de empuxo no repouso } (K_{on}) = 0.60$$

T_v	U_p %	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %
0.001	2.7	0.0	2.7	0.0	2.7	0.0	2.7	0.0	2.7
0.002	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8	0.0	3.8
0.004	5.4	0.0	5.4	0.0	5.4	0.0	5.4	0.0	5.4
0.006	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6
0.008	7.6	0.0	7.6	0.0	7.6	0.0	7.6	0.0	7.6
0.01	8.5	0.0	8.5	0.0	8.5	0.0	8.5	0.0	8.5
0.02	12.0	0.0	12.0	0.0	12.0	0.0	12.0	0.0	12.0
0.04	16.9	0.0	16.9	0.0	16.9	0.0	16.9	0.0	16.9
0.06	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7
0.08	23.9	0.0	23.9	0.0	23.9	0.0	23.9	0.0	23.9
0.1	26.8	0.0	26.8	0.0	26.8	0.0	26.8	0.0	26.8
0.2	37.8	0.0	37.8	0.0	37.8	0.0	37.8	0.0	37.8
0.4	52.3	0.0	52.3	0.0	52.3	0.0	52.3	0.1	52.4
0.6	61.2	0.0	61.2	0.0	61.2	0.0	61.2	0.1	61.3
0.8	66.6	0.0	66.6	0.0	66.6	0.1	66.7	0.2	66.8
1.0	69.8	0.0	69.9	0.0	69.9	0.1	70.0	0.2	70.1
2.0	74.6	0.0	74.6	0.0	74.6	0.2	74.8	0.5	75.1
4.0	75.0	0.0	75.0	0.1	75.1	0.5	75.5	1.0	76.0
6.0	75.0	0.1	75.1	0.1	75.1	0.7	75.7	1.5	76.5
8.0	75.0	0.1	75.1	0.2	75.2	1.0	76.0	1.9	76.9
10	75.0	0.1	75.1	0.2	75.2	1.2	76.2	2.4	77.4
20	75.0	0.2	75.2	0.5	75.5	2.4	77.4	4.5	79.5
40	75.0	0.5	75.5	1.0	76.0	4.5	79.5	8.2	83.2
80	75.0	1.0	76.0	1.9	76.9	8.2	83.2	13.8	88.8
100	75.0	1.2	76.2	2.4	77.4	9.8	84.8	15.8	90.8
200	75.0	2.4	77.4	4.5	79.5	15.8	90.8	21.6	96.6
400	75.0	4.5	79.5	8.2	83.2	21.6	96.6	24.5	99.5
800	75.0	8.2	83.2	13.8	88.8	24.5	99.5	25.0	100
1000	75.0	9.8	84.8	15.8	90.8	24.8	99.8	25.0	100
2000	75.0	15.8	90.8	21.6	96.6	25.0	100	25.0	100
4000	75.0	21.6	96.6	24.5	99.5	25.0	100	25.0	100
8000	75.0	24.5	99.5	25.0	100	25.0	100	25.0	100

Tabela IV.7 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 2.0$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.50

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	2.8	0.0	2.8	0.0	2.8	0.0	2.8	0.0	2.8
0.002	3.9	0.0	3.9	0.0	3.9	0.0	3.9	0.0	3.9
0.004	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5
0.006	6.7	0.0	6.7	0.0	6.7	0.0	6.7	0.0	6.7
0.008	7.8	0.0	7.8	0.0	7.8	0.0	7.8	0.0	7.8
0.01	8.7	0.0	8.7	0.0	8.7	0.0	8.7	0.0	8.7
0.02	12.3	0.0	12.3	0.0	12.3	0.0	12.3	0.0	12.3
0.04	17.4	0.0	17.4	0.0	17.4	0.0	17.4	0.0	17.4
0.06	21.3	0.0	21.3	0.0	21.3	0.0	21.3	0.0	21.3
0.08	24.6	0.0	24.6	0.0	24.6	0.0	24.6	0.0	24.6
0.1	27.4	0.0	27.4	0.0	27.4	0.0	27.4	0.0	27.4
0.2	38.8	0.0	38.8	0.0	38.8	0.0	38.8	0.0	38.8
0.4	53.7	0.0	53.7	0.0	53.7	0.0	53.7	0.1	53.8
0.6	62.7	0.0	62.7	0.0	62.7	0.1	62.8	0.1	62.8
0.8	68.3	0.0	68.3	0.0	68.3	0.1	68.4	0.2	68.5
1.0	71.6	0.0	71.6	0.1	71.7	0.2	71.8	0.3	71.9
2.0	76.5	0.0	76.5	0.1	76.6	0.2	76.7	0.5	77.0
4.0	76.9	0.1	77.0	0.1	77.0	0.5	77.4	0.9	77.8
6.0	76.9	0.1	77.0	0.1	77.1	0.7	77.6	1.3	78.2
8.0	76.9	0.1	77.0	0.2	77.1	0.9	77.8	1.8	78.7
10	76.9	0.1	77.0	0.2	77.2	1.1	78.0	2.2	79.1
20	76.9	0.2	77.2	0.5	77.4	2.2	79.1	4.2	81.1
40	76.9	0.5	77.4	0.9	77.8	4.2	81.1	7.6	84.5
80	76.9	0.9	77.8	1.8	78.7	7.6	84.5	12.7	89.6
100	76.9	1.1	78.0	2.2	79.1	9.1	86.0	14.6	91.5
200	76.9	2.2	79.1	4.2	81.1	14.6	91.5	20.0	96.9
400	76.9	4.2	81.1	7.6	84.5	20.0	96.9	22.7	99.6
800	76.9	7.6	84.5	12.7	89.6	22.7	99.6	23.1	100
1000	76.9	9.1	86.0	14.6	91.5	22.9	99.8	23.1	100
2000	76.9	14.6	91.5	20.0	96.9	23.1	100	23.1	100
4000	76.9	20.0	96.9	22.7	99.6	23.1	100	23.1	100
8000	76.9	22.7	99.6	23.1	100	23.1	100	23.1	100

Tabela IV.8 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 2.0$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.55

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	2.9	0.0	2.9	0.0	2.9	0.0	2.9	0.0	2.9
0.002	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0	0.0	4.0
0.004	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7	0.0	5.7
0.006	6.9	0.0	6.9	0.0	6.9	0.0	6.9	0.0	6.9
0.008	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0
0.01	8.9	0.0	8.9	0.0	8.9	0.0	8.9	0.0	8.9
0.02	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6	0.0	12.6
0.04	17.8	0.0	17.8	0.0	17.8	0.0	17.8	0.0	17.8
0.06	21.8	0.0	21.8	0.0	21.8	0.0	21.8	0.0	21.8
0.08	25.2	0.0	25.2	0.0	25.2	0.0	25.2	0.0	25.2
0.1	28.2	0.0	28.2	0.0	28.2	0.0	28.2	0.0	28.2
0.2	39.8	0.0	39.8	0.0	39.8	0.0	39.8	0.0	39.8
0.4	55.1	0.0	55.1	0.0	55.1	0.0	55.1	0.1	55.2
0.6	64.4	0.0	64.4	0.0	64.4	0.1	64.5	0.1	64.5
0.8	70.1	0.0	70.1	0.0	70.1	0.1	70.2	0.2	70.3
1.0	73.5	0.0	73.5	0.0	73.5	0.1	73.6	0.2	73.7
2.0	78.5	0.0	78.5	0.0	78.5	0.2	78.7	0.4	78.9
4.0	78.9	0.0	78.9	0.1	79.0	0.4	79.3	0.8	79.7
6.0	78.9	0.1	79.0	0.1	79.0	0.6	79.5	1.2	80.1
8.0	78.9	0.1	79.0	0.2	79.1	0.8	79.7	1.6	80.5
10	78.9	0.2	79.1	0.3	79.2	1.1	80.0	2.0	80.9
20	78.9	0.3	79.2	0.5	79.4	2.0	80.9	3.8	82.7
40	78.9	0.4	79.3	0.8	79.7	3.8	82.7	6.9	85.8
80	78.9	0.8	79.7	1.6	80.5	6.9	85.8	11.6	90.5
100	78.9	1.0	79.9	2.0	80.9	8.3	87.2	13.3	92.3
200	78.9	2.0	80.9	3.8	82.7	13.3	92.3	18.2	97.2
400	78.9	3.8	82.7	6.9	85.8	18.2	97.2	20.7	99.6
800	78.9	6.9	85.8	11.6	90.5	20.7	99.6	21.0	100
1000	78.9	8.3	87.2	13.3	92.2	20.9	99.8	21.1	100
2000	78.9	13.3	92.3	18.2	97.2	21.1	100	21.1	100
4000	78.9	18.2	97.1	20.7	99.6	21.1	100	21.1	100
8000	78.9	20.7	99.6	21.1	100	21.1	100	21.1	100

Tabela IV.9 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 2.0$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.60

T_v	U_p %	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %
0.001	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3
0.002	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6
0.004	6.4	0.0	6.4	0.0	6.4	0.0	6.4	0.0	6.4
0.006	7.9	0.0	7.9	0.0	7.9	0.0	7.9	0.0	7.9
0.008	9.1	0.0	9.1	0.0	9.1	0.0	9.1	0.0	9.1
0.01	10.2	0.0	10.2	0.0	10.2	0.0	10.2	0.0	10.2
0.02	14.4	0.0	14.4	0.0	14.0	0.0	14.0	0.0	14.0
0.04	20.3	0.0	20.3	0.0	20.3	0.0	20.3	0.0	20.3
0.06	24.9	0.0	24.9	0.0	24.9	0.0	24.9	0.0	24.9
0.08	28.7	0.0	28.7	0.0	28.7	0.0	28.7	0.0	28.7
0.1	32.1	0.0	32.1	0.0	32.1	0.0	32.1	0.0	32.1
0.2	45.4	0.0	45.4	0.0	45.4	0.0	45.4	0.0	45.4
0.4	62.8	0.0	62.8	0.0	62.8	0.0	62.8	0.0	62.8
0.6	73.4	0.0	73.4	0.0	73.4	0.0	73.4	0.1	73.5
0.8	79.9	0.0	79.9	0.0	79.9	0.0	79.9	0.1	80.0
1.0	83.8	0.0	83.8	0.0	83.8	0.0	83.8	0.1	83.9
2.0	89.5	0.0	89.5	0.0	89.5	0.1	89.6	0.2	89.7
4.0	90.0	0.0	90.0	0.0	90.0	0.2	90.2	0.4	90.4
6.0	90.0	0.0	90.0	0.1	90.1	0.3	90.3	0.6	90.6
8.0	90.0	0.0	90.0	0.1	90.1	0.4	90.4	0.8	90.8
10	90.0	0.0	90.0	0.1	90.1	0.5	90.5	1.0	91.0
20	90.0	0.1	90.1	0.2	90.2	1.0	91.0	1.8	91.8
40	90.0	0.2	90.2	0.4	90.4	1.8	91.8	3.3	93.3
80	90.0	0.4	90.4	0.8	90.8	3.3	93.3	5.5	95.5
100	90.0	0.5	90.5	1.0	91.0	3.9	93.9	6.3	96.3
200	90.0	1.0	91.0	1.8	91.8	6.3	96.3	8.6	98.6
400	90.0	1.8	91.8	3.3	93.3	8.6	98.6	9.8	99.8
800	90.0	3.3	93.3	5.5	95.5	9.8	99.8	10.0	100
1000	90.0	3.9	93.9	6.3	96.3	9.9	99.9	10.0	100
2000	90.0	6.3	96.3	8.6	98.6	10.0	100	10.0	100
4000	90.0	8.6	98.6	9.8	99.8	10.0	100	10.0	100
8000	90.0	9.8	99.8	10.0	100	10.0	100	10.0	100

Tabela IV.10 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 4.0$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.50

T_v	$U_p \%$	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$	$U_s \%$	$U \%$
0.001	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3
0.002	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6	0.0	4.6
0.004	6.5	0.0	6.5	0.0	6.5	0.0	6.5	0.0	6.5
0.006	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0
0.008	9.2	0.0	9.2	0.0	9.2	0.0	9.2	0.0	9.2
0.01	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3	0.0	10.3
0.02	14.5	0.0	14.5	0.0	14.5	0.0	14.5	0.0	14.5
0.04	20.5	0.0	20.5	0.0	20.5	0.0	20.5	0.0	20.5
0.06	25.1	0.0	25.1	0.0	25.1	0.0	25.1	0.0	25.1
0.08	29.0	0.0	29.0	0.0	29.0	0.0	29.0	0.0	29.0
0.1	32.4	0.0	32.4	0.0	32.4	0.0	32.4	0.0	32.4
0.2	45.8	0.0	45.8	0.0	45.8	0.0	45.8	0.0	45.8
0.4	63.4	0.0	63.4	0.0	63.4	0.0	63.4	0.0	63.4
0.6	74.1	0.0	74.1	0.0	74.1	0.0	74.1	0.1	74.2
0.8	80.7	0.0	80.7	0.0	80.7	0.0	80.7	0.1	80.8
1.0	84.7	0.0	84.7	0.0	84.7	0.0	84.7	0.1	84.8
2.0	90.4	0.0	90.4	0.0	90.4	0.1	90.5	0.2	90.6
4.0	90.9	0.0	90.9	0.0	90.9	0.2	91.1	0.4	91.3
6.0	90.9	0.0	90.9	0.1	91.0	0.3	91.2	0.5	91.4
8.0	90.9	0.0	90.9	0.1	91.0	0.4	91.4	0.7	91.6
10	90.9	0.0	90.9	0.1	91.0	0.4	91.3	0.9	91.8
20	90.9	0.0	90.9	0.2	91.1	0.9	91.8	1.6	92.5
40	90.9	0.2	91.1	0.4	91.3	1.6	92.5	3.0	93.9
80	90.9	0.4	91.3	0.7	91.6	3.0	93.9	5.0	95.9
100	90.9	0.4	91.3	0.9	91.8	3.6	94.5	5.7	96.7
200	90.9	0.9	91.8	1.6	92.5	5.7	96.6	7.9	98.8
400	90.9	1.6	92.6	3.0	93.9	7.9	98.8	8.9	99.8
800	90.9	3.0	93.9	5.0	95.9	8.9	99.8	9.1	100
1000	90.9	3.6	94.5	5.7	96.7	9.0	99.9	9.1	100
2000	90.9	5.7	96.6	7.9	98.8	9.1	100	9.1	100
4000	90.9	7.9	98.8	8.9	99.8	9.1	100	9.1	100
8000	90.9	8.9	99.8	9.1	100	9.1	100	9.1	100

Tabela IV.11 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 4.0$$

$$\text{Coeficiente de empuxo no repouso } (K_{on}) = 0.55$$

T_v	U_p %	$\theta = 0.0005$		$\theta = 0.001$		$\theta = 0.005$		$\theta = 0.01$	
		U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %	U_s %	U %
0.001	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3	0.0	3.3
0.002	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7	0.0	4.7
0.004	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6	0.0	6.6
0.006	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0	0.0	8.0
0.008	9.3	0.0	9.3	0.0	9.3	0.0	9.3	0.0	9.3
0.01	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4	0.0	10.4
0.02	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7	0.0	14.7
0.04	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7	0.0	20.7
0.06	25.4	0.0	25.4	0.0	25.4	0.0	25.4	0.0	25.4
0.08	29.3	0.0	29.3	0.0	29.3	0.0	29.3	0.0	29.3
0.1	32.8	0.0	32.8	0.0	32.8	0.0	32.8	0.0	32.8
0.2	46.3	0.0	46.3	0.0	46.3	0.0	46.3	0.0	46.3
0.4	64.1	0.0	64.1	0.0	64.1	0.0	64.1	0.0	64.1
0.6	74.9	0.0	74.9	0.0	74.9	0.0	74.9	0.0	74.9
0.8	81.5	0.0	81.5	0.0	81.5	0.0	81.5	0.1	81.6
1.0	85.5	0.0	85.5	0.0	85.5	0.0	85.5	0.1	85.6
2.0	91.3	0.0	91.3	0.0	91.3	0.1	91.4	0.2	91.5
4.0	91.8	0.0	91.8	0.0	91.8	0.2	92.0	0.3	92.1
6.0	91.8	0.0	91.8	0.0	91.8	0.2	92.0	0.5	92.3
8.0	91.8	0.0	91.8	0.1	91.9	0.3	92.1	0.6	92.4
10	91.8	0.0	91.8	0.1	91.9	0.4	92.2	0.8	92.6
20	91.8	0.1	91.9	0.2	92.0	0.8	92.6	1.5	93.3
40	91.8	0.2	92.0	0.3	92.1	1.5	93.3	2.7	94.5
80	91.8	0.3	92.1	0.6	92.4	2.7	94.5	4.5	96.3
100	91.8	0.4	92.2	0.8	92.6	3.2	95.0	5.2	97.0
200	91.8	0.8	92.6	1.5	93.3	5.2	97.0	7.1	98.9
400	91.8	1.5	93.3	2.7	94.5	7.1	98.9	8.0	99.8
800	91.8	2.7	94.5	4.5	96.3	8.0	99.8	8.2	100
1000	91.8	3.2	95.0	5.2	97.0	8.1	99.9	8.2	100
2000	91.8	5.2	97.0	7.1	98.9	8.2	100	8.2	100
4000	91.8	7.1	98.9	8.0	99.8	8.2	100	8.2	100
8000	91.8	8.0	99.9	8.2	100	8.2	100	8.2	100

Tabela IV.12 - Razão entre as tensões efetivas final e inicial

$$\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 4.0$$

Coeficiente de empuxo no repouso (K_{on}) = 0.60

IV.4 - Comentários Sobre a Abordagem de LACERDA e MARTINS

Inicialmente é interessante ressaltar que as curvas das Figuras IV.9 e IV.10 dependendo dos valores relativos entre σ'_{vf} e σ'_{vo} e do parâmetro θ podem apresentar um ou três pontos de inflexão. A medida em que $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ cresce a curva $U \times T_v$ se aproxima da curva de Terzaghi.

Para que se possa estimar os recalques por adensamento previstos pela teoria de MARTINS e LACERDA (28) torna-se necessário o conhecimento do parâmetro θ e do valor do recalque total (a tempo infinito). Naturalmente que não se pode esperar indefinidamente, no laboratório, o processo chegar a seu termo. Para se determinar o recalque total, pode-se lançar mão da assertiva de que o processo termina quando $k_o = 1$ para estimar o índice de vazios de equilíbrio correspondente a $k_o = 1$ e à tensão vertical efetiva final em questão (σ'_{vf}). Pode-se fazer isto utilizando a expressão empírica de SCHMIDT (40) modificada por MAYNE e KULHAWY (29) que relaciona o coeficiente de empuxo no repouso K_o durante um ciclo de carregamento-descarregamento com a razão de sobreadensamento (OCR). Tal expressão se escreve

$$K_o = (1 - \text{sen}\phi') \text{OCR}^{\text{sen}\phi'} \quad (\text{IV.35})$$

O procedimento a ser seguido por ser ilustrado através de um exemplo. Tomando a Figura IV.11, que apresenta um gráfico de compressão e $\times \sigma'_v$ de um ensaio oedométrico convencional. Admita que no campo a tensão vertical efetiva final a ser atingida seja σ'_{vf} . O que se quer determinar é o índice de vazios

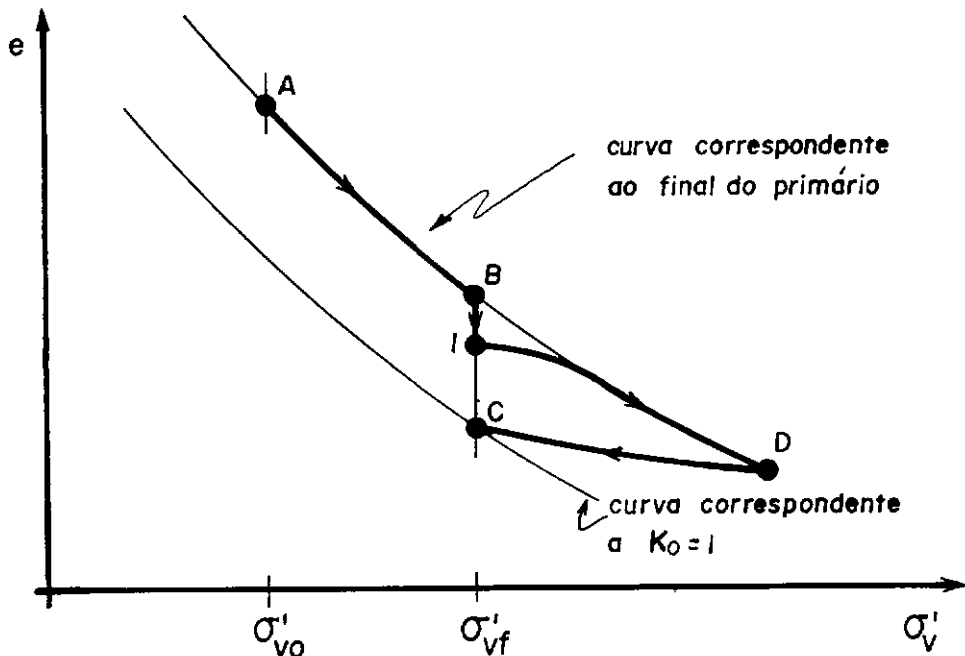


Figura IV.11 - Procedimento para se estimar o recalque total

correspondentes à curva e a σ'_v para $K_0 = 1$, ou ainda, o índice de vazios correspondente ao ponto C. O ponto C pode ser obtido procedendo-se ao final do estágio de carregamento de A para B (ver Figura IV.11) um carregamento até D com subsequente descarregamento de D para C gerando um OCR tal que $K_0 = 1$. Este OCR segundo IV.35 é dado por

$$\text{OCR} = \left[\frac{1}{1 - \sin \phi'} \right]^{\frac{1}{\sin \phi'}} \quad (\text{IV.36})$$

Para a argila do Sarapuĩ, por exemplo, com um $\phi' = 25^\circ$ como obtido por ORTIGÃO (37) para $K_0 = 1$ obtém-se $\text{OCR} = 3,7$. A partir daí, o parâmetro θ pode ser estimado seguindo-se a rotina a seguir

- (a) Verificar qual a relação entre as tensões efetivas final e inicial $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$ e o coeficiente de empuxo no repouso inicial (ver por exemplo Tabelas IV.1 à IV.12).
- (b) Tomar na tabela apropriada um valor baixo para U tal que $U \approx U_p$ e $U_s \approx 0$ (por exemplo $U = 30\%$).
- (c) Determinar o tempo t_{30} , correspondente à $U = 30\%$, e calcular $C_v = \frac{T_v H^2}{t_{30}}$, sendo H a espessura do corpo de prova por face drenante.
- (d) Verificar para o carregamento em questão qual o valor limite da percentagem de adensamento primário (U_{plim}). Tomar na curva experimental um ponto para o qual $U > U_{plim}$. Determinar para esse ponto a percentagem de adensamento secundário $U_s = U - U_{plim}$.
- (e) Com o valor de C_v determinado no item (c) calcular o T_v correspondente a $U = U_s + U_{plim}$.
- (f) Determinar com o auxílio da Equação (IV.34) o valor de θ .

Com o valor de C_v e θ assim determinados pode-se estimar a curva recalque x tempo.

A título ilustrativo observe a curva de adensamento da Figura IV.12. Esta curva corresponde a um estágio de carga de 400 para 600 kN/m² ($\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.5$) de um ensaio oedométrico em uma amostra de caulim moldada em laboratório. O coeficiente de empuxo no repouso da amostra normalmente adensada, estimado a partir da expressão de JAKY ($K_{on} = 1 - \text{sen}\phi'$) vale aproximadamente 0.6. Lembrando que a leitura inicial do extensômetro é de 960 e a estimada para o final do processo vale 786 pode-se proceder à rotina para determinar θ , o que se faz a seguir.

(a) A relação $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo} = 1.5$ e $K_{on} = 0.6$ (a tabela a ser consultada é a IV.6).

(b) Tomando $U \approx U_p = 32.9\%$ o fator tempo correspondente vale $T_v = 0.20$.

(c) Sendo $H = 1.568$ cm, e o tempo correspondente a $U = 32,9\%$, $t = 5,5$ minutos o coeficiente de adensamento vale $C_v = 0.20 \times (1.568/2)^2 / 5.5 \times 60$ ou seja $C_v = 3.7 \times 10^{-4}$ cm²/s.

(d) Para o carregamento em questão $U_{plim} = 65.2\%$ (Tabela IV.6). Tomando na curva experimental, arbitrariamente, a leitura correspondente à 100000 minutos obtém-se $U \approx 74.0\%$, ou seja, $U_s = 8.76\%$.

(e) T_v (para $U_p = 65.2\%$ e $t = 100000$ minutos) =

$$\frac{(100000 \times 60 \times 3.7 \times 10^{-4})}{(1.568/2)^2} = 3612.$$

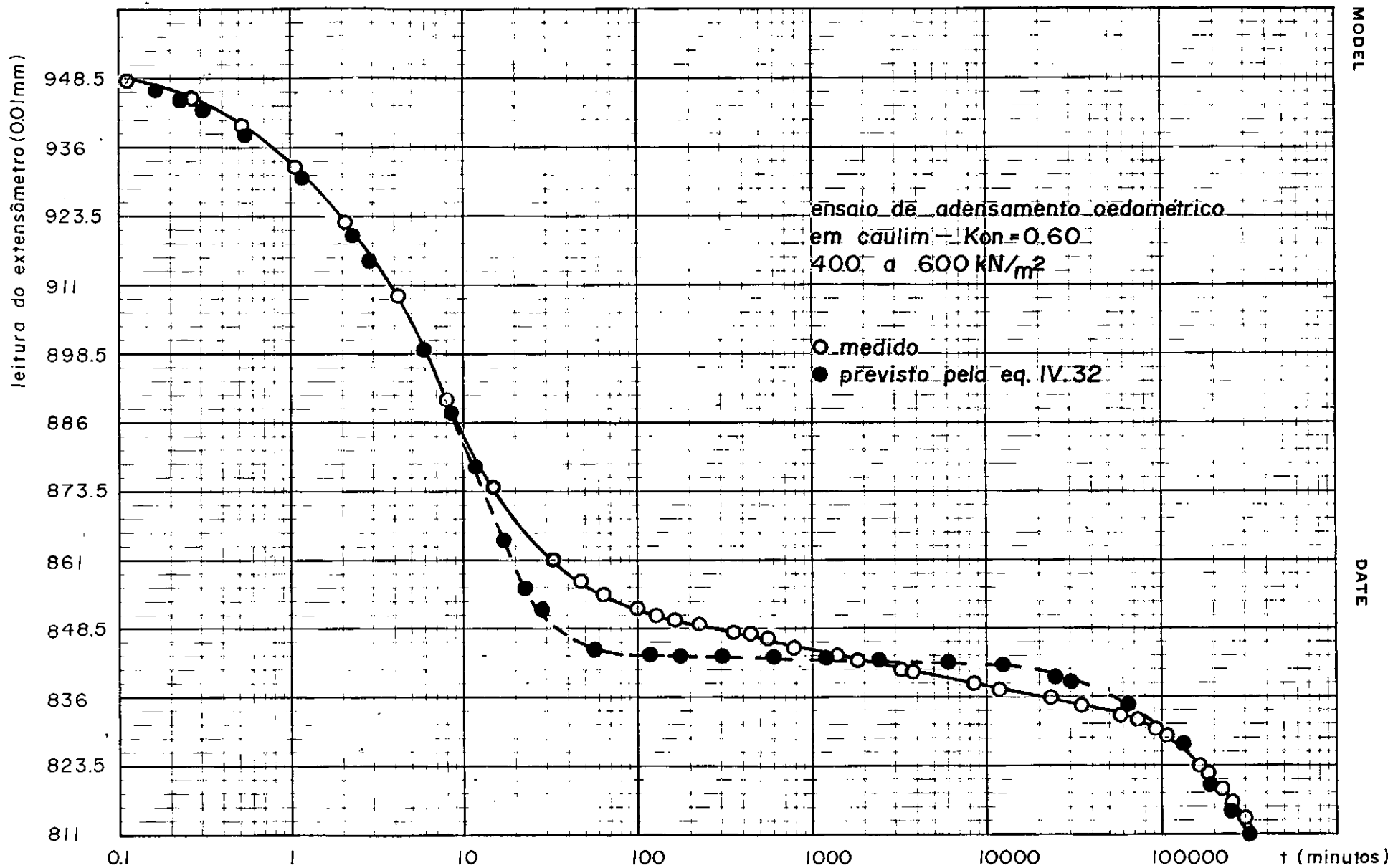


Figura IV.12 - Curvas de adensamento teórica e experimental de laboratório

O valor de θ será então, segundo IV.34, tal que:

$$8.76\% = \frac{2/3 (1 - 0.60) (1 - e^{-0.3612})}{(1.5 - 1) + \frac{2}{3} (1 - 0.60)}$$

ou seja $\theta = 8,0 \times 10^{-5}$.

É interessante ressaltar que a curva mostrada na Figura IV.12 corresponde a um carregamento onde, no estágio anterior, não foi permitido o desenvolvimento do adensamento secundário. Isto é possível lançando-se mão do expediente de carregar a amostra no instante em que é atingida a deformação correspondente à 100% do adensamento primário como previsto pela teoria de Terzaghi. A Figura IV.13 ilustra o procedimento. Naturalmente que não se espera com tal procedimento "isolar" o adensamento

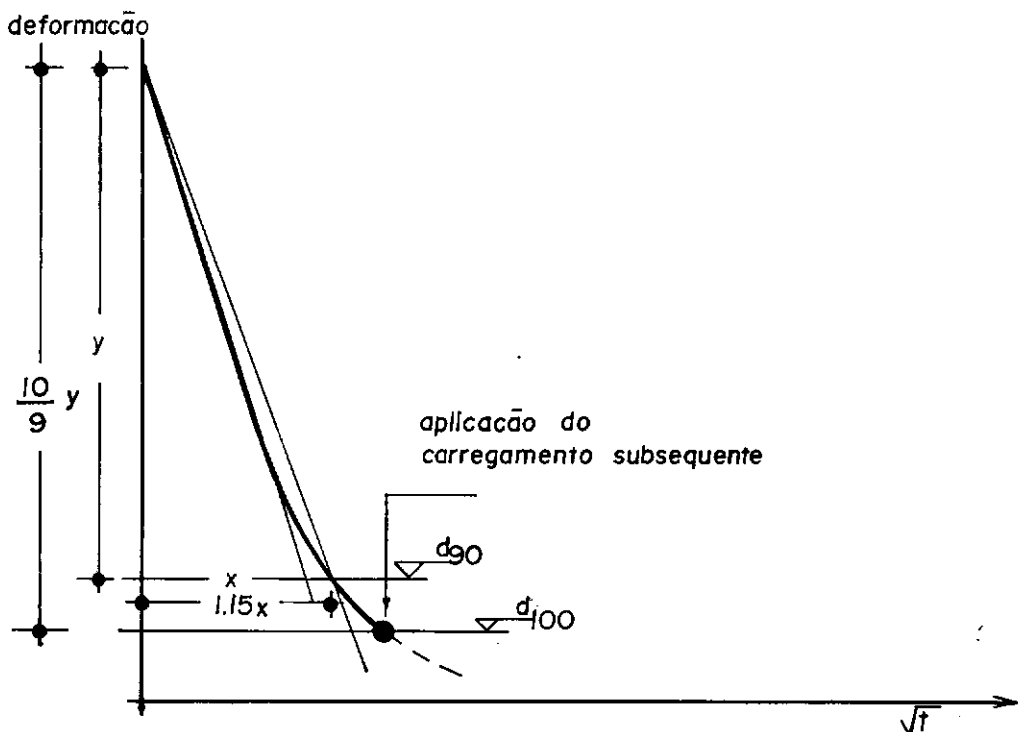


Figura IV.13 - Procedimento para minimizar a ocorrência do adensamento secundário no ensaio oedométrico

secundário no ensaio oedométrico já que é difícil dizer quando ele começa a se manifestar. O procedimento visa assim minimizar os efeitos do adensamento secundário sobre o estágio de carga subsequente. Deve-se observar também que o procedimento acima descrito só é possível utilizando-se a construção de Taylor.

É fato digno de nota a pequena magnitude e até mesmo a inexistência da assim compressão inicial, usualmente atribuída à compressão de gases existentes nas amostras, quando se realiza um carregamento como descrito no parágrafo anterior. Isto é verificado quando, ao fazer a correção inicial de Taylor ou Casagrande observa-se que o "zero corrigido" praticamente coincide com o "zero real". Este fato conduz a uma reinterpretação da compressão inicial, qual seja, a compressão inicial corresponderia a uma "recondução rápida" da amostra de um estado sobreadensado, provocado pelo adensamento secundário do estágio anterior, a um estado normalmente adensado (com $K_o = K_{on}$). Esta "recondução rápida" seria decorrente do maior valor de C_v oriundo do efeito de sobreadensamento provocado pelo adensamento secundário. O fenômeno descrito está ilustrado na Figura IV.14.

Embora o comportamento descrito tenha sido observado em 4 ensaios, as idéias expostas acima têm caráter especulativo sendo necessários maiores estudos sobre o assunto.

Finalmente, é importante ressaltar que a teoria de LACERDA e MARTINS (19) não faz previsão do desenvolvimento das

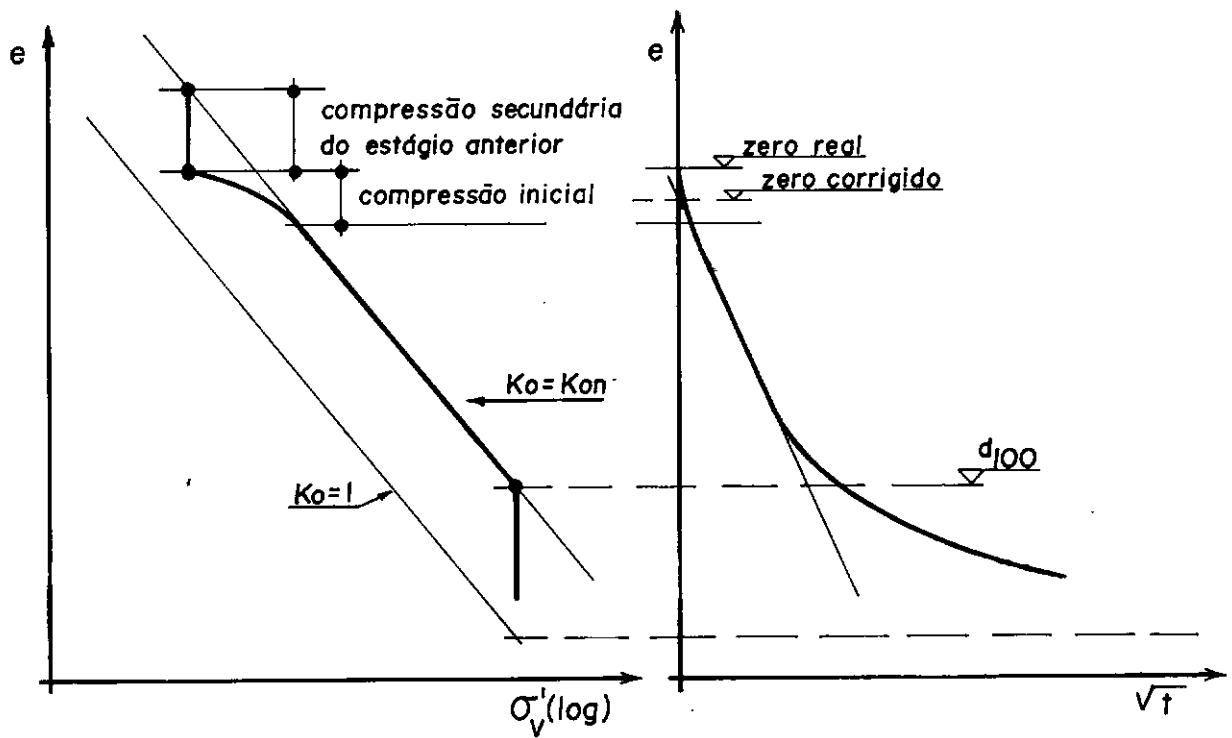


Figura IV.14 - Reinterpretação da compressão inicial

pressões neutras se constituindo no que se costuma chamar de "uncoupled theory".

CAPÍTULO V - ENSAIOS REALIZADOS

V.1 - OBJETIVOS

Os objetivos do ensaio realizado nesta pesquisa são basicamente os seguintes:

- a) Realizar ensaios de adensamento oedométrico de longa duração (aproximadamente 1 ano) a fim de observar o comportamento da amostra sob longos períodos de carregamento.
- b) Observar o comportamento do parâmetro C_{α} durante longos períodos de carregamento.
- c) Verificar a validade da abordagem de MARTINS e LACERDA (27) e a possibilidade de sua utilização prática.

V.2 - OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram obtidas na Baixada Fluminense do lado esquerdo da rodovia BR-040-RJ (Km 7.5) no sentido Rio-Petrópolis, onde se encontram os aterros experimentais do IPR (Figura V.1).

Neste local encontra-se um depósito de argila mole de cor cinza devido à presença de matéria orgânica e ao ambiente de redução. O teor de matéria orgânica é da ordem de 5%. Nos

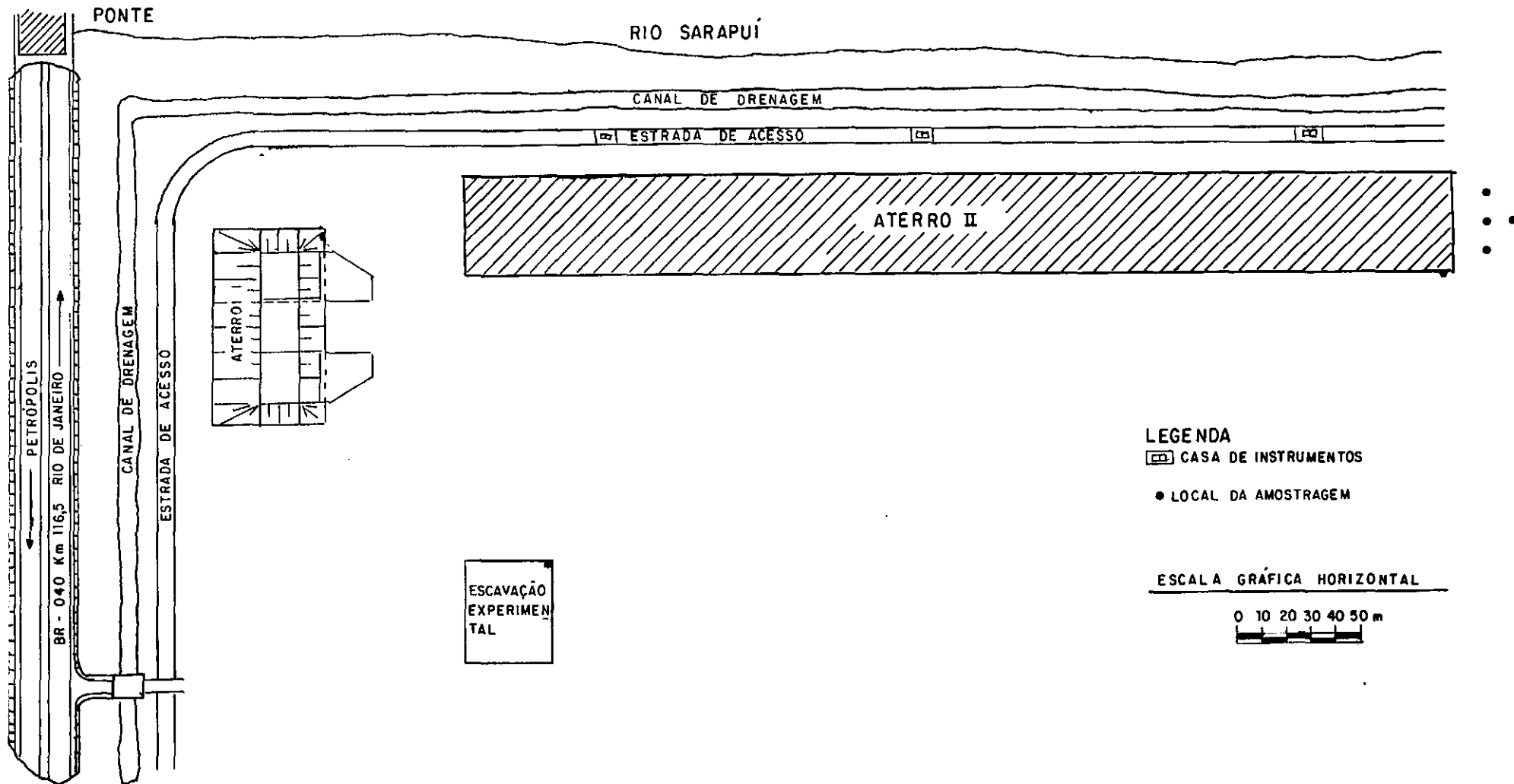


Figura V.1 - Croquis de situação das sondagens

primeiros 20 cm de profundidade ocorre a presença de vegetais, raízes e material orgânico em decomposição. A camada de argila mole se estende em profundidade por aproximadamente 11m apresentando no SPT zero golpes ao longo de toda a sua espessura. Subjacente a essa camada ocorrem sedimentos arenosos mais resistentes em termos de penetração do amostrador padrão atingindo-se, a 15m de profundidade, no SPT, o valor de 30 golpes/30 cm.

Esse depósito de argila mole, de acordo com ANTUNES (2), foi provavelmente formado a partir de sedimentos fluvio-marinhos do quaternário (6000 anos). Análises químicas mostraram ser a caulinita o constituinte principal ocorrendo ainda outros argilo-minerais como a montmorilonita. Essa argila, conhecida como "Argila do Sarapuí" tem sensibilidade da ordem de 3 e apresenta-se bastante uniforme (sem veios de areia ou silte). Tem limite de liquidez (ω_L) = 143% e limite de plasticidade (ω_p) = 50% apresentando portanto um índice de plasticidade (IP) = 93%. A umidade natural é um pouco superior ao limite de liquidez. Os ensaios de granulometria apresentam 100% do solo passando na peneira \neq 200 (abertura 0.074 mm) e 60 a 70% em peso correspondem à fração argila (com "diâmetro" das partículas menor que 0.002mm). A densidade dos grãos obtida nos ensaios de caracterização foi de 2.67.

Foram realizados 4 furos de sondagem para obtenção de amostras indeformadas. As amostras foram retiradas no prolongamento do eixo do ATERRO EXPERIMENTAL II a 10m de distância do seu pé (Figura V.1).

As sondagens foram realizadas utilizando-se revestimento com diâmetro interno de 152.4 mm (6 polegadas). A limpeza do furo foi feita utilizando-se um trado manual. O amostrador utilizado foi do tipo de pistão estacionário com paredes finas, 124 mm de diâmetro interno e 600 mm de comprimento. Uma descrição detalhada do equipamento e das etapas de operação de amostragem é feita por COSTA FILHO et al. (8).

Durante a amostragem foram tomados os seguintes cuidados:

- a) Controle do comprimento de cravação de modo a não ultrapassar os 530 mm de comprimento útil.
- b) Cravação executada por penetração contínua sem percussão.
- c) Intervalo de 10 a 15 minutos entre o término da cravação e a extração da amostra.

Após a retirada, os amostradores receberam uma proteção de parafina nas extremidades e foram transportados para o laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE/UFRJ onde foram acondicionados em sacos plásticos selados e guardados na posição vertical na câmara úmida.

As amostras foram coletadas entre as profundidades 1 e 4m tendo os ensaios de adensamento unidimensional sido realizados em amostras situadas entre as profundidades 1 e 1.5m.

Para a preparação dos corpos de prova a amostra era extraída do tubo no mesmo sentido em que nele entrou para evitar reversão de tensões. Para isso foi utilizado um extrator vertical de amostras. Devido ao amolgamento provocado na amostra nas extremidades do tubo os primeiros e os últimos 15 cm de argila só foram utilizados em ensaios de caracterização sendo a região central da amostra usada nos ensaios oedométricos.

V.3 - ENSAIOS REALIZADOS

Os corpos de prova para os ensaios oedométricos foram moldados em anéis de aço inoxidável com 20 mm de altura e área de seção transversal de 40 cm².

Os anéis foram inicialmente lubrificados internamente com graxa de silicone e em seguida cravados cuidadosamente na amostra mantendo-se o alinhamento entre os eixos do anel e do amostrador. Utilizou-se papel filtro saturado entre o corpo de prova e as pedras porosas. As pedras porosas foram previamente fervidas em água destilada e deixadas resfriar.

Após a pesagem do conjunto anel-solo montava-se a célula de adensamento e levava-se-á a prensa tipo Bishop com relação de braço 1:10 ou 1:11.

As leituras das deformações verticais foram feitas através de extensômetros com sensibilidade de 0.01 mm/divisão. Durante todo o ensaio foram feitas medidas de temperatura da sala de ensaio registrando-se uma oscilação entre 20°C e 26°C.

Foram quatro os corpos de prova utilizados nesta pesquisa, tendo sido usadas células Ronald Top de cores diferentes (verde, amarela, marron e cinza) para distinguir os diferentes carregamentos a serem aplicados.

Os carregamentos foram feitos de forma tal que inicialmente todos os corpos de prova foram submetidos à tensão de 6.25 kN/m^2 ($\approx 0.0625 \text{ kgf/cm}^2$). Durante esse carregamento, procedeu-se ao enchimento da bacia de saturação da célula. A partir daí carregaram-se os corpos de prova até 50 kN/m^2 ($\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2$) com razão incremental de carregamento $\Delta\sigma/\sigma = 1$. Cada estágio de carga teve a duração de 24 horas. Daí em diante os corpos de prova tiveram histórias de carregamento diferentes como indicado à seguir:

Célula cinza : de 50 para 400 kN/m^2 ($\sigma'_{VF}/\sigma'_{VO} = 8$).

Célula marron : de 50 para 200 kN/m^2 ($\sigma'_{VF}/\sigma'_{VO} = 4$).

Célula amarela: de 50 para 100 kN/m^2 ($\sigma'_{VF}/\sigma'_{VO} = 2$).

Célula verde : de 50 para 75 kN/m^2 ($\sigma'_{VF}/\sigma'_{VO} = 1.5$).

Esse carregamento foi deixado durante aproximadamente 11 meses para que fosse observado, durante esse intervalo de tempo, o efeito do adensamento secundário.

O objetivo dessas diferentes razões incrementais da tensão vertical foi o de se observar a influência dessas razões sobre o formato das curvas de adensamento e verificar se as

previsões da Equação (IV.32), como mostrado na Figura IV.9, são válidas ou não. Além disso, pretendia-se também verificar a variação de C_{α} com o tempo e com o valor da tensão vertical.

Decorrido o período de tempo onde se observou o a densamento secundário, todas as células foram submetidas à tensão de 400 kN/m^2 (com exceção da célula cinza que já estava submetida a esta tensão) tensão esta que foi mantida por um período de 8 dias. Feito isto houve a seguinte sequência de descarregamentos:

Célula cinza : de 400 para 50 kN/cm^2 ($\text{OCR} = 8$).

Célula marron : de 400 para 200 kN/cm^2 ($\text{OCR} = 2$).

Célula amarela: de 400 para 100 kN/cm^2 ($\text{OCR} = 4$).

Célula verde : de 400 para 50 kN/cm^2 ($\text{OCR} = 8$).

Esses descarregamentos tiveram como objetivo observar os efeitos de um sobreadensamento sobre a compressão secundária tais como o reaparecimento da compressão secundária, o aparecimento de uma expansão secundária e outras idéias expostas no item (IV.2) e sumarizadas na Figura (IV.6). Infelizmente, devido à problemas internos ao laboratório, não foi possível observar os corpos de prova, após o descarregamento, mais do que 20 dias.

V.4 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

O solo ensaiado, a argila do Sarapuí apresenta os seguintes valores para os limites de Atterberg: $\omega_L = 143\%$ e $\omega_p = 50\%$. Assim, portanto, o índice de plasticidade $I_p = 93\%$. A densidade dos grãos, determinada no picnômetro, vale 2.67. As características iniciais dos corpos de prova tais como: umidade (ω), peso específico (γ), peso específico seco (γ_d), grau de saturação (S) e índice de vazios (e_o) são apresentados na Tabela V.1.

CÉLULA	$\omega\%$	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	S%	e_o
VERDE	157.1	13.15	5.11	100	4.13
AMARELA	158.6	12.66	4.89	97.2	4.36
MARROM	152.2	13.14	5.21	100	4.03
CINZA	162.8	12.75	4.87	99.2	4.38

Tabela V.1 - Dados iniciais dos corpos de prova

Nas Tabelas V.2 a V.5 encontram-se os valores de medidas obtidas nos ensaios oedométricos assim como valores dos parâmetros que usualmente se obtêm em ensaios de adensamento. Tais parâmetros, são calculados considerando apenas estágios de carregamento de 24 horas de duração, desde que sejam subsequentes a um estágio com também 24 horas de duração. Assim é que, por exemplo, na célula marrom não são calculados para a tensão de 400 kN/m² os valores de a_v , m_v , c_v , etc..., por ser este um carregamento subsequente a um estágio de carga com 312 dias de duração e, portanto, não apresentar as mesmas características que os demais estágios.

Nas Figuras V.2 a V.5 apresentam-se as curvas e $\times \sigma'_v$ (esc. log.) traçadas para o final do primário ($d_{100}\sqrt{t}$) e para 24 horas de duração (df 24h). Apresentam-se também nestas figuras as estimativas das tensões de sobreadensamento, determinadas pelo processo de PACHECO SILVA (38) para a curva correspondente ao fim do primário. Nas Figuras V.6 a V.9 apresentam-se as curvas de volume específico (v) \times tensão vertical efetiva em papel bilogaritmico para o final do primário ($d_{100}\sqrt{t}$) e para 24 horas (df 24h). Também são apresentadas as tensões de sobreadensamento pelo processo de Pacheco Silva modificado por MARTINS (27).

SITUAÇÃO	σ'_V (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\varepsilon\%$	e	a_V 10 ⁻³ m ² /kN	m_V 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	c_V (logt) 10 ⁻⁷ m ² /s	c_V (\sqrt{t}) 10 ⁻⁷ m ² /s	k (logt) 10 ⁻⁶ m/s	k (\sqrt{t}) 10 ⁻⁶ m/s
inicial	0	0	0	4.128								
d ₁₀₀ (logt)	6.25	280	1.40	4.056								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	6.25	251	1.26	4.064								
df (24 h)	6.25	350	1.75	4.038	14.4	2.81	0.85	4.0	3.8	3.5	10.6	9.8
d ₁₀₀ (logt)	12.5	614	3.07	3.970								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	12.5	620	3.10	3.969								
df (24 h)	12.5	765	3.83	3.932	17.0	3.31	1.0	7.0	3.09	1.91	10.2	6.3
d ₁₀₀ (logt)	25	NÃO FOI	POSSÍVEL DETERMINAR									
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	25	1.460	7.30	3.754								
df (24 h)	25	2.126	10.6	3.583	27.9	5.44		10		1.22		6.6
d ₁₀₀ (logt)	50	4.210	21.1	3.049								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	50	4.025	20.1	3.096								
df (24 h)	50	4.800	24.0	2.897	27.4	5.35	12	46	0.19	0.21	1.0	1.1
d ₁₀₀ (logt)	75	5.920	29.6	2.610								

Tabela V.2 - Célula verde

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\epsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	$c_v(\text{logt})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$c_v(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$k(\text{logt})$ 10 ⁻⁶ m/s	$k(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁶ m/s
$d_{100}(\sqrt{t})$	75	5.775	28.9	2.647								
df (24 h)	75	6.222	31.1	2.533	14.6	2.84		87		0.09		0.24
df (312 dias)	75	6.628	33.1	2.429								
$d_{100}(\text{logt})$	400	9.920	49.6	1.585								
$d_{100}(\sqrt{t})$	400	9.800	49.0	1.615								
df (24 h)	400	10.155	50.8	1.524								
df (8 dias)	400	10.320	51.6	1.482								
	DESCARREGAMENTO											
$d_{100}(\text{logt})$	50	9,480	47.4	1.697								
$d_{100}(\sqrt{t})$	50	9.578	47.9	1.672								
df (24 h)	50	9.378	46.9	1.724								
df (20 dias)	50	9.255	46.3	1.755								

Tabela V.2 (Continuação) - Célula verde

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\varepsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	c_v (logt) 10 ⁻⁷ m ² /s	c_v (\sqrt{t}) 10 ⁻⁷ m ² /s	k (logt) 10 ⁻⁶ m/s	k (\sqrt{t}) 10 ⁻⁶ m/s
inicial	0	0	0	4.360								
d ₁₀₀ (logt)	6.25	NÃO FOI POSSÍVEL DETERMINAR										
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	6.25	193	0.97	4.296								
df (24 h)	6.25	300	1.50	4.267	14.9	2.78		4.0		3.5		9.7
d ₁₀₀ (logt)	12.5	NÃO FOI POSSÍVEL DETERMINAR										
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	12.5	421	2.11	4.235								
df (24 h)	12.5	498	2.49	4.214	8.48	1.58		6.5		2.1		3.3
d ₁₀₀ (logt)	25	848	4.24	4.121								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	25	853	4.27	4.120								
df (24 h)	25	1.032	5.16	4.072	11.4	2.12		6.5	3.0	2.0	6.4	4.3
d ₁₀₀ (logt)	50	2.500	12.5	2.679								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	50	2.340	11.7	3.722								
df (24 h)	50	3.138	15.7	3.509	22.5	4.20	9	3.7	0.29	0.31	1.2	1.3
d ₁₀₀ (logt)	100	5.500	27.5	2.877								

Tabela V.3 - Célula amarela

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\epsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	$c_v(\log t)$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$c_v(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$k(\log t)$ 10 ⁻⁶ m/s	$k(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁶ m/s
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	100	5.250	26.3	2.944								
df (24 h)	100	6.015	30.1	2.739	15.4	2.87	11	39	0.18	0.22	0.51	0.62
df (212 dias)	100	7.292	36.5	2.398								
d ₁₀₀ (logt)	400	10.430	52.2	1.559								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	400	10.200	51.0	1.620								
df (24 h)	400	10.748	53.7	1.474								
df (8 dias)	400	10.949	54.7	1.420								
DESCARREGAMENTO												
d ₁₀₀ (logt)	100	10.489	52.4	1.543								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	100	10.556	52.8	1.525								
df (24 h)	100	10.431	52.2	1.559								
df (20 dias)	100	10.381	51.9	1.572								

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\varepsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	c_v (logt) 10 ⁻⁷ m ² /s	c_v (\sqrt{t}) 10 ⁻⁷ m ² /s	k (logt) 10 ⁻⁶ m/s	k (\sqrt{t}) 10 ⁻⁶ m/s
inicial	0	0	0	4.030								
d ₁₀₀ (logt)	6.25	298	1.49	3.955								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	6.25	298	1.49	3.955								
df (24 h)	6.25	380	1.90	3.935	15.2	3.02		6		2.3		7.0
d ₁₀₀ (logt)	12.5	612	3.06	3.876								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	12.5	605	3.03	3.878								
df (24 h)	12.5	785	3.68	3.845	14.4	2.86	2	8	1.54	1.67	4.4	4.8
d ₁₀₀ (logt)	25	1.425	7.13	3.672								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	25	1.374	6.87	3.685								
df (24 h)	25	1.892	9.46	3.554	23.3	4.63	4	17	0.71	0.73	3.3	3.4
d ₁₀₀ (logt)	50	4.063	20.3	3.008								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	50	3.935	19.7	3.040								
df (24 h)	50	4.579	22.9	2.879	27.0	5.37	15	68	0.15	0.15	0.82	0.78
d ₁₀₀ (logt)	200	8.650	43.3	1.855								

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\varepsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	c_v (logt) 10 ⁻⁷ m ² /s	c_v (\sqrt{t}) 10 ⁻⁷ m ² /s	k (logt) 10 ⁻⁶ m/s	k (\sqrt{t}) 10 ⁻⁶ m/s
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	100	8.400	42	1.918								
df (24 h)	200	8.980	44.9	1.772	7.38	1.47	10	42	0.14	0.15	0.21	0.22
df (30 dias)	200	9.718	48.6	1.586								
d ₁₀₀ (logt)	400	10.285	51.4	1.443								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	400	10.250	51.3	1.452								
df (24 h)	400	10.480	52.4	1.394								
df (8 dias)	400	10.631	53.2	1.356								
	DESCARREGAMENTO											
d ₁₀₀ (logt)	200	10.480	52.4	1.394								
d ₁₀₀ (\sqrt{t})	200	10.526	52.6	1.383								
df (24 h)	200	10.465	52.3	1.398								
df (20 dias)	200	10.445	52.2	1.403								

Tabela V.4 (Continuação) - Célula marrom

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\epsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	$c_v(\text{logt})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$c_v(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$k(\text{logt})$ 10 ⁻⁶ m/s	$k(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁶ m/s
inicial	0	0	0	4.381								
$d_{100}(\text{logt})$	6.25	294	1.47	4.302								
$d_{100}(\sqrt{t})$	6.25	312	1.56	4.297								
df (24 h)	6.25	320	1.60	4.295	13.8	2.56	0.9	11.5	3.6	1.2	3.1	3.1
$d_{100}(\text{logt})$	12.5	512	2.56	4.243								
$d_{100}(\sqrt{t})$	12.5	510	2.55	4.243								
df (24 h)	12.5	586	2.93	4.223	11.5	2.14	0.9	5.0	3.5	2.7	7.5	5.8
$d_{100}(\text{logt})$	25	1.136	5.68	4.075								
$d_{100}(\sqrt{t})$	25	1.045	5.23	4.100								
df (24 h)	25	1.537	7.69	3.967	20.5	3.81	2.5	8.0	1.2	1.6	4.6	6.1
$d_{100}(\text{logt})$	50	3.775	18.86	3.365								
$d_{100}(\sqrt{t})$	50	3.490	17.45	3.442								
df (24 h)	50	4.185	20.93	3.255	28.5	5.29	17	60	0.14	0.17	0.75	0.92
$d_{100}(\text{logt})$	400	10.600	53.0	1.529								

Tabela V.5 - Célula cinza

SITUAÇÃO	σ'_v (kN/m ²)	deformação 10 ⁻⁴ cm	$\varepsilon\%$	e	a_v 10 ⁻³ m ² /kN	m_v 10 ⁻³ m ² /kN	t_{50} minutos	t_{90} minutos	$c_v(\text{logt})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$c_v(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁷ m ² /s	$k(\text{logt})$ 10 ⁻⁶ m/s	$k(\sqrt{t})$ 10 ⁻⁶ m/s
$d_{100} (\sqrt{t})$	400	10.350	51.8	1.596								
df (24 h)	400	10.889	54.4	1.451	5.15	0.958	9	39	0.14	0.14	0.13	0.13
df (312 dias)	400	11.140	55.7	1.384								
DESCARREGAMENTO												
$d_{100} (\text{logt})$	50	10.744	53.7	1.490								
$d_{100} (\sqrt{t})$	50	10.810	54.1	1.472								
df (24 h)	50	10.707	53.5	1.500								
df (20 dias)	50	10.591	52.9	1.531								

Tabela V.5 (Continuação) - Célula cinza

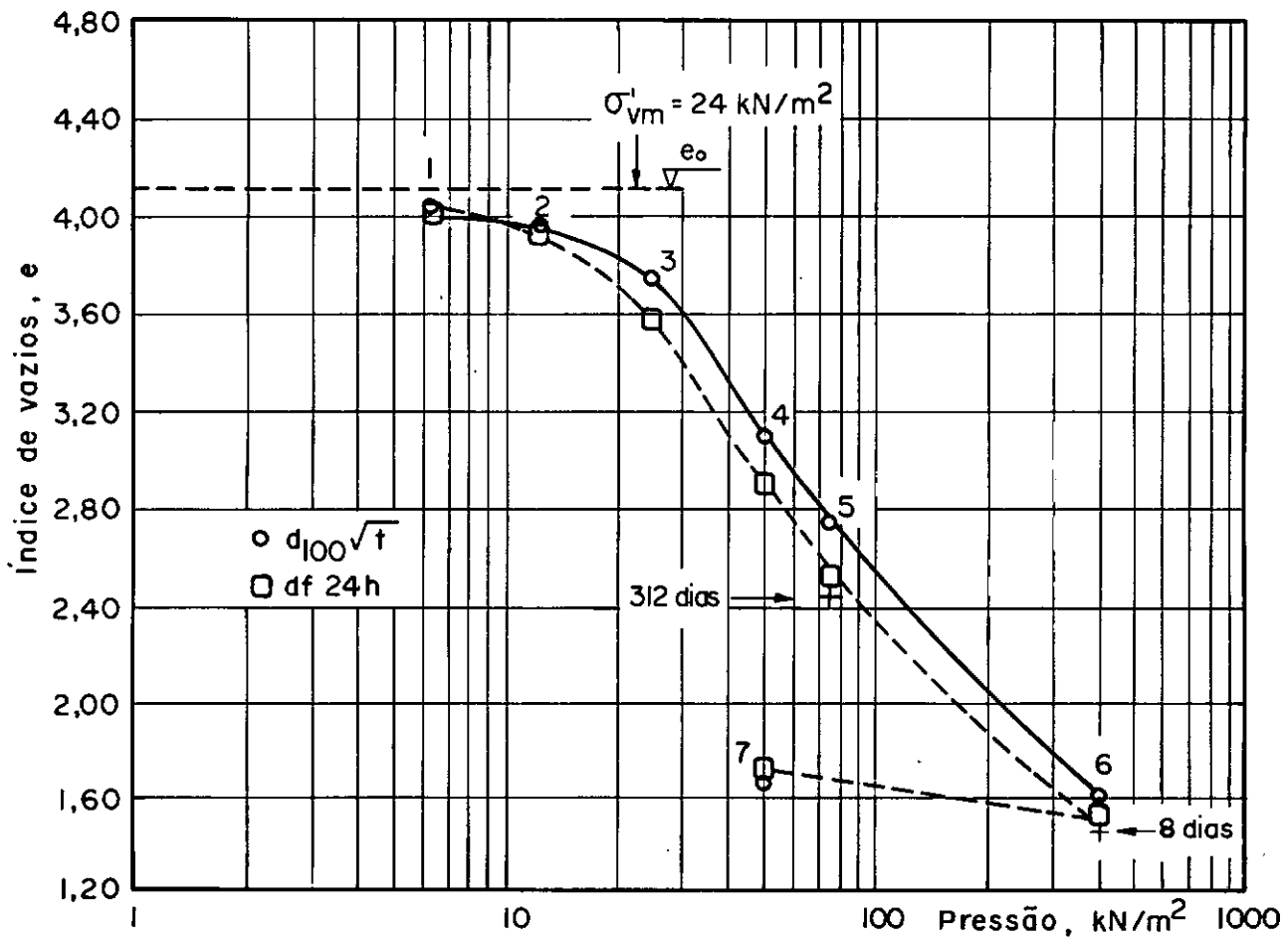


Figura V.2 - Célula verde - $e \times \sigma'_v$ (esc.log)

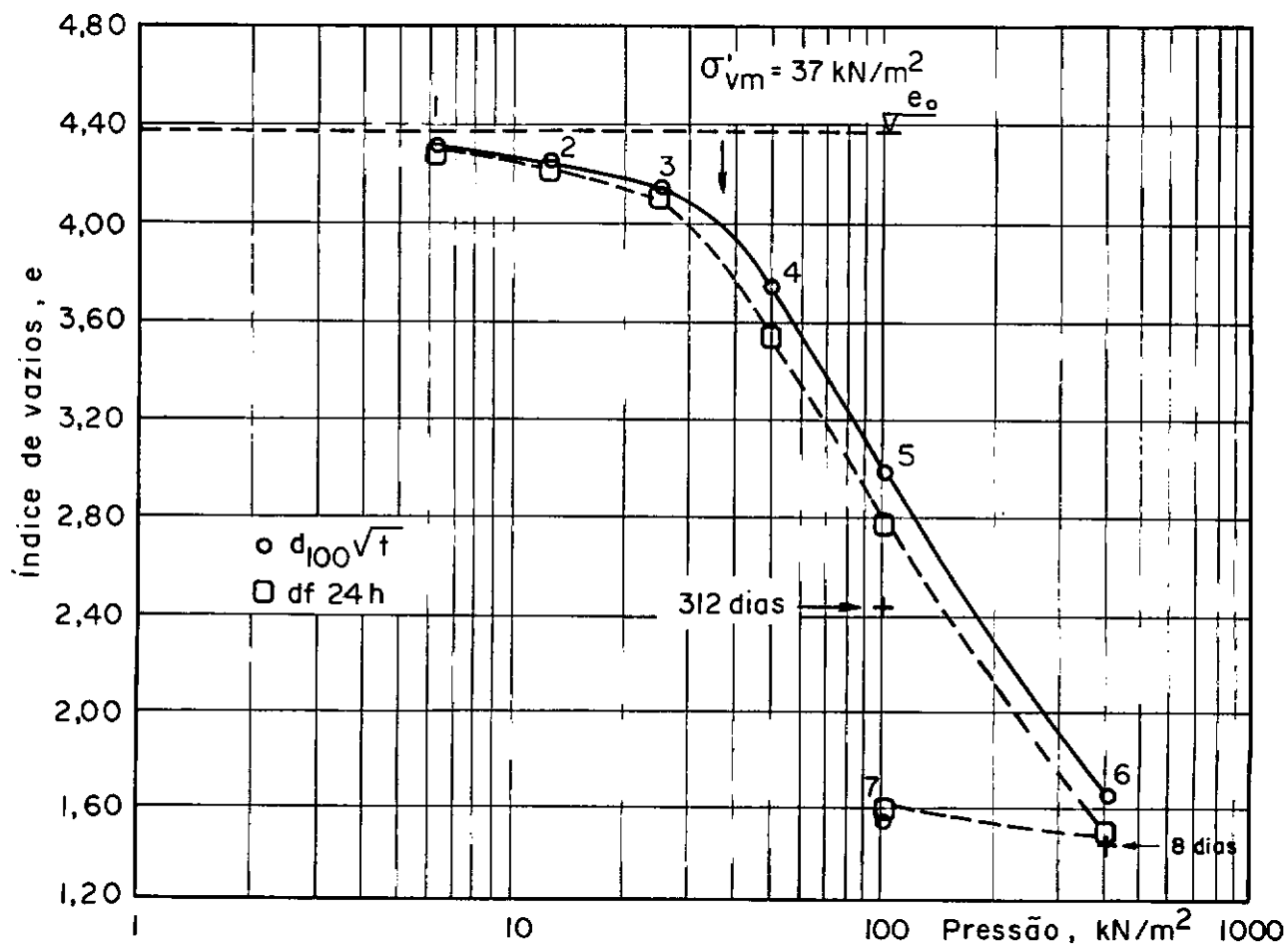


Figura V.3 - Célula amarela - $e \times \sigma'_v$ (esc.log)

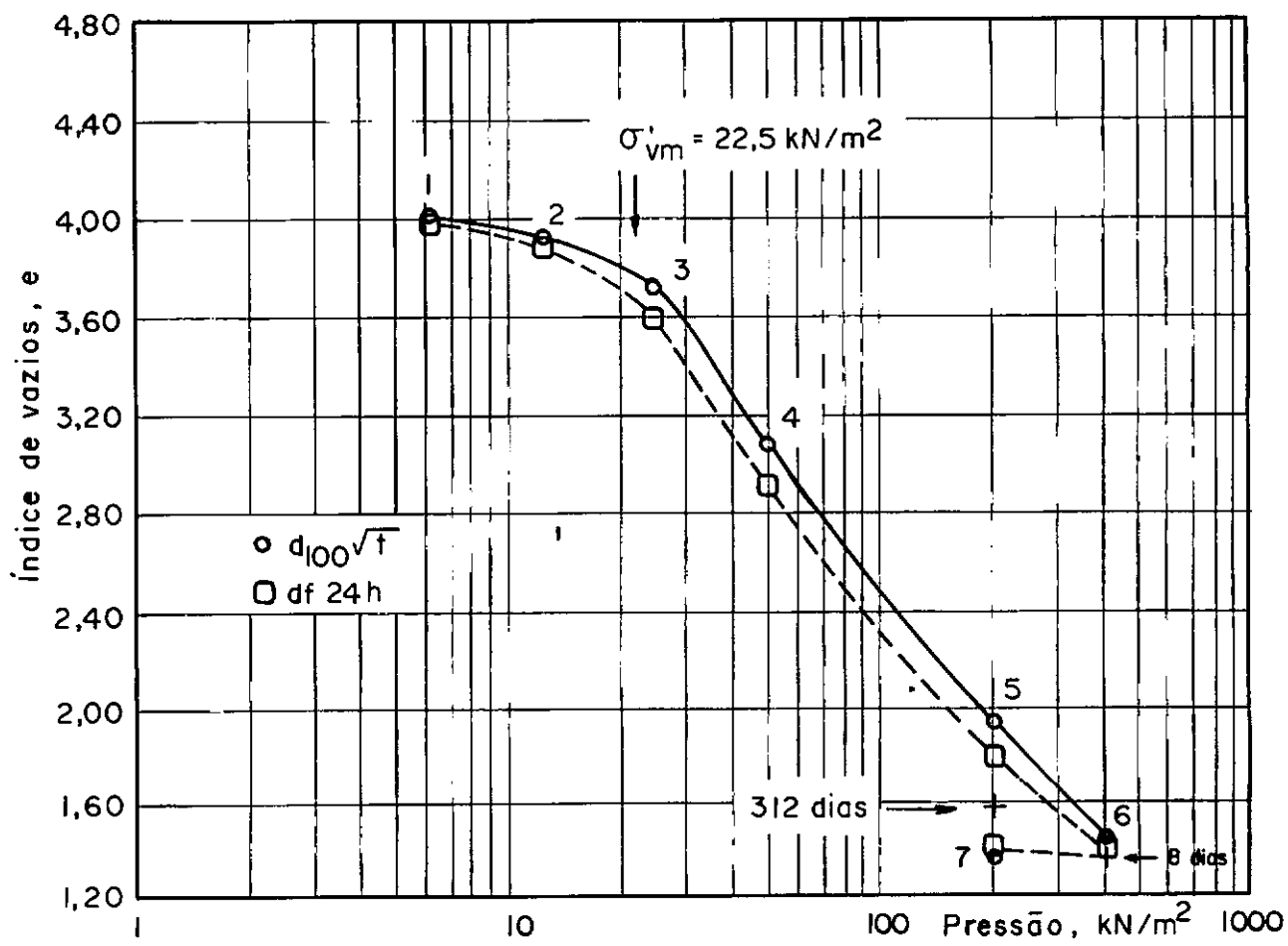


Figura V.4 - Célula marrom - $e \times \sigma'_v$ (esc.log)

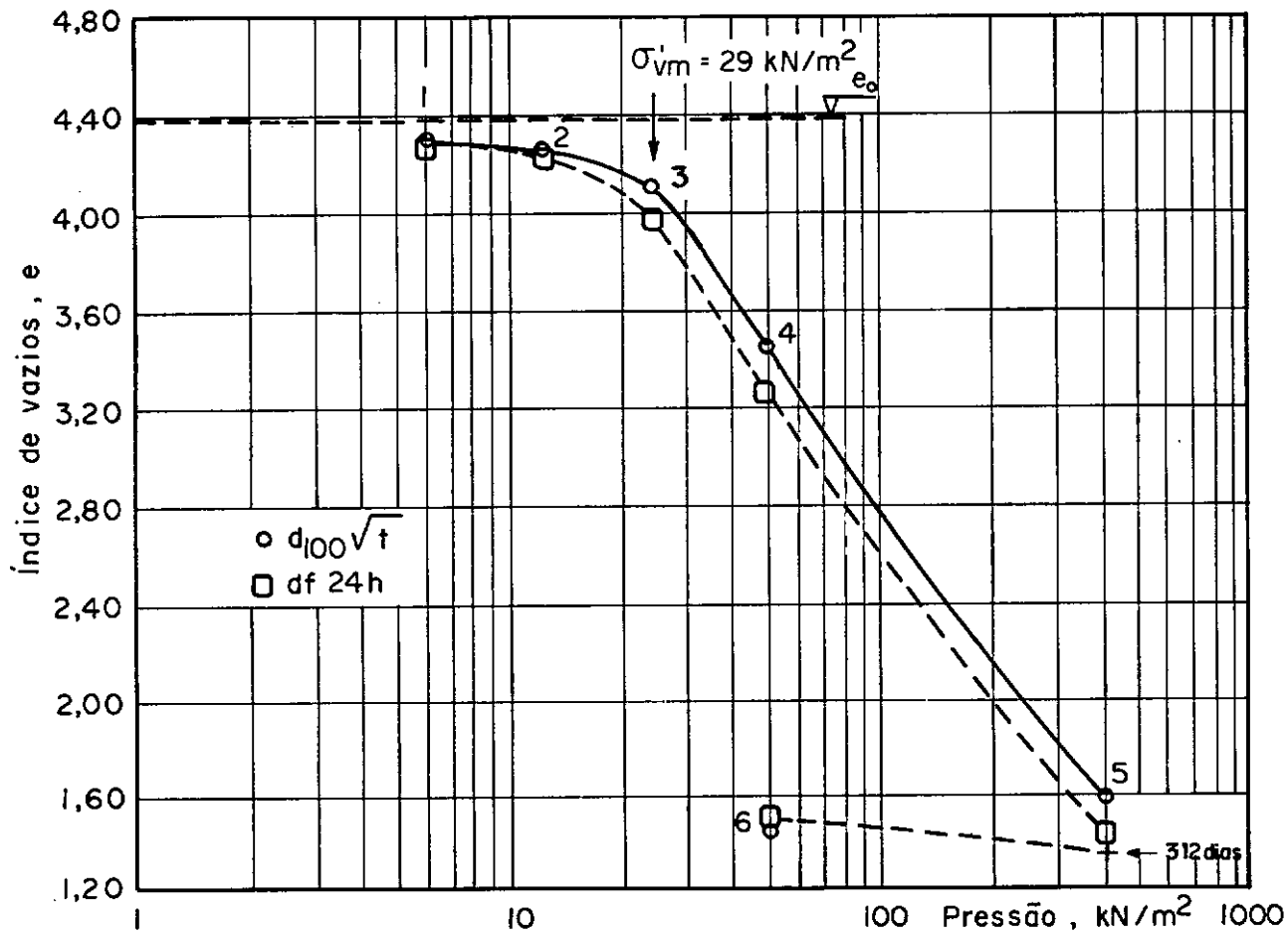


Figura V.5 - Célula cinza - $e \times \sigma'_v$ (esc.log)

$$v = 1 + e$$

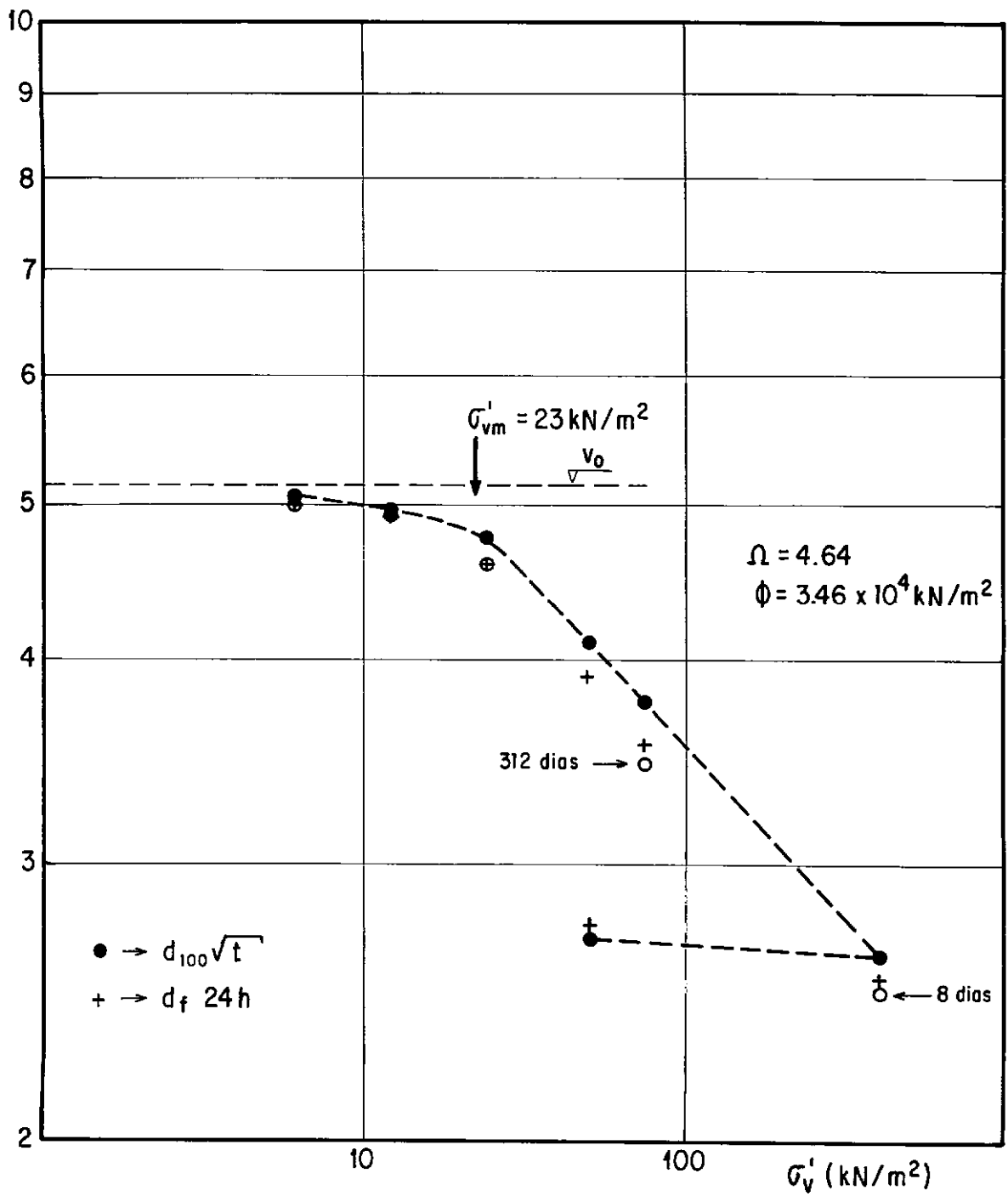


Figura V.6 - Célula verde - $v \times \sigma'_v$ (esc.log.log)

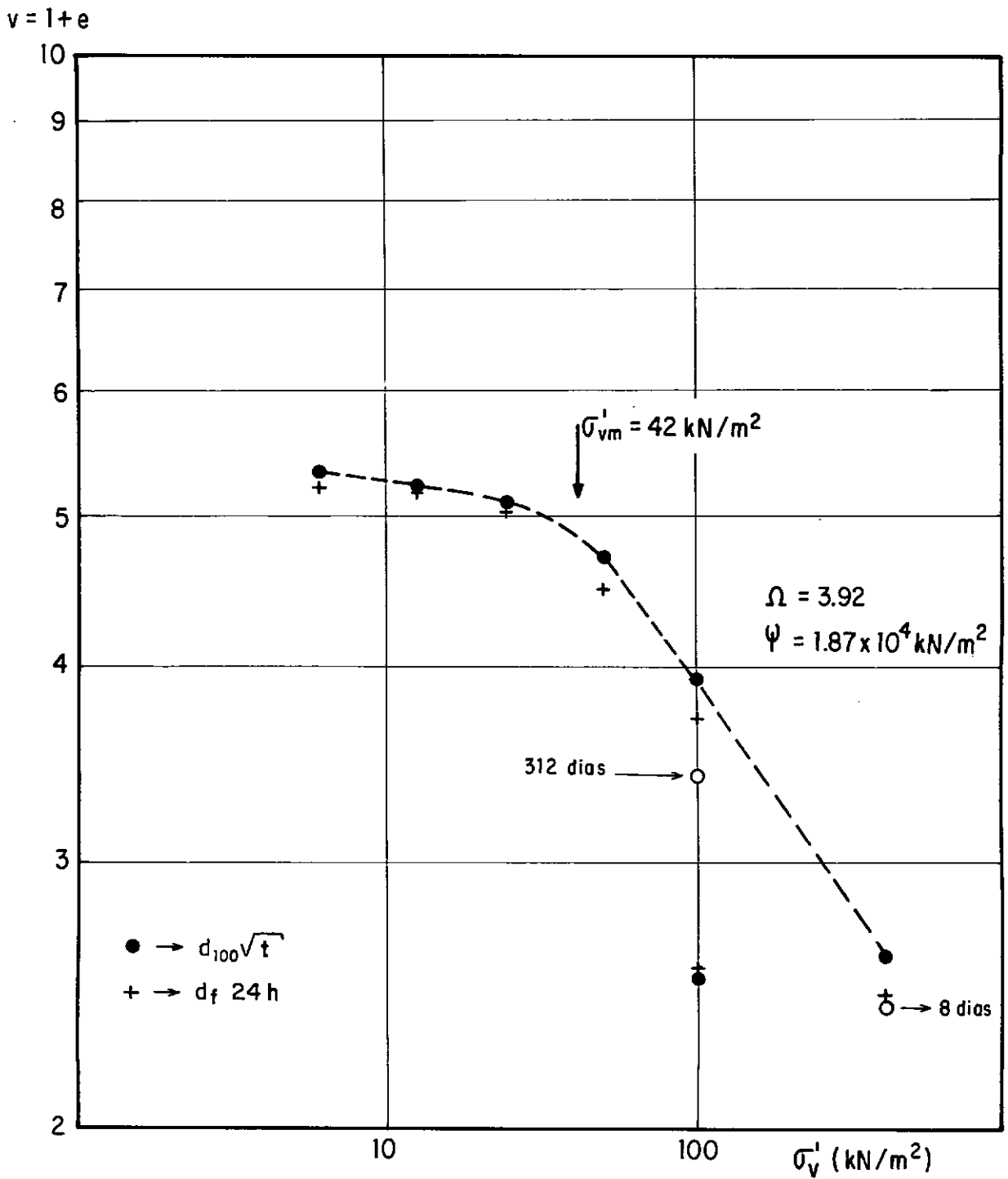


Figura V.7 - Célula amarela - $v \times \sigma'_v$ (esc.log.log)

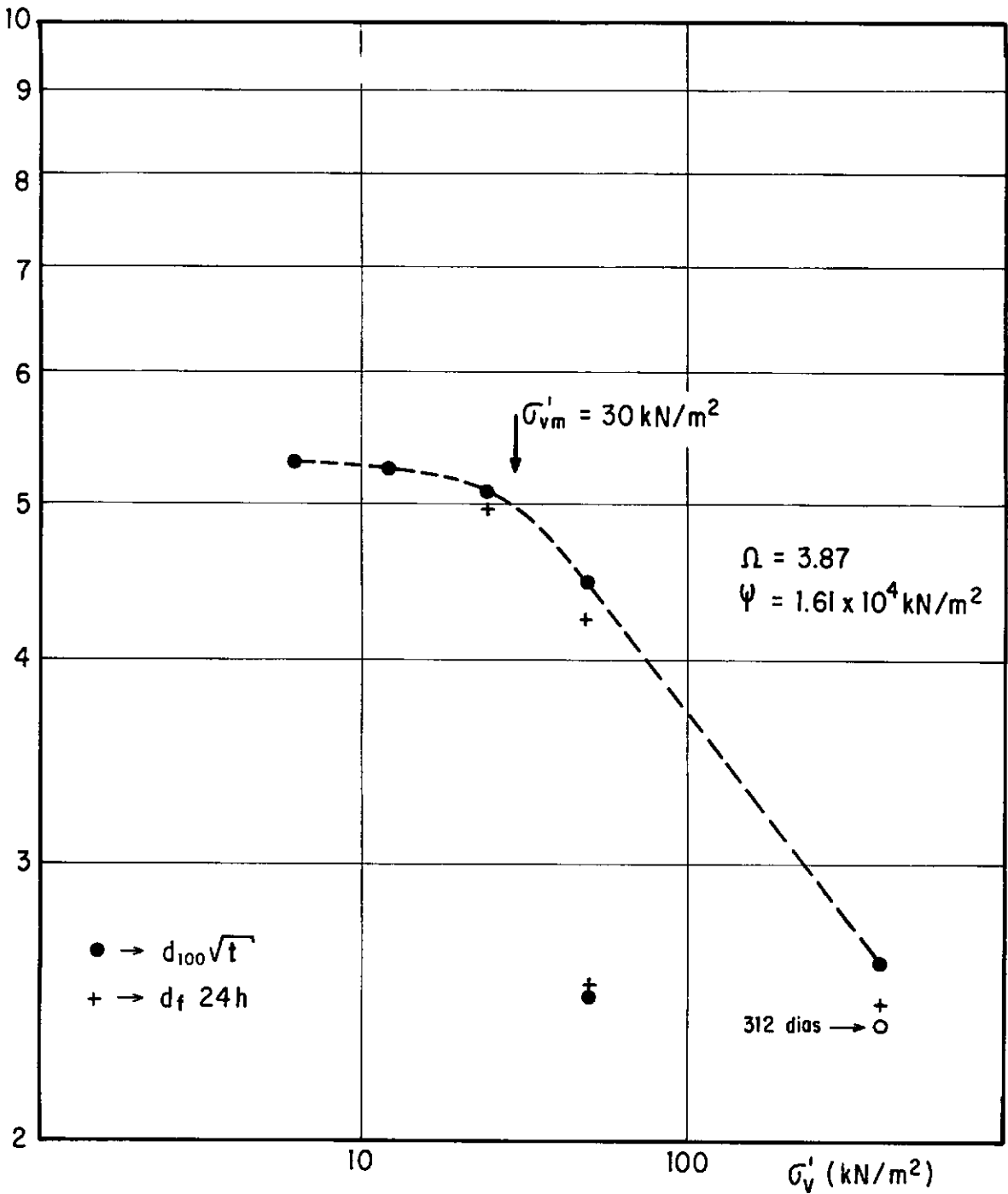
$v = 1 + e$


Figura V.8 - Célula marrom - $v \times \sigma'_v$ (esc.log.log)

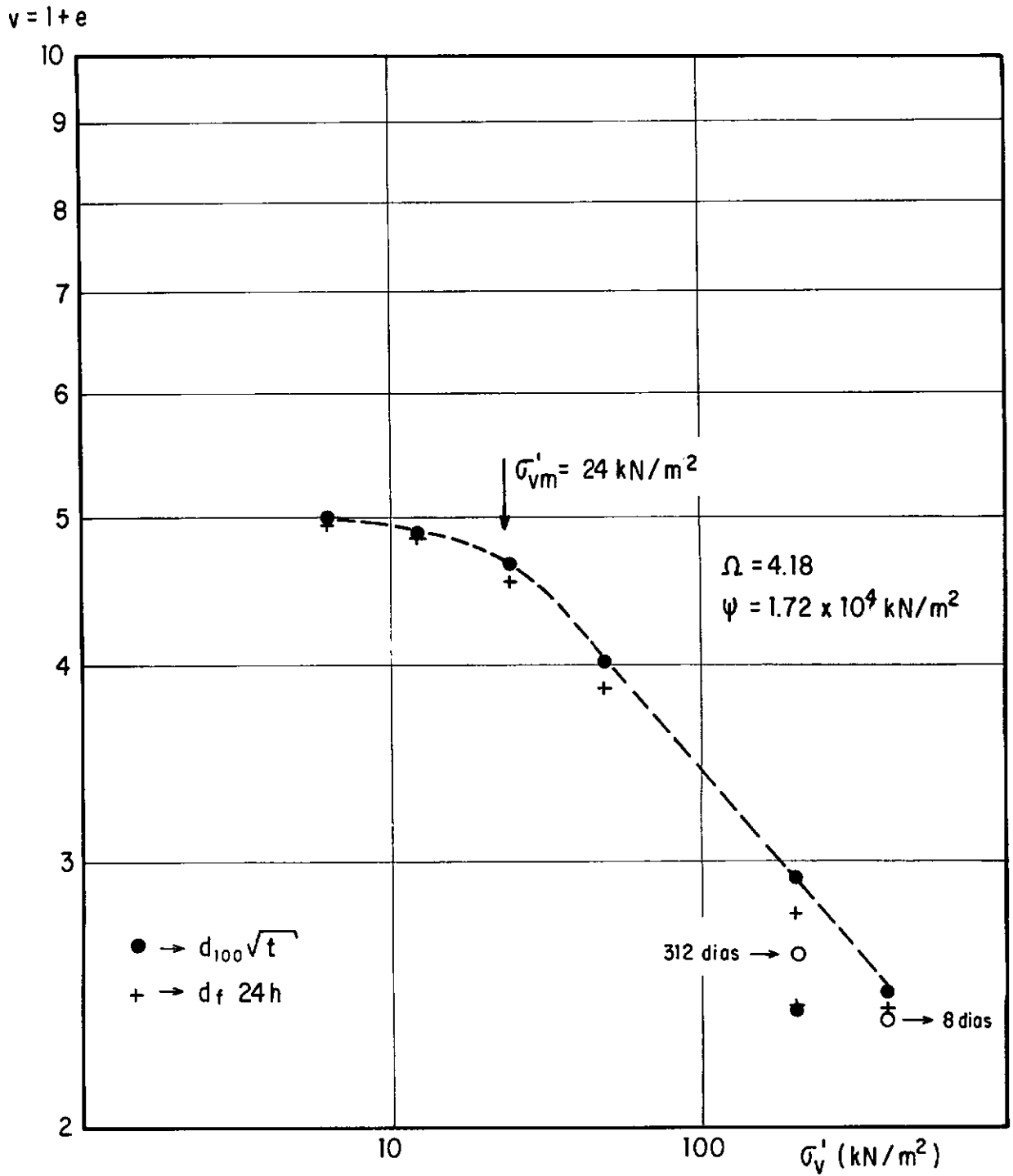


Figura V.9 - Célula cinza - $v \times \sigma'_v$ (esc.log.log)

Apresentam-se na Tabela V.6 os valores da tensão de sobreadensamento determinados a partir das curvas de compressão correspondentes ao final do adensamento primário e ao final de 24 horas. Para efeito comparativo foram usados os processos de CASAGRANDE, PACHECO SILVA e PACHECO SILVA modificado por MARTINS (27).

	FINAL DO PRIMÁRIO			24 HORAS		
CÉLULA	CASAGRANDE	PACHECO SILVA	PACHECO SILVA MODIFICADO	CASAGRANDE	PACHECO SILVA	PACHECO SILVA MODIFICADO
verde	25	24	23	22	19	20
amarela	43.5	37	42	35	30	38
marrom	25	22.5	24	24	20	21.5
cinza	26	25	30	23.5	20.5	25

Tabela V.6 - Tensões de sobreadensamento para argila ensaiada (em kN/m^2)

Apresentam-se nas Tabelas V.7 a V.10 os valores do índice de compressão C_c tangente à curva e $x \log \sigma'_v$ no ponto considerado. Os pontos considerados são aqueles correspondentes ao final do adensamento primário, associados às leituras $d_{100}(\sqrt{t})$, e numerados como consta nas Figuras V.2 a V.5. Cabe ressaltar que a notação C_c , aqui neste item, vale tanto para o trecho de recompressão como para o trecho de compressão virgem. Apresentam-se também nas Tabelas V.7 à V.10 os valores de C_α determinados

para cada estágio (pontos numerados das Figuras V.2 a V.5), segundo a recomendação de MESRI e CASTRO (33).

σ_v (kN/m ²)	C_c	C_α	C_α/C_c
6.25	0.100	0.00664	0.066
12.5	0.429	0.0166	0.039
25	1.414	0.083	0.059
50	2.15	0.140	0.065
75	1.766	0.143	0.081
400	1.150	0.0564	0.049

Tabela V.7 - Valores de C_c , C_α e C_α/C_c - célula verde

σ_v (kN/m ²)	C_c	C_α	C_α/C_c
6.25	0.068	0.00664	0.098
12.5	0.285	0.0097	0.034
25	0.70	0.0199	0.028
50	1.98	0.153	0.077
100	2.48	0.179	0.072
400	1.48	0.0739	0.050

Tabela V.8 - Valores de C_c , C_α e C_α/C_c - célula amarela

σ_v (kN/m ²)	C_c	C_α	C_α/C_c
6.25	0.14	0.00332	0.024
12.5	0.40	0.0466	0.0415
25	1.26	0.0664	0.053
50	2.12	0.124	0.058
200	1.72	0.068	0.040
400	1.48	0.0487	0.033

Tabela V.9 - Valores de C_c , C_α e C_α/C_c - célula marrom

σ_v (kN/m ²)	C_c	C_α	C_α/C_c
6.25	0.12	0.001	0.083
12.5	0.24	0.0033	0.0138
25	1.36	0.056	0.042
50	2.46	0.163	0.066
400	1.64	0.03	0.018

Tabela V.10 - Valores de C_c , C_α e C_α/C_c - célula cinza

Na Tabela V.11 são apresentados os valores das constantes ψ e Ω da formulação de MARTINS (27). Lembra-se aqui que $v = 1 + e$ e que segundo esta formulação

$$\sigma'_v = \frac{\psi}{v^\Omega} \quad (V.1)$$

e, portanto,

$$\log \sigma'_v = \log \psi - \Omega \log v \quad (V.2)$$

CÉLULA	ψ (kN/m ²)	Ω
verde	3.46 x 10 ⁴	4.64
amarela	1.87 x 10 ⁴	3.92
marrom	1.72 x 10 ⁴	4.18
cinza	1.61 x 10 ⁴	3.87

Tabela V.11 - Valores de ψ e Ω

Nas Figuras V.10 à V.13 estão apresentadas as curvas leitura de extensômetro x tempo (escala log). Deve-se ressaltar que para analisar tais curvas à luz da abordagem de MARTINS e LACERDA (28) os estágios de carga apresentados nas mencionadas figuras deveriam ter tido início justamente ao "fim do primário" do estágio anterior. Tal não ocorreu pois à época não se atentou para este fato. Assim nas Figuras V.10 à V.13 a curva tracejada, partindo da leitura correspondente ao "final do primário" do estágio anterior, representa uma estimativa do trecho inicial da curva de adensamento.

Nas Figuras V.14 são apresentadas as curvas de descarregamento das amostras. Na Tabela V.12 são apresentados, para o descarregamento, o OCR gerado e o coeficiente de expansão secundária.

CÉLULA	TENSÃO EFETIVA (kN/m ²)	OCR	$C_{\alpha} = \Delta e / \Delta \log t$
verde	50	8	0.030
amarela	100	4	0.005
marrom	200	2	0
cinza	50	8	0.048

Tabela V.12 - Valores de C_{α} no descarregamento

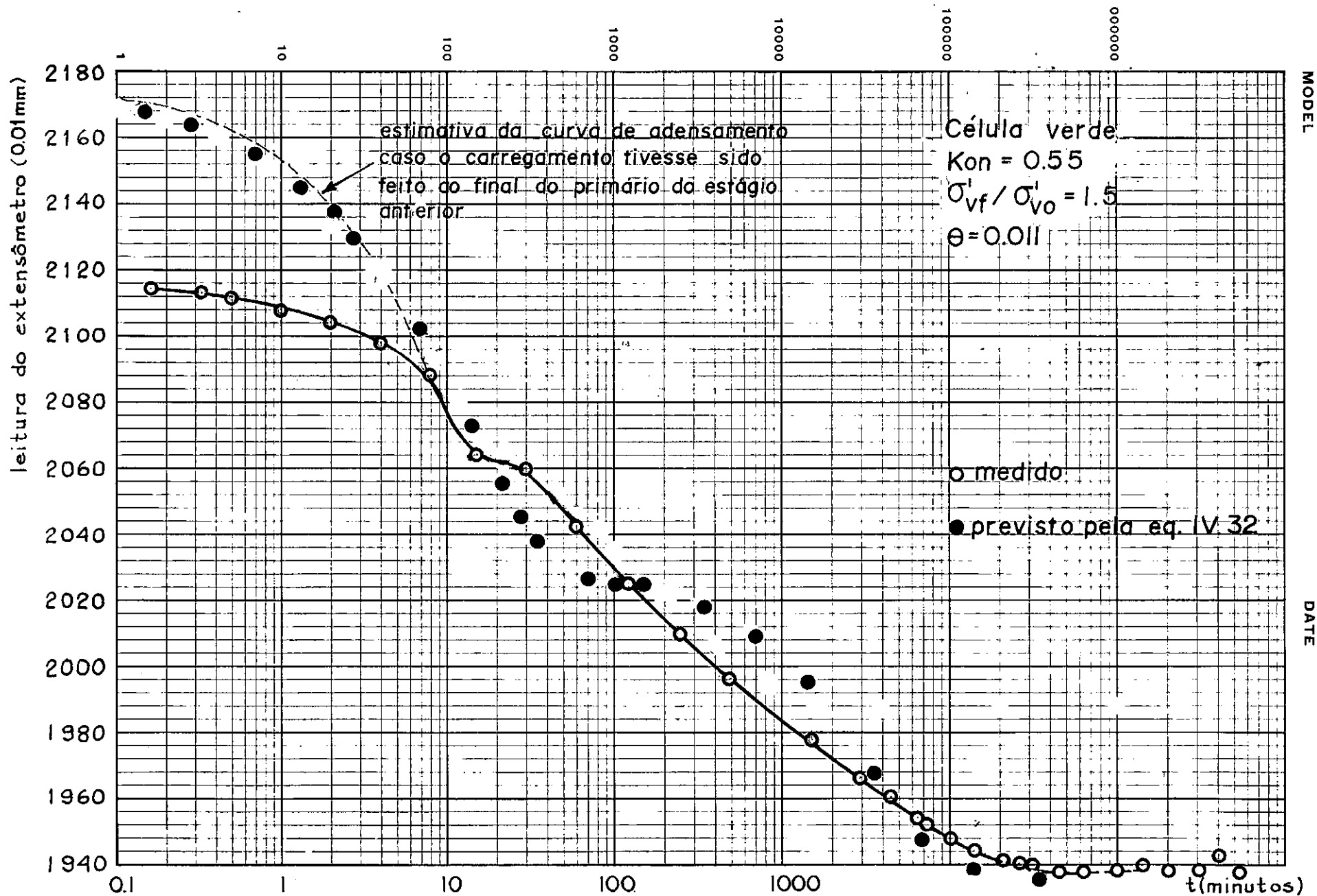


Fig. V.10 Curva de adensamento de longa duração-célula verde

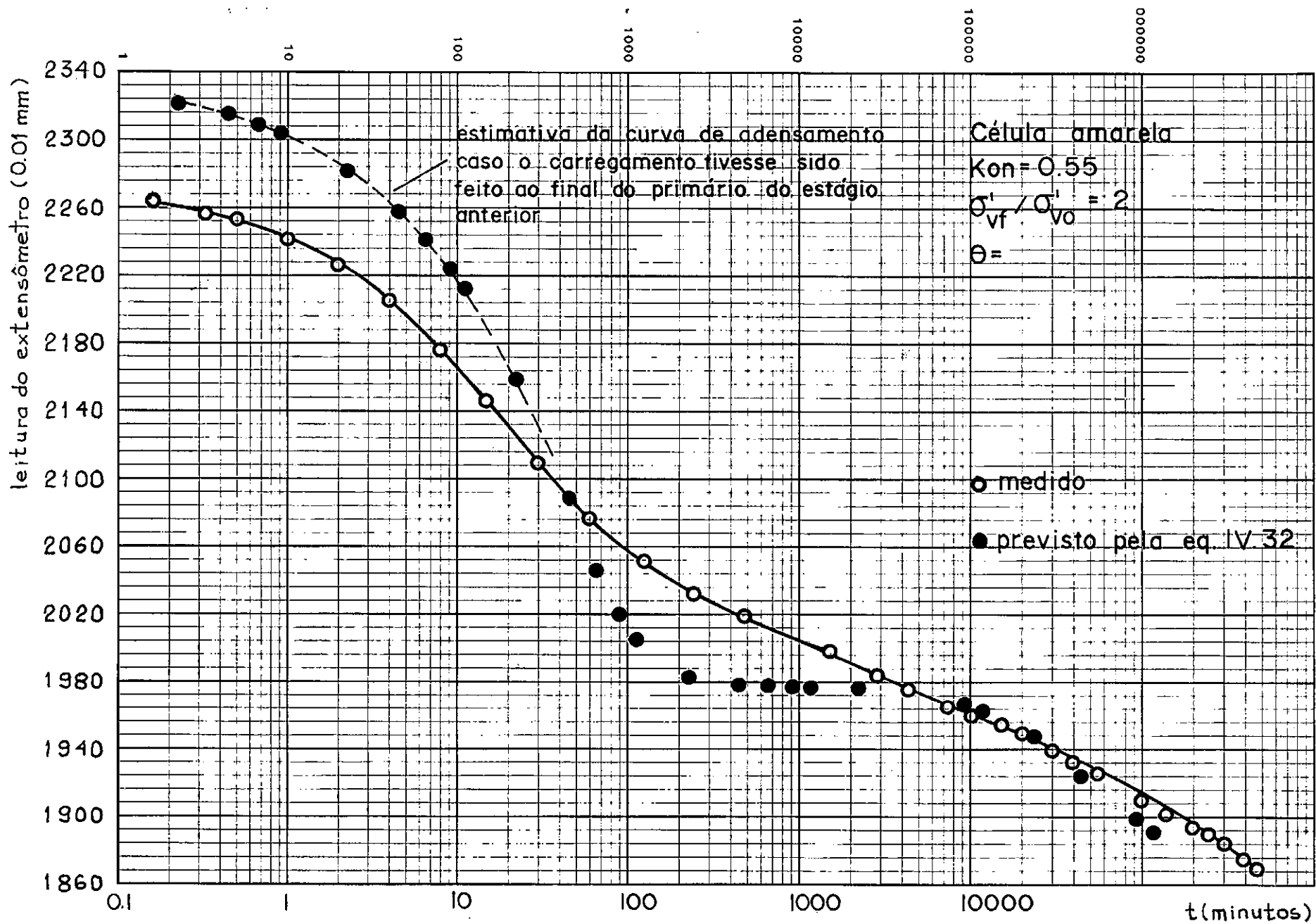


Fig.V.11 Curva de adensamento de longa duração-célula amarela

MODEL

DATE

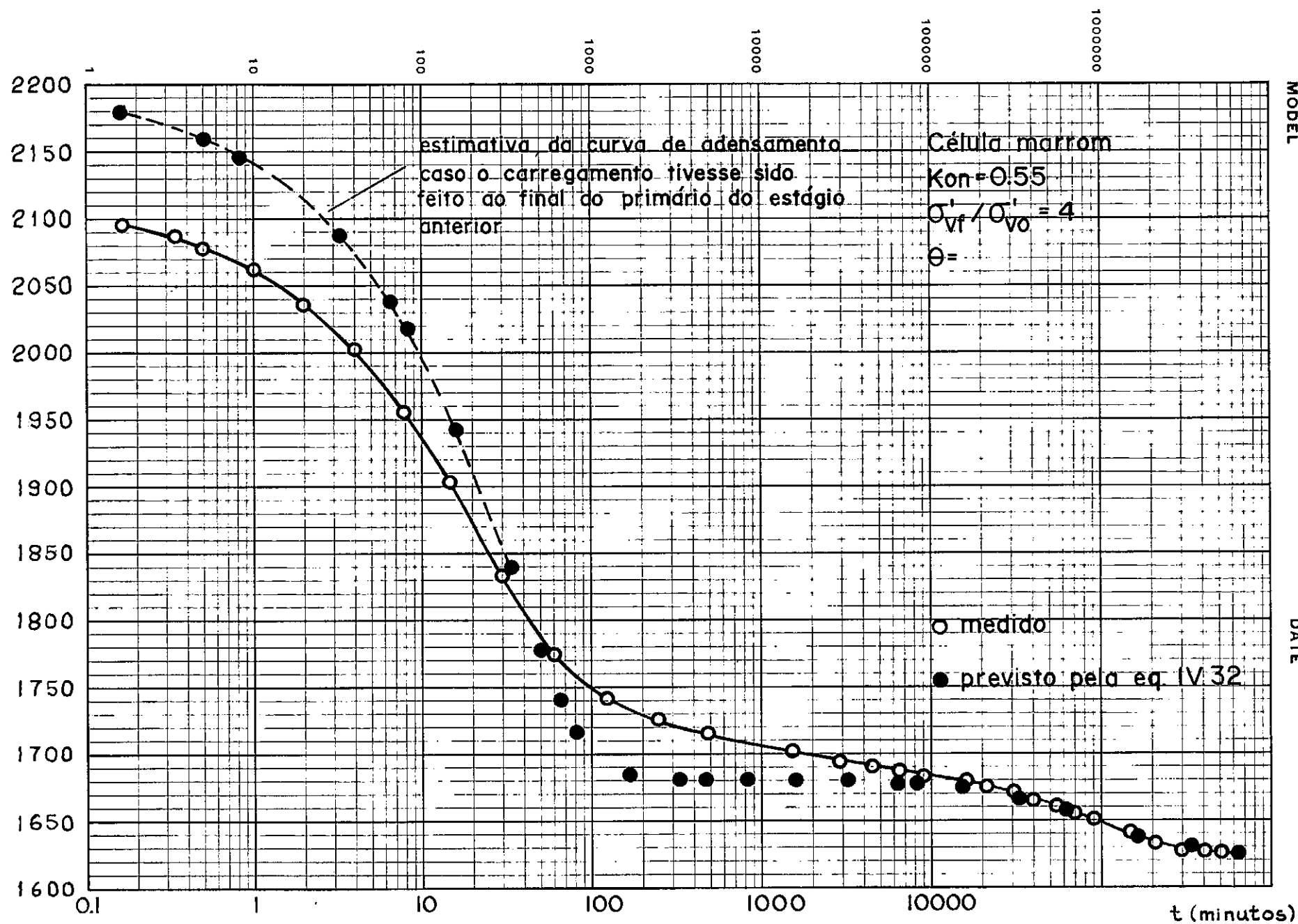


Fig. V.12 Curva de adensamento de longa duração-célula marrom

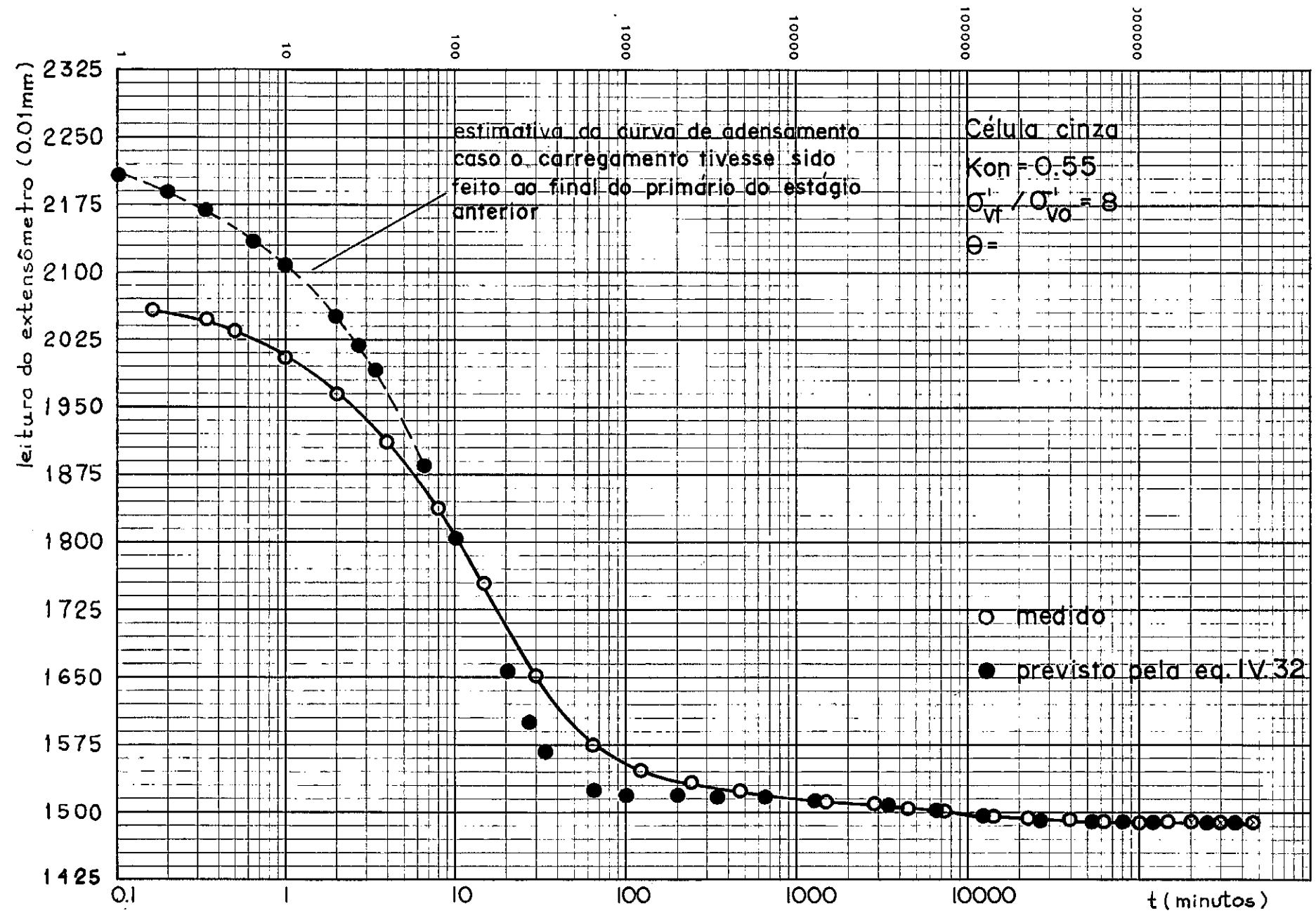
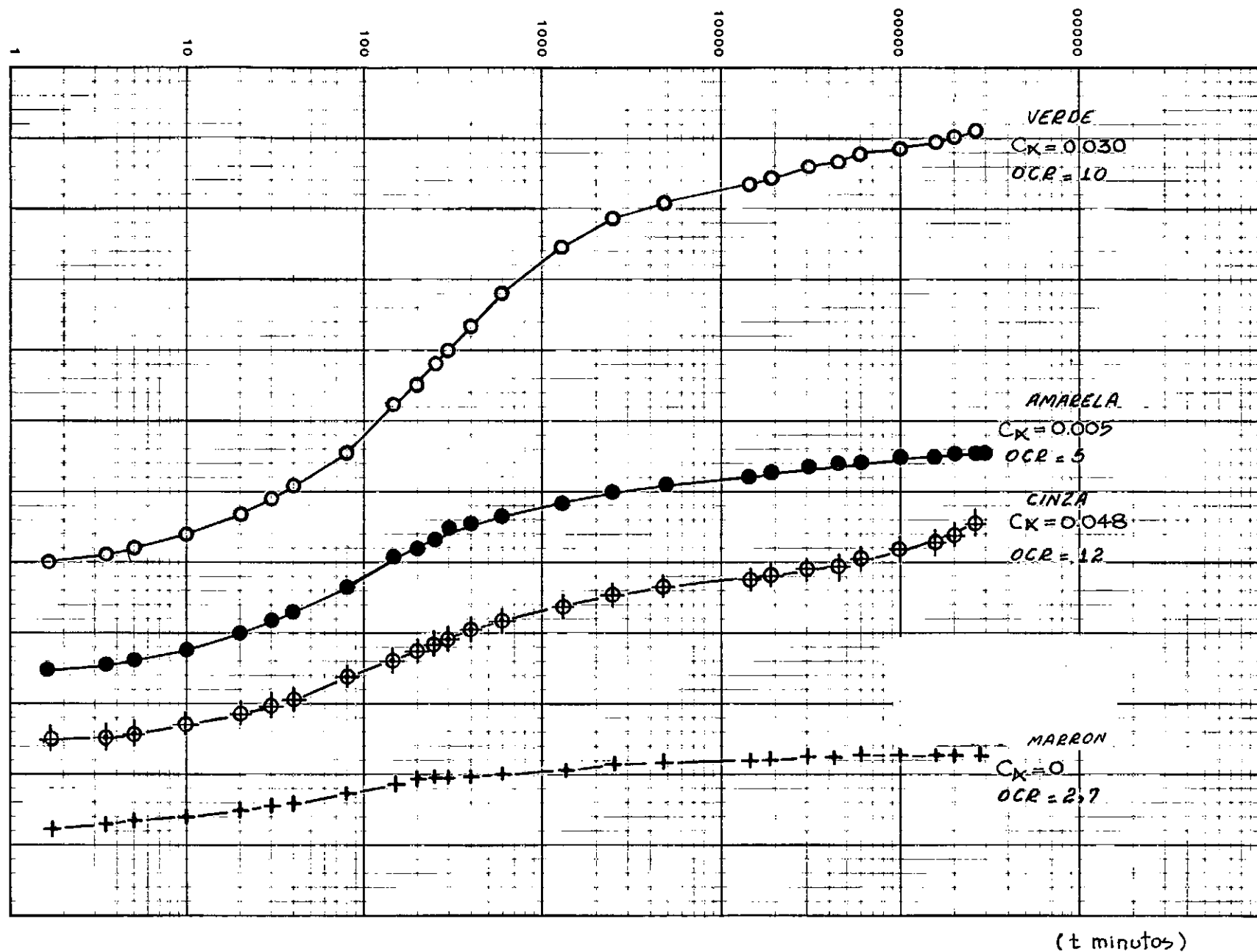


Fig. V.13 Curva de adensamento de longa duração— célula cinza

Índice de vazios e



MODEL

DATE

V.5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Começa-se esta análise lembrando que a Argila do Sarapuí é uma argila de consistência muito mole o que é condizente com o fato de sua umidade natural estar próxima ao limite de liquidez.

Em termos de compressibilidade observa-se nas Figuras V.2 à V.5 que o trecho de compressão virgem não é retilíneo no gráfico $e \times \log \sigma'_v$, longe disso, a variação do valor do índice de compressão atinge, por exemplo, na célula verde (no trecho virgem) variações de até 46.5% (medido em relação ao valor mais alto). Isto é, aliás, segundo MARTINS (27) bom indício da qualidade da amostra. Por outro lado o gráfico $\log v \times \log \sigma'_v$ apresentou-se retilíneo no trecho virgem. O parâmetro Ω , que regula a compressibilidade da amostra no gráfico $\log v \times \log \sigma'_v$, mostrou uma variação em torno da média dos 4 ensaios de até 10%. Este pequeno valor na variação de Ω indica que a utilização deste parâmetro pode ser mais interessante na prática do cálculo de recalques do que o índice de compressão. Esta constatação se torna mais importante ainda se se observar que as curvas de compressão ($e \times \sigma'_v$) não são idênticas entre si, o que se poderia explicar pela existência de minúsculas raízes provocadoras de heterogeneidade, não só entre as amostras, como também no interior de cada amostra. Isto pode ser observado no valor do parâmetro ψ apresentado pela amostra da célula verde. Tal parâmetro, segundo MARTINS (27), reflete a compressibilidade dos minerais constituintes do solo. Isto reforça a suspeita da heterogeneidade da amostra da célula verde que também é a que apresenta o valor mais alto para Ω .

Quanto ao efeito da compressão secundária sobre a determinação da tensão de sobreadensamento ela torna-se flagrante nas Figuras V.2 a V.5. O aumento médio na tensão de sobreadensamento, tomando-se a curva e σ'_v correspondente ao "final do primário", é de 13% em relação à curva correspondente à 24 horas. O autor é da opinião de que no ensaio de adensamento deva ser apresentada sempre a curva de compressão correspondente ao "final do primário". Esta opinião prende-se ao fato de que a curva e σ'_v correspondente à 24 horas apresenta diferentes valores do grau de adensamento secundário a ela incorporados.

É digna de nota a pequena diferença entre os valores de σ'_{vm} determinados pelo processo de Casagrande e pelo processo de Pacheco Silva modificado. É recomendável a continuidade do estudo comparativo entre os dois métodos para que se verifique a extensão (em termos da variedade dos solos) da validade do método de Pacheco Silva modificado e se propugne a adoção deste método em substituição ao de Casagrande. Isto porque este método alternativo tem a grande vantagem de não envolver nenhuma decisão pessoal, como é o caso, no método de Casagrande, da escolha na curva e $x \log \sigma'_v$, do ponto de máxima curvatura.

Os valores encontrados para a relação C_α/C_c têm para valor médio 0.052. Entretanto, a dispersão é considerável como se pode observar comparando-se as Tabelas V.7 à V.10.

O mais interessante é a análise das curvas das Figuras V.2 à V.5 conjuntamente com as curvas de deformação $x \log$ tempo (Figuras V.10 à V.13). Inicialmente, é interessante notar que

de fato as curvas experimentais deformação x log tempo têm o mesmo formato das curvas teóricas propostas por MARTINS e LACERDA (28). Vale ressaltar, que a abordagem de MARTINS e LACERDA (28), para a Argila do Sarapuĩ, subestima a compressão secundária. Isso poderia ser explicado lembrando que, de acordo com LACERDA e MARTINS (19), a compressão secundária no ensaio oedométrico é um fenômeno de relaxação de tensões envolvendo, assim, não só o módulo de deformação na direção vertical como o módulo de deformação na horizontal. Ora, devido à sedimentação, os solos naturais são anisotrópicos com módulo de deformação vertical provavelmente maior que o horizontal. Isso provocaria a discrepância observada. A argumentação se baseia nos resultados obtidos com a amostra de Caulim, moldada em laboratório e, portanto, provavelmente isotrópica. Nessa amostra os resultados obtidos (Figura IV.12) estão muito mais próximos da previsão feita. Entretanto, uma conclusão mais sólida a esse respeito poderia ser tentada a partir da comparação de ensaios oedométricos em corpos de prova moldados segundo a vertical e a horizontal. Não obstante, é bom lembrar que mesmo assim a abordagem de MARTINS e LACERDA (28) foi capaz de prever a curva deformação x tempo num ensaio de longa duração (≈ 1 ano) com um erro inferior a 10%. Além disso, os ensaios confirmaram a previsão de que o adensamento secundário é tão mais importante quanto menor for o valor da relação $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$.

No caso das expansões observadas nos descarregamentos é importante notar que todas estão de acordo com o idealizado pela Figura IV.6. Para discutir este ponto é conveniente lembrar que, segundo a abordagem de LACERDA e MARTINS (19), quando se atinge $k_o = 1$ não há nem compressão nem expansão secundária.

Para que se possa avaliar os valores de K_o atingidos com o descarregamento pode-se lançar mão da Equação (IV.35) proposta por MAYNE e KULHAWY (29).

$$K_o = (1 - \text{sen } \phi') \text{OCR}^{\text{sen } \phi'} \quad (\text{IV.35})$$

Antes que se façam estas estimativas é fundamental observar que os valores de OCR a entrar na Equação (IV.35) não são simplesmente os apresentados na Figura V.14. Isto ocorre porque os descarregamentos foram feitos após estágios de carga de pelo menos oito dias de duração incorporando assim deformações de vidas ao adensamento secundário. A Figura V.15 esclarece este ponto. Apresentam-se na Tabela V.13 os valores de OCR,

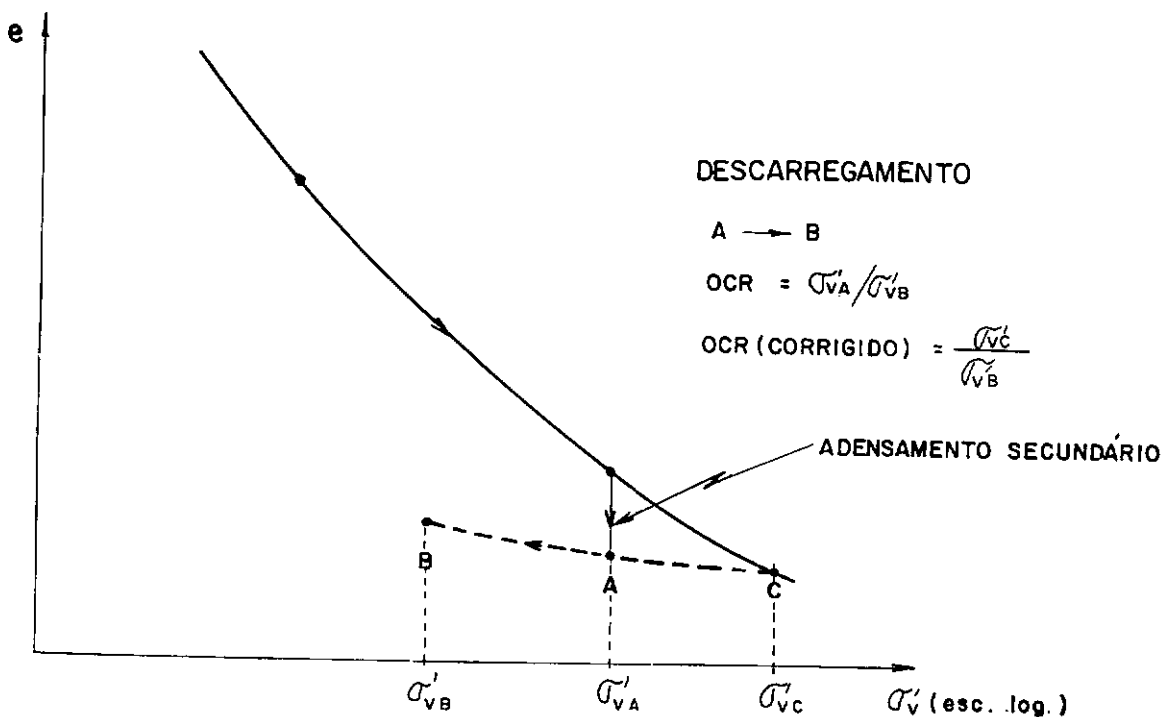


Figura V.15 - Correção do valor de OCR para estimativa de K_o

"corrigidos" segundo a Figura V.15 e dos valores de C_α tomados a partir da tangente ao trecho final das curvas da Figura V.14. Com os valores de OCR corrigidos obtêm-se, considerando para a Argi-

CÉLULA	TENSÃO EFETIVA (kN/m^2)	DURAÇÃO DO ESTÁGIO ANTERIOR	OCR	OCR CORRIGIDO	C_α
verde	50	8 dias	8	10	0.030
amarela	100	8 dias	4	5	0.005
marrom	200	8 dias	2	2.7	0
cinza	50	312 dias	8	12	0.048

Tabela V.13 - Valores de C_α , OCR e OCR "corrigido" no descarregamento

la do Sarapuí $\phi' = 25^\circ$, os valores estimados para K_O apresentados na Tabela V.13.

CÉLULA	OCR corrigido	K_O
verde	10	1.53
amarela	5	1.14
marrom	2.7	0.88
cinza	12	1.65

Tabela V.14 - Valores de OCR "corrigido" e estimativas de K_O

Considerando $\phi' = 25^\circ$ obtêm-se para $K_O = 1$ um valor de OCR = 3.7. Com excessão do corpo de prova da célula marrom todos os outros apresentam valor de OCR maior que 3.7 e, por

tanto, valor de K_O maior que 1. Este fato, segundo a abordagem de LACERDA e MARTINS (19), justifica a expansão destes corpos de prova. Além disso, fica confirmada a hipótese de que quanto mais afastado o corpo de prova se encontrar do estado $K_O = 1$ maior será sua avidez, traduzida pela maior velocidade de expansão, de atingir o estado no qual $K_O = 1$. Finalmente, quanto ao corpo de prova da célula marrom, o valor de $C_\alpha = 0$ e o valor estimado de $K_O = 0.88$ estariam, também, plenamente de acordo com os mecanismos expostos no item IV.2 (Figura IV.6) e com as observações de JOHNSON (14) resumidas na Figura (III.10).

CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

VI.1 - CONCLUSÕES

Este trabalho permite fazer as seguintes conclusões:

- A compressão secundária não é desprezível.

- A compressão secundária desloca para a esquerda a curva de compressão e x σ'_v . Tal deslocamento é tão maior quanto maior for a duração dos estágios de carregamento. Esse efeito têm influência marcante sobre o valor de σ'_{vm} .

- O traçado da curva de compressão (e x σ'_v ou v x σ'_v) utilizando-se os índices de vazão correspondentes ao final do adensamento primário elimina a arbitrariedade dos estágios de 24 horas.

- O trecho virgem da curva de compressão se mostra retilíneo no gráfico $\log v \times \log \sigma'_v$ o que não ocorre no gráfico e x $\log \sigma'_v$ usualmente traçados.

- Os valores da tensão de sobreadensamento determinados pelo processo de Pacheco Silva modificado são muito próximos aos valores determinados pelo método de Casagrande. O método deve ser testado em mais solos e, em se mostrando satisfatório, deve ser preferido em relação à outros que exijam interpretação pessoal.

- A compressão secundária é tão mais importante quanto menor for a relação $\sigma'_{vf}/\sigma'_{vo}$.

- A abordagem de Martins e Lacerda, mostrou ser satisfatória representando um avanço no estudo do adensamento secundário.

- O comportamento dos corpos de prova durante a expansão também se mostrou concordante com o mecanismo proposto, embora mais ensaios precisem ser realizados para confirmar este ponto.

VI.2 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Como sugestões para futuras pesquisas podem ser mencionadas:

- Estudar uma forma para que sejam introduzidas na abordagem as poro-pressões (isto talvez possa ser feito através de uma lei de deformação e da equação da continuidade).

- Estudar o fenômeno da compressão inicial.

- Fazer ensaios de longa duração partindo-se de um ponto pertencente à curva de compressão correspondente ao final do adensamento primário.

- Comparar as compressibilidades da Argila do Sarapuĩ nas direções horizontal e vertical.

- Estudar mais detalhadamente o comportamento resumido na Figura IV.6 (juntamente com o fenômeno descrito por Johnson - Figura III.10).

BIBLIOGRAFIA

- (1) ALLAM, M. and SRIDHARAN, A., "Discussion", JGED, ASCE, vol. 110, nº 5, pp. 671-672, (1984).
- (2) ANTUNES, F., "Ensaio para Caracterização Mineralógica, Petrográfica e Geológica das Argilas do Rio de Janeiro", IPR-DNER, Report 2.019 - 02.02/10/42, pp. 3-119, (1978).
- (3) BARDEN, L., "Time Dependent Deformation of Normally Consolidated Clays", JSMFD-ASCE, New York, 95 (SMI), pp. 1-31, (1969).
- (4) BJERRUM, L., "Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings", 7th Rankine Lecture - Geotechnique, vol. 17, nº 2, pp. 81-118, (1967).
- (5) BUISMAN, A.S.K., "Results of Long Duration Settlements Tests" - 1st ICOSOMEF, Proceedings, vol. 1, pp. 103-106, (1936).
- (6) CASAGRANDE, A. and FADUM, R.E., "Notes on Soil Testing for Engineering Purposes", Soil Mechanics Series, nº 8, Harvard University, Cambridge, 74 p., (1940).
- (7) CASTRO, F.J.C.O., "Comunicação Pessoal".
- (8) COSTA, F.; COLLET, H.B.; ANTUNES, F.; FONTOURA, S.A.B., "Pesquisa sobre Mecânica dos Solos - Aterros sobre Solos Compressíveis", Rel. Parcial DNER-IPR, Cod.2.019-02.02-2/01/42, (1975).

- (9) DE JONG, L. and VERRUIJT, A., "Primary and Secondary Consolidation of a Spherical Clay Sample", Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, Montreal, vol. 1, pp. 254-258, (1965).
- (10) GIBSON, R.E., & LO, K.Y., "A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression", Norwegian Geotechnical Institute, Publication 41, pp. 5-16, (1961).
- (11) HABIBAGAH, K.A.M., "Discussion", JSMFD-ASCE, vol. 99, n^o SM- 11, pp. 1027-1029, (1973).
- (12) HAEFELI, R. and SCHAAD, W., "Time Effect in Connection with Consolidation Tests", 2nd ICOSOMEF, Proceedings, vol. 3, pp. 23-29, (1948).
- (13) HSIEH, H.S., and KAVAZANJIAN, E.Jr., "An Automated Triaxial Device For Measuring the At-Rest Earth Pressure Coefficient", Geotechnical Report, n^o GT3, Department of Civil Engineering Stanford University, (1985).
- (14) JOHNSON, S.J., "Precompression for Improving Foundation Soils", JSMFD-ASCE, New York, 96 (SM1), pp. 111-144, (1970).

- (15) KAVAZANJIAN, Jr., E. and MITCHELL, J.K., "Time Dependence of Lateral Earth Pressure", ASCE, JGED, April, pp. 530-533, (1984).

- (16) KOPPEJAN, A.W., "A Formula Combining the Terzaghi Load Compression Relationship and the Buisman Secular Time Effect", 2nd ICOSOMEF, Proceedings, vol. 3, pp. 32-37, (1948).

- (17) LACERDA, W.A., "Stress Relaxation and Creep Effects on the Deformation of Soil", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, pp. 227-244, (1976).

- (18) LACERDA, W.A., "Discussion on the evaluation of K_0 during drained creep in one-dimensional compression tests", 9th ICOSOMEF, Proceedings, Tokyo, vol. III, pp. 347-348, (1977).

- (19) LACERDA, W.A. and MARTINS, I.S.M., "Discussion of Time Dependence of Lateral Earth Pressure", October, pp. 1242-1244, (1985).

- (20) LADD, C.C., and PRESTON, W.B., "On the Secondary Compression of Saturated Clays", Res. in Earth Physics Phase, Rep. n° 6, Dept. of Civil Eng. Res. Report R65-69, Soils Publ., n° 181, MIT., (1965).

- (21) LADD, C.C., "Settlement analysis for cohesive soils", Research Report R71-2, Soils Publication 272, Soil

Mechanics Division, Department of Civil Engineering,
MIT., Cambridge, Mass., p. 1-76, (1973).

- (22) LEONARDS, G.A., & GIRAULT, P., "A study of the one-dimensional consolidation test", Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proceedings, Paris, vol. I, pp. 213-218, (1961).
- (23) LEONARDS, G.A., "Engineering properties of soils", Foundation Engineering - McGraw-Hill, New York, pp. 124-127, (1962).
- (24) LEONARDS, G.A., and ALTSCHAEFFL, H.G., "Compressibility of Clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, New York, 90 (SM5), pp. 133-155, (1964).
- (25) LO, K.Y., "Secondary Compression of Clays" JSMD-ASCE, vol. 87, nº SM4, pp. 61-87, (1961).
- (26) LO, K.Y., "Secondary Compression of Clays" Norwegian Geotechnical Institute, Publication nº 53, (1963).
- (27) MARTINS, I.S.M., "Sobre uma Nova Relação Índice de Vazios Tensão nos Solos", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, (1983).
- (28) MARTINS, I.S.M. and LACERDA, W.A., "A Theory of Consolidation with Secondary Compression", 11th ICOSOMEF, San Francisco, (1985).

- (29) MAYNE, P.W. and KULHAWY, F.H., " K_o -OCR-Relationship in Soil", JGED-ASCE, vol. 108, n° 6, pp. 851-872, (1982).
- (30) MC ROBERTS, Ed., "Discussion", JGED-ASCE, vol. 110, n° 5, pp. 667-669, (1984).
- (31) MESRI, G., "Coefficient of Secondary Compression", JSMFD-ASCE, vol. 99, n° SM1, pp. 123-137, (1973).
- (32) MESRI, G. and GODLEWSKI, "Time and Stress Compressibility Interrelationship", JGED-ASCE, vol. 103, May, (1977).
- (33) MESRI, G. and CASTRO, A., " C_α/C_c Concept and K_o During Secondary Compression", JGED-ASCE, vol. 113, n° 3, pp. 230-247, (1987).
- (34) MITCHELL, J.K., "Shearing resistance of soils as a rate process", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, New York, 90(SM1), pp. 29-61, (1964).
- (35) MORAN, MUESER, PROCTOR & RUTLEDGE, CONSULTING ENGINEERS, "Study of deep soil stabilization by vertical sand drains", Report prepared for the U.S. Navy, Available Through U.S. Dept. of Commerce, Clearinghouse Code 410, 14, Springfield, VA.22151, (1958).
- (36) NAGARAK, T.S. "Discussion", JGED-ASCE, vol. 110, n° 5, pp. 665-667, (1984).

- (37) ORTIGÃO, J.A.R., "Aterro Experimental Levado à Ruptura Sobre Argila Cinza do Rio de Janeiro", Tese D.Sc., COPPE/UFRJ, (1980).
- (38) PACHECO SILVA, F., "Uma Nova Construção Gráfica para a Determinação da Pressão de Prê-Adensamento de uma Amostra de Solo", IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Anais Guanabara, V. II Tomo I, pp. 219-223, (1970).
- (39) SCHMERTMANN, J.H., "A Simple Question About Consolidation", ASCE, JGED, JAN., pp. 119-122, (1983).
- (40) SCHMIDT, B., "Earth Pressure at Rest Related to Stress History", Discussion Canadian Geotechnical Journal Division - ASCE, vol. 110, nº 5, (1984).
- (41) SOYDEMIR, C., "Discussion", JGED-ASCE, vol. 110, nº 5, pp. 669-671, (1984).
- (42) TAYLOR, D.W. and MERCHANT, W., "A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compressions", Journal of Mathematics and Physics, vol. 19, nº 3, pp. 167-185, (1940).
- (43) TAYLOR, D.W., "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York, (1948).
- (44) TERZAGHI, K., "Undisturbed Clay Samples and Undisturbed Clays", Contributions to Soil Mechanics 1941-1953, Boston Society of Civil Engineers, pp. 45-65, (1941).
- (45) WAHLS, H.E., "Analysis of Primary and Secondary Consolidation", ASCE-JSMFD, vol. 88, nº SM6, pp. 207-231, (1962).