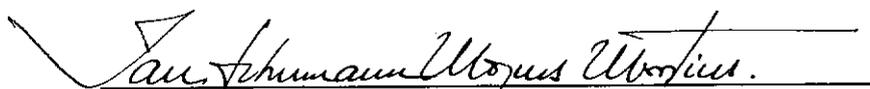


INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA
NO ADENSAMENTO DE ARGILAS NATURAIS

Maria Esther Soares Marques

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

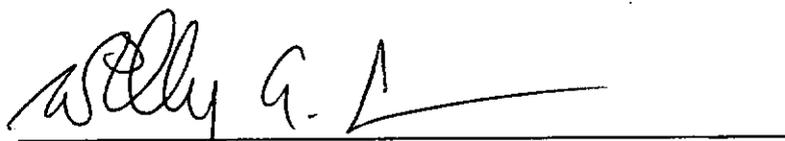
Aprovada por:



Prof. Ian Schumann Marques Martins, D. Sc.
(Presidente)



Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.



Prof. Willy de Alvarenga Lacerda, Ph.D.



Prof. ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO, Ph.D.



Prof. ADRIANO VIRGILIO DAMIANI BICA, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - Brasil
FEVEREIRO DE 1996

MARQUES, MARIA ESTHER SOARES

Influência da velocidade de deformação e temperatura n
adensamento de argilas naturais[Rio de Janeiro] 1996.

xvi, 180 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc, Engenhari
Civil, 1996).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1- ensaio de adensamento unidimensional, 2 -viscosidade,
3 - ensaio CRSC

II - COPPE - UFRJ

Título (série)

AGRADECIMENTOS

À equipe de Geotecnia da COPPE, destacando-se os professores Márcio S.S. Almeida, Ian S. Martins e Willy A. Lacerda, que além de mestres foram amigos e conselheiros.

À equipe de Geotecnia da Universidade Laval, destacando-se o Prof. Serge Leroueil e o técnico J.P. Dussault. Ao Prof. Leroueil agradeço a orientação na fase de pesquisa e a acolhida na Universidade Laval. Ao técnico Dussault agradeço o treinamento em técnicas de laboratório.

Às secretárias Beth e Rita do Programa de Engenharia Civil e Rosângela do Laboratório de Geotecnia.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

Aos meus amigos antigos e recentes pelo carinho e amizade.

Aos meus colegas de turma e em especial à minha amiga Fátima.

Aos meus pais, pelos anos de dedicação e pelo incentivo.

Ao meu marido, José Luiz, por ser meu equilíbrio.

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

INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E TEMPERATURA NO ADENSAMENTO DE ARGILAS NATURAIS

Maria Esther Soares Marques

Fevereiro de 1996

Orientador: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

Co-orientadores: Prof. Ian Schumann Marques Martins

Prof. Serge Leroueil

Departamento : Engenharia Civil

O comportamento de argilas naturais durante o adensamento unidimensional, bem como a tensão de sobreadensamento, são influenciados pela velocidade de deformação vertical específica e pela temperatura.

As tensões efetivas de ensaios de adensamento executados a diferentes velocidades de deformação vertical específica e temperaturas podem ser normalizadas em função da tensão de sobreadensamento da argila obtida em ensaios executados a velocidades e temperaturas controladas.

Portanto, o comportamento de uma argila pode ser descrito por uma curva tensão-deformação normalizada em função da temperatura, da velocidade de deformação e tensão de sobreadensamento. Esta curva depende da mineralogia e história da argila.

Foram realizados ensaios de adensamento com velocidade de deformação vertical específica e temperatura controladas e ensaios de adensamento convencionais e a seguir obteve-se a curva tensão-índice de vazios normalizada para a argila de Saint Polycarpe.

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

INFLUENCE OF STRAIN-RATE AND TEMPERATURE IN CONSOLIDATION OF NATURAL CLAYS

Maria Esther Soares Marques

February 1996

Thesis Supervisor: Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida

Thesis Co-supervisors: Prof. Ian Schumann Marques Martins

Prof. Serge Leroueil

Department : Civil Engineering

The behaviour of natural clays during one-dimensional consolidation as well as preconsolidation pressure are influenced by strain rate and temperature.

The effective stresses of consolidation tests performed at various strain rates and temperatures, can be normalized with respect to the preconsolidation pressure of the clay at strain rate and temperature of the test. In fact, the behaviour of a natural clay can be described by a stress-strain curve normalized with respect to temperature, strain rate and preconsolidation pressure. This curve depends on the mineralogy and history of the clay.

Consolidation tests with constant rate of strain and constant temperature and conventional consolidation tests were carried out and the normalized effective stress-void ratio curve of Saint Polycarpe clay was obtained.

ÍNDICE

| | |
|---|----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO | 1 |
| 1.2 RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS | 1 |
| 1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1 INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VARIAÇÃO DE VOLUME E PORO- PRESSÃO | 6 |
| 2.3 ESTUDOS DA UNIVERSIDADE LAVAL | 12 |
| 2.3.1 <i>Influência da velocidade de deformação vertical específica</i> | 12 |
| 2.3.2 - <i>Influência da temperatura e velocidade de deformação vertical específica</i> | 16 |
| 2.4 ESTUDOS DA COPPE..... | 18 |
| 3. DESCRIÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO E DA METODOLOGIA DE ENSAIOS 48 | |
| 3.1 ENSAIOS REALIZADOS | 48 |
| 3.2 ARGILA DE SAINT POLYCARPE | 52 |
| 3.3 ARGILAS JAPONESAS | 59 |
| 3.3.1 <i>Argila de Ariake</i> | 59 |
| 3.3.2 <i>Argila de Osaka</i> | 59 |
| 3.4 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO CRSC | 60 |
| 3.4.1 <i>Descrição do equipamento</i> | 60 |
| 3.4.2 <i>Preparação dos corpos de prova</i> | 63 |
| 3.4.3 <i>Descrição e cálculo dos ensaios</i> | 64 |
| 3.5 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS DE FLUÊNCIA | 70 |
| 3.5.1 <i>Equipamento</i> | 70 |
| 3.5.2 <i>Preparação dos corpos de prova</i> | 72 |
| 3.5.3 <i>Descrição dos ensaios de fluência</i> | 73 |
| 3.6 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS CONVENCIONAIS | 77 |

| | |
|--|------------|
| 3.6.1 <i>Descrição dos ensaios</i> | 77 |
| 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 78 |
| 4.1 INTRODUÇÃO..... | 78 |
| 4.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL | 80 |
| 4.2.1 <i>Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva</i> | 83 |
| 4.2.2 <i>Tensão de sobreadensamento</i> | 88 |
| 4.2.3 <i>Normalização dos resultados</i> | 95 |
| 4.2.4 <i>Poropressão e condutividade hidráulica</i> | 100 |
| 4.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL... | 103 |
| 4.3.1 <i>Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva</i> | 103 |
| 4.3.2 <i>Tensão de sobreadensamento</i> | 103 |
| 4.3.3 <i>Normalização dos resultados</i> | 110 |
| 4.3.4 <i>Poropressão e condutividade hidráulica</i> | 117 |
| 4.3.5 <i>Ensaio CRSC realizados com variação de temperatura durante o ensaio</i> | 120 |
| 4.4 NORMALIZAÇÃO DOS RESULTADOS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E DA TEMPERATURA | 129 |
| 4.5 ENSAIOS ESPECIAIS | 133 |
| 4.5.1 <i>Ensaio de Fluência</i> | 133 |
| 4.5.2 <i>Ensaio CRSC executados após os ensaios de fluência</i> | 148 |
| 5. CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA FUTURA PESQUISA | 152 |
| 5.1 CONCLUSÕES..... | 152 |
| 5.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS..... | 153 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 155 |
| ANEXOS | 160 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 2-1 - Efeito da temperatura nos limites de liquidez e plasticidade de três argilas. Youssef et al.(1961)..... | 6 |
| Fig. 2-2 - Efeito da temperatura no adensamento hidrostático da ilita saturada. Campanella & Mitchell (1968)..... | 7 |
| Fig. 2-3 - Efeito da temperatura na poro-pressão em ensaios não drenados. Campanella & Mitchell (1968)..... | 8 |
| Fig. 2-4 - IP x Δe_{st} para ciclos de 25°C-50°C- 25°C. Demars & Charles (1982)..... | 9 |
| Fig. 2-5 - Redução permanente do índice de vazios relativo ao ciclo de temperatura x OCR, para a primeira seqüência de recompressão. Demars & Charles (1982). | 10 |
| Fig. 2-6 - Compressão hidrostática com ciclos térmicos intermediários, temperatura variando de 22-42-22°C. Burghignoli et al.(1992)..... | 11 |
| Fig. 2-7 - Tensão de sobreadensamento da argila sulfídica de Lulea, em função da temperatura do ensaio. Eriksson (1989). | 11 |
| Fig. 2-8- Ensaios CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al (1985). | 13 |
| Fig. 2-9 - Curva $\epsilon_v \times \log t$ - ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985). 13 | |
| Fig. 2-10 - Curva $(\dot{\epsilon}_v \times \epsilon_v)$ para ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).14 | |
| Fig.2-11 - Curvas para $\dot{\epsilon}_v$ constante, deduzidas de ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985). | 14 |
| Fig.2-12 - Ensaios oedométricos especiais CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).14 | |
| Fig.2-12 - Ensaios oedométricos especiais CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).14 | |
| Fig. 2-13 - Variação da tensão de sobreadensamento com a velocidade de deformação vertical específica - argila de Batiscan. Leroueil et al (1985). | 15 |
| Fig. 2-14 - Correlação normalizada entre tensão efetiva e deformação vertical específica deduzida do ensaio CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985)..... | 16 |
| Fig. 2-15 - Correlação normalizada entre tensão efetiva e deformação vertical específica deduzida do ensaio de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985). | 16 |
| Fig. 2-16 - Efeitos da velocidade de deformação vertical específica e temperatura no adensamento unidimensional - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994). | 17 |
| Fig. 2-17 - Condutividade hidráulica deduzida de ensaios CRSC a temperaturas de 5° C e 35° C - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994). | 18 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2-18 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (T, \dot{\epsilon}_v)$ - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994). 18 | 18 |
| Fig. 2-19 - Caminho de tensões durante a compressão secundária. Lacerda (1977)..... 19 | 19 |
| Fig. 2-20 - Caminho de tensões efetivas de uma amostra normalmente adensada no ensaio edométrico. Feijó (1991). 20 | 20 |
| Fig. 2-21 - Variação da tensão octaédrica no ensaio edométrico 21 | 21 |
| Fig. 2-22 - Esquema da compressão secundária, Bjerrum (1967) e Lacerda & Martins (1985).22 | 22 |
| Fig. 2-23- Representação esquemática das deformações por adensamento primário e secundário..... 23 | 23 |
| Fig. 2-24 - Curvas $U \times T_v$ para diferentes $\Delta\sigma / \sigma$ e $K_{on} = 0.6$ e $\theta = 0.005$. Martins & Lacerda (1985)..... 26 | 26 |
| Fig. 2-25 - Curvas $U \times T_v$ para diferentes θ , $\Delta\sigma / \sigma = 1$ e $K_{on} = 0.6$. Martins & Lacerda (1985).27 | 27 |
| Fig. 2-26 - Ensaio edométrico de longa duração. $\Delta\sigma / \sigma = 0.33, 0.5$ e 1.0 . Martins (1987).28 | 28 |
| Fig. 2-27- Curvas deformação x tempo - ensaios edométricos de longa duração. Vieira (1988).29 | 29 |
| Fig. 2-28 - Curvas deformação x tempo para ensaios de longa duração. Martins (1987)..... 30 | 30 |
| Fig. 2-29- Aparecimento da compressão secundária após descarregamento. 31 | 31 |
| Fig. 2-30 - Círculo de Mohr para expansão secundária..... 32 | 32 |
| Fig. 2-31- Expansão secundária de amostras com diferentes valores de OCR - Argila de Sarapuí - Vieira (1988)..... 33 | 33 |
| Fig. 2-32 - Representação da linha do fim do secundário correspondente a $K_0 = 1$ 34 | 34 |
| Fig. 2-33 - $e \times \log \sigma'_v$ - segunda bateria de ensaios - Feijó (1991)..... 36 | 36 |
| Fig. 2-34 - Variação do índice de vazios x tempo - segunda bateria de ensaios. Feijó (1991). 37 | 37 |
| Fig. 2-35 - Região do plano $q' \times p'$ onde o equilíbrio é indiferente. Feijó (1991)..... 38 | 38 |
| Fig. 2-36- Região de equilíbrio indiferente - argila de Sarapuí.....:..... 39 | 39 |
| Fig. 2-37- Ensaio de Relaxação - San Francisco Bay Mud - Lacerda (1976)..... 41 | 41 |
| Fig. 2-38 - Comportamento das poro-pressões para o estágio de 100 para 800 kPa (ensaio 09). Lima (1993). 42 | 42 |
| Fig. 2-39 - Caminhos de tensões na relaxação de um corpo de prova normalmente adensado do edômetro. Lima (1993)..... 43 | 43 |
| Fig. 2-40- Linha provável de fim do secundário da argila de Sarapuí. Lima (1993). 44 | 44 |
| Fig. 2-41 - Comparação das curvas deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 1200 -1600 kPa - Martins & Lacerda (1985). 45 | 45 |

| | |
|---|----|
| Fig. 2-42 - Comparação das curvas de deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 400 -600 kPa - Martins & Lacerda (1985). | 46 |
| Fig. 2-43 - Comparação das curvas de deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 400 -800 kPa - Martins & Lacerda (1985). | 47 |
| Fig. 3-1 - Localização esquemática do local de coleta das amostras. Argila de Saint Polycarpe. | 53 |
| Fig. 3-2 - Variação do teor de umidade das amostras com a profundidade. Argila de Saint Polycarpe. | 56 |
| Fig. 3-3 - Esquema das amostras utilizadas. Argila de Saint Polycarpe. | 57 |
| Fig. 3-4 - Esquema das amostras coletadas. Argila de Osaka. | 60 |
| Fig. 3-5 - Desenho esquemático do sistema de contrapressão. | 62 |
| Fig. 3-6 - Desenho esquemático da célula utilizada nos ensaios CRSC. Boudali (1995). | 63 |
| Fig. 3-7 - Esquema da curva de compressão edométrica. Martins & Lacerda (1994). | 67 |
| Fig. 3-8 - Relações hiperbólicas entre m_v e σ'_v . Butterfield (1979). | 68 |
| Fig. 3-9 - Esquema do ensaio à temperatura variável - CRSC 12 - Argila de Saint Polycarpe. | 69 |
| Fig. 3-10 - Esquema do Sistema de Controle de temperatura utilizado nos ensaios de fluência. | 71 |
| Fig. 3-11 - Detalhe da célula 2 utilizada nos ensaios de fluência. | 72 |
| Fig. 3-12 - Desenho esquemático da preparação das amostras dos ensaios de fluência. | 73 |
| Fig. 3-13 - Esquema do ensaio de fluência OED 3. | 76 |
| Fig. 4-1- Tensão efetiva média x deformação vertical específica - ensaios CRSC a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T=20^\circ\text{C}$ | 81 |
| Fig. 4-2- σ'_v x $e - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 5^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 85 |
| Fig. 4-3- σ'_v x $\Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 5^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 85 |
| Fig. 4-4- σ'_v x $e - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 20^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 86 |
| Fig. 4-5- σ'_v x $\Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 20^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 86 |
| Fig. 4-6- σ'_v x $e - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 50^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 87 |
| Fig. 4-7- σ'_v x $\Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 50^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 87 |
| Fig. 4-8 - m_v x $\sigma'_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 20^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 90 |
| Fig. 4-9 - m_v x $\sigma'_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - $T = 5^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 90 |
| Fig. 4-10 - Variação do coeficiente α_2 com a velocidade de deformação vertical específica, para as argilas da região de Champlain. Leroueil et al.(1983). | 91 |
| Fig. 4-11- $\sigma'_p(\dot{\epsilon}_v, T)$ x $\log \epsilon_v$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 93 |
| Fig. 4-12- $\log \sigma'_p(\dot{\epsilon}_v, T)$ x $\log \epsilon_v$ - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 94 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4-13- Índice de Vazios x tensão efetiva para ciclos de temperatura de 50°C. Demars & Charles (1982). | 95 |
| Fig. 4-14 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T)$ x e - $\epsilon_v =$ variável - T = 5°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 96 |
| Fig. 4-15 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T)$ x e - $\epsilon_v =$ variável - T = 20°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 97 |
| Fig. 4-16 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T)$ x e - $\epsilon_v =$ variável - T = 50°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 98 |
| Fig. 4-17 - Influência da compressão secundária na estruturação de sedimentos do Fiorde de Saguenay após 82 dias de carregamento. Perret (1995). | 99 |
| Fig. 4-18 - Esquema da isócrona de poro-pressão para um valor maior de α | 100 |
| Fig. 4-19- Log k x e - $\dot{\epsilon}_v =$ variável - T = 20°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 102 |
| Fig. 4-20- Log k x e - $\dot{\epsilon}_v =$ variável - T = 5°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 102 |
| Fig. 4-21- Log k x e - $\dot{\epsilon}_v =$ variável - T = 50°C - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 102 |
| Fig. 4-22- σ'_v x e - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 104 |
| Fig. 4-23- σ'_v x Δu_b - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 104 |
| Fig. 4-24- σ'_v x e - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 105 |
| Fig. 4-25- σ'_v x Δu_b - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 105 |
| Fig. 4-26- σ'_v x e - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 106 |
| Fig. 4-27- σ'_v x Δu_b - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 106 |
| Fig. 4-28 - m_v x σ'_v - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 107 |
| Fig. 4-29 - m_v x σ'_v - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 107 |
| Fig. 4-30- $\sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T)$ x T - Ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 109 |
| Fig. 4-31 - Equilíbrio de forças numa região de área A . Martins (1992). | 111 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4-32 - Possível variação de μ ao longo de um contato feito por água adsorvida líquida muito viscosa. Martins (1992). | 112 |
| Fig. 4-33 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 114 |
| Fig. 4-34 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 115 |
| Fig. 4-35 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 116 |
| Fig. 4-36 - Viscosidade e peso específico da água à várias temperaturas a 1atm. Habibagahi(1973). | 118 |
| Fig. 4-37- Log k x e - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 119 |
| Fig. 4-38- Log k x e - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 119 |
| Fig. 4-39- $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - Ensaio CRSC 5 e 12 - Argila de Saint Polycarpe. | 123 |
| Fig. 4-40- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - Ensaio CRSC 5 e 12 - Argila de Saint Polycarpe. | 124 |
| Fig. 4-41- log k x e - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - Ensaio CRSC 5 e 12 - Argila de Saint Polycarpe. | 125 |
| Fig. 4-42- $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake..... | 126 |
| Fig. 4-43- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake. | 126 |
| Fig. 4-44- log k x $\epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake..... | 126 |
| Fig. 4-45- $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 20-50°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake..... | 127 |
| Fig. 4-46- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 20-50°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake. ... | 127 |
| Fig. 4-47- Log k x $\epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 20-50°C - Ensaio CRSC - Argila de Ariake. . | 127 |
| Fig. 4-48- $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - ensaio CRSC - Argila de Osaka... 128 | 128 |
| Fig. 4-49- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - ensaio CRSC - Argila de Osaka. . | 128 |
| Fig. 4-50- Log k x $\epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - ensaio CRSC - Argila de Osaka. 128 | 128 |
| Fig. 4-51 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e - \dot{\epsilon}_v = \text{variável}$ - T = variável - Ensaio CRSC - Argila de Saint Polycarpe. | 130 |

| | |
|---|-----|
| Fig. 4-52 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e / e_0 - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = \text{variável} - \text{Ensaio CRSC} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 131 |
| Fig. 4-53 - Superfície $\sigma'_p \times T \times \dot{\epsilon}_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = \text{variável} - \text{Ensaio CRSC} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 132 |
| Fig. 4-54- $\sigma'_v \times e - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 2 e 4} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 134 |
| Fig. 4-55- $e \times \log t - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 2 e 4} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 135 |
| Fig. 4-56- $\log \dot{\epsilon}_v \times e - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 2 e 4} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 136 |
| Fig. 4-57- $\Delta u \times \log t, \sigma'_v \times \log t - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 2 e 4} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 137 |
| Fig. 4-58- $\sigma'_v \times e - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 3 e 5} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 138 |
| Fig. 4-59- $e \times \log t - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 3 e 5} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 139 |
| Fig. 4-60- $\log \dot{\epsilon}_v \times e - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 3 e 5} - \text{Saint Polycarpe.}$ | 140 |
| Fig. 4-61- $\Delta u \times \log t, \sigma'_v \times \log t - \text{ensaio de fluência} - \text{OED 1, 2 e 4} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 141 |
| Fig. 4-62 - Relação entre ϵ_v e $\dot{\epsilon}_v$ para fluência da argila natural de San Francisco, submetida à variação rápida de temperatura. Mitchell et al. (1968). | 143 |
| Fig. 4-63 - Correlação entre a tensão de sobreadensamento e α_2 determinada a partir de ensaios SSL em argilas da região de Champlain. Leroueil et al.(1983). | 144 |
| Fig. 4-64 - Curva normalizada $\sigma'_v (\sigma'_p) \times e - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = \text{variável} - \text{Ensaio CRSC e de fluência} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 147 |
| Fig. 4-65- $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - T = 20^\circ\text{C} - \text{Ensaio CRSC após ensaio de fluência} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 149 |
| Fig. 4-66- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - T = 20^\circ\text{C} - \text{Ensaio CRSC após ensaio de fluência} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 149 |
| Fig. 4-67- $\log k \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - T = 20^\circ\text{C} - \text{Ensaio CRSC após ensaio de fluência} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 150 |
| Fig. 4-68- $\sigma'_v \times e - T = 20^\circ\text{C} - \text{Ensaio CRSC e Convencionais após ensaio de fluência} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$ | 151 |
| Fig. A3-1-Desenho Esquemático do amostrador Laval. La Rochelle et al.(1981) | 165 |
| Fig. A3-2 - Procedimento de coleta. La Rochelle et al.(1981) | 172 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2-1 - Variação da constante dielétrica com a temperatura - Mitchell(1976). | 5 |
| Tabela 2-2 - Condição dos corpos de prova após o descarregamento. Feijó (1991)..... | 35 |
| Tabela 3-1 - Quadro resumo dos ensaios realizados. Argilas de Ariake e Osaka. | 49 |
| Tabela 3-2 - Quadro resumo dos ensaios realizados. Argila de Saint Polycarpe. | 50 |
| Tabela 3-3 - Cronograma dos trabalhos realizados. | 51 |
| Tabela 3-4 - Quadro resumo das propriedades da argila de Saint Polycarpe. Valores obtidos a partir de ensaios de caracterização na argila de Saint Polycarpe. | 54 |
| Tabela 3-5 - Propriedades características das argilas de Champlain. Leroueil et al. (1983).... | 55 |
| Tabela 3-6 - Quadro resumo das propriedades da argila de Saint Polycarpe. Valores obtidos a partir das propriedades características das argilas de Champlain. Leroueil et al.(1983) ... | 56 |
| Tabela 4-1 - Quadro resumo dos resultados dos ensaios - Argila de Saint Polycarpe. | 79 |
| Tabela 4-2 - Tensão de sobreadensamento: ensaios especiais / ensaios convencionais- Argila de Saint Polycarpe. | 92 |
| Tabela 4-3 - Valores de C para ensaios CRSC sob temperatura controlada. Argila de Saint Polycarpe. | 101 |
| Tabela 4-4 - Variação da permeabilidade com a temperatura - Saint Polycarpe..... | 117 |
| Tabela 4-5 - Ensaios de fluência - tempo para dissipação das poro-pressões. | 142 |
| Tabela 4-6 - Índice de vazios dos ensaios de para as velocidades de deformação utilizadas nos ensaios CRSC | 145 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|---|-----|
| Foto 1 - Trado helicoidal de grande diâmetro. | 166 |
| Foto 2 - Perfuração da camada de argila ressecada. | 166 |
| Foto 3 - Tubo de perfuração | 167 |
| Foto 4 - Tubo de perfuração com circulação d'água. | 167 |
| Foto 5 - Perfuração com circulação d'água. | 168 |
| Foto 6 - Detalhe da proteção da boca do furo. | 168 |
| Foto 7 - Detalhe do tubo coletor | 169 |

| | |
|--|-----|
| Foto 8 - Detalhe da cabeça do amostrador. | 169 |
| Foto 9 - Detalhe do tubo externo. | 170 |
| Foto 10 - Cabeça do amostrador, haste acoplada e tubo externo. | 170 |
| Foto 11 - Conjunto cabeça, haste, tubos externo e coletor. | 171 |
| Foto 12 - Transporte do conjunto até a perfuratriz. | 171 |
| Foto 13 - Vista da perfuratriz e início da amostragem. | 173 |
| Foto 14 - Início da amostragem. | 173 |
| Foto 15 - Fim da amostragem. | 174 |
| Foto 16 - Transporte do conjunto ao fim da amostragem. | 174 |
| Foto 17 - Vista do conjunto ao fim da amostragem - detalhe do solo no amostrador. | 175 |
| Foto 18 - Limpeza do conjunto. | 175 |
| Foto 19 - Preparação do suporte de extração das amostras. | 176 |
| Foto 20 - Preparação do suporte de extração das amostras. | 177 |
| Foto 21 - Retirada da parte superior amolgada. | 177 |
| Foto 22 - Amostra intacta. | 178 |
| Foto 23 - Amostra coletada sobre o suporte de madeira preparado. | 179 |
| Foto 24 - Armazenamento provisório das amostras no campo. | 180 |

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

- C_u = resistência não drenada da amostra intacta;
 C_{ur} = resistência não drenada da amostra amolgada;
 e = índice de vazios;
 e = velocidade de variação do índice de vazios;
 G = massa específica real dos grãos;
 k = condutividade hidráulica;
 m_v = coeficiente de compressibilidade volumétrica;
 S_t = sensibilidade;
 t = tempo;
 T = temperatura;
 u = poro-pressão;
 u_0 = contra-pressão;

u_b = poro-pressão na base do corpo de prova;

\bar{U} = porcentagem de adensamento médio;

v = volume específico (1+e)

w = teor de umidade;

w_L = limite de liquidez;

w_p = limite de plasticidade;

ε_v = deformação vertical específica;

$\dot{\varepsilon}_v$ = velocidade de deformação vertical específica;

γ = peso específico;

μ = viscosidade da água;

σ'_d = tensão desviadora;

σ'_h = tensão vertical efetiva;

σ'_p = tensão de sobreadensamento;

σ'_v = tensão vertical efetiva;

σ'_1 = tensão efetiva principal maior;

σ'_3 = tensão efetiva principal menor;

1. INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

A presente dissertação descreve os estudos e ensaios executados no período de setembro de 1994 a dezembro de 1995 e estabelece um plano de trabalho para os estudos subsequentes.

O objetivo da presente pesquisa é a avaliação do comportamento viscoso de uma argila da região de Champlain, Canadá, argila de Saint Polycarpe, com base em ensaios de adensamento unidimensional e ensaios de fluência e das argilas japonesas de Ariake e Osaka com base em ensaios CRSC. Os ensaios de fluência citados nesta dissertação são na realidade ensaios de adensamento unidimensional em que se manteve a tensão vertical efetiva constante por um período de tempo, até que se atingisse uma velocidade de deformação vertical específica desejada. Nos ensaios de fluência ou "creep tests" descritos na literatura, as tensões efetivas vertical e horizontal são conhecidas, o que não ocorre nos ensaios executados na argila de Saint Polycarpe, já que a tensão horizontal efetiva não é conhecida.

Foram executados ensaios de adensamento CRSC a diferentes velocidades de deformação vertical específica e temperaturas, ensaios de fluência sob temperatura controlada e ensaios edométricos convencionais nesta argila. Paralelamente foram executados ensaios CRSC, sob temperatura controlada, nas argilas japonesas de Ariake e Osaka.

Dando continuidade ao trabalho de pesquisa, pretende-se, numa fase posterior, analisar o comportamento viscoso de argilas japonesas, brasileiras, canadenses e mexicanas, estudar os aspectos viscosos de argilas brasileiras. Prevê-se a realização de ensaios de campo em argilas canadenses, em cooperação com o Ministério de Transportes de Québec. Com esta série de ensaios será avaliado o comportamento de argilas de origem e características diferenciadas frente às variações de temperatura e velocidades de deformação vertical específica. Pretende-se então, elaborar um modelo de comportamento considerando-se estas diferenças.

1.2 RELEVÂNCIA DOS ESTUDOS

Os estudos da influência da temperatura no comportamento do solo datam da década de 60. Estes estudos assumiram uma importância maior no início dos anos 80, com os projetos

de disposição de rejeitos nucleares e estocagem de energia, avaliação do comportamento de argila rodeando cabos de alta tensão ou condutos aquecidos e etc.

Os estudos com vista a avaliar a relação tensão-deformação sob condições edométricas de um solo quando submetido a uma variação de temperatura têm sido realizados com base em ensaios executados de duas formas distintas: adensamento unidimensional devido à variação de tensão efetiva, para temperatura constante do sistema água solo e variação de temperatura do sistema água solo, para tensão constante. A presente dissertação baseou-se em resultados de ensaios com temperatura do sistema constante.

Ensaio executados em argilas de Champlain (Leroueil et al, 1985) têm mostrado que, para uma mesma profundidade, estas argilas apresentam um comportamento reológico que pode ser descrito através de duas únicas curvas : $\sigma'_p = f(\dot{\epsilon}_v)$ e a curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon}_v) = g(\epsilon_v)$ e que esta relação varia em função da profundidade e da argila ensaiada. Posteriormente Boudali et al. (1994) estenderam o modelo, ao executarem ensaios em argilas de Champlain, considerando-se também a variação de temperatura : $\sigma'_p = f(\dot{\epsilon}_v, T)$ e a curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon}_v, T) = g(\epsilon_v)$. Esta normalização, entretanto, têm se mostrado válida para o trecho normalmente adensado e para valores de $\epsilon_v \leq 20\%$.

Para as argilas sensíveis da região de Champlain, a tensão de sobreadensamento obtida em laboratório varia em função da temperatura e velocidade de deformação vertical específica dos ensaios e em comparação com os resultados obtidos em ensaios de campo há também a influência da qualidade da amostra e o caminho seguido no gráfico σ'_v x ϵ_v , que é diferente em ensaios de campo e laboratório. Em Saint Polycarpe, a partir dos resultados dos ensaios CRSC, obtiveram-se tensões de sobreadensamento variando de 107 kPa (maior temperatura e menor velocidade de deformação vertical específica) a 169 kPa (menor temperatura e maior velocidade de deformação vertical específica).

1.3 DESCRIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica onde estão descritos, resumidamente, os principais estudos elaborados sobre o tema, desde a década de 60 até os dias de hoje. Descreve-se o modelo utilizado no presente estudo na análise de resultados, com base nos estudos da Universidade Laval. Descrevem-se também os estudos elaborados pela COPPE sobre a influência da viscosidade no adensamento de argilas brasileiras.

No capítulo 3 descrevem-se o cronograma de trabalho, os procedimentos dos ensaios realizados e o material ensaiado.

No capítulo 4 estão apresentados os resultados dos ensaios realizados na argila de Saint Polycarpe e nas argilas japonesas, bem como a análise dos resultados à luz do modelo proposto por Leroueil et al. (1985) e Boudali et al.(1994).

Finalmente, no capítulo 5, estão apresentadas as conclusões e propostas para futuras pesquisas.

Nos anexos apresentam-se as descrições das calibrações dos equipamentos e a descrição da amostragem realizada com o amostrador Laval.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Desde os primeiros estudos sobre a influência da temperatura no comportamento dos solos observou-se que o solo se comprimia quando submetido a um aumento de temperatura (Campanella-1965, Paaswell-1967, Campanella & Mitchell-1968). Este comportamento, contrário ao da maioria dos materiais, indica que o aspecto físico-químico deve ser preponderante sobre as contrações e expansões térmicas normais.

Alguns autores acreditam que com o aumento da temperatura o espaço interlamelar na argila aumenta de acordo com a teoria da dupla camada difusa (Plum & Esrig - 1969) Entretanto outros autores consideram também que a constante dielétrica da água diminui com o aumento da temperatura (Mitchell,1976) o que sugere uma influência quase nula da temperatura. A espessura da dupla camada elétrica ($1/K$) é dada por:

$$1/K = \sqrt{\frac{DkT}{8\pi\eta_0 e^2 v^2}} \quad (2-1)$$

D = constante dielétrica do meio;

η_0 = concentração eletrolítica;

v = valência do cátion;

e = carga elétrica unitária = 16×10^{-20} coulomb;

k = constante de Boltzmann¹;

T = temperatura do meio medida a partir do zero absoluto.

A Tabela 2-1 mostra a variação da constante dielétrica em função da temperatura. Observa-se que o produto DT varia pouco, indicando que a espessura da dupla camada seria pouco influenciada pela variação de temperatura.

¹ A qualquer temperatura acima do zero absoluto, átomos e moléculas estão em movimento. A teoria cinética da matéria mostra que a energia cinética das partículas é proporcional à temperatura T (medida a partir do zero absoluto) e o fator de proporcionalidade é a constante de Boltzmann - $k = 1.3805 \times 10^{-23}$ Joules/Kelvin.

Tabela 2-1 - Variação da constante dielétrica com a temperatura - Mitchell(1976).

| T(°C) | T(°K) | Constante Dielétrica(D) | DT |
|-------|-------|-------------------------|--------------------|
| 0 | 273 | 88 | 2.40×10^4 |
| 20 | 293 | 80 | 2.34×10^4 |
| 25 | 298 | 78.5 | 2.34×10^4 |
| 60 | 333 | 66 | 2.20×10^4 |

Não há ainda um modelo, em termos de micromecânica, que represente o comportamento da argila em função da temperatura. No que concerne ao adensamento unidimensional, Taylor(1942), na sua teoria B de adensamento, propõe que a resistência à compressão das argilas seja função da velocidade de deformação ϵ e de um coeficiente de viscosidade η . É possível considerar nesta abordagem o efeito da temperatura lembrando-se que o coeficiente de viscosidade é função da temperatura. É curioso notar entretanto que uma abordagem tão promissora como a teoria B não tenha sido levada adiante. A aparente causa disto pode ser creditada à não determinação por parte de Taylor da curva $\epsilon_v \times \sigma'_v$ correspondente a $\dot{\epsilon} = 0$, tema que foi objeto do estudo de Feijó (1991).

Martins (1992), ampliando as idéias de Taylor, apresentou os fundamentos de um modelo de comportamento dos solos no qual a resistência viscosa, que depende da velocidade de deformação cisalhante, desempenha um papel importante na resistência à compressão. Entretanto, este modelo aguarda várias confirmações experimentais e conforme será descrito mais detalhadamente no item 4.3, pode-se introduzir no modelo o efeito da temperatura, já que esta afeta a viscosidade.

Sabe-se, ainda, que a resistência, os Limites de Atterberg e a condutividade hidráulica de um solo são alterados pela variação da temperatura, dependendo portanto da temperatura em que os ensaios são realizados.

Youssef et al.(1961) realizando ensaios de caracterização sob temperatura controlada, observou variações dos Limites de Atterberg em função da temperatura para várias argilas, concluindo que a viscosidade da água tem grande influência sobre estes índices. O aumento da temperatura com conseqüente diminuição da viscosidade da água, estaria contribuindo para a diminuição dos valores dos limites de liquidez e plasticidade como se observa na Fig. 2-1.

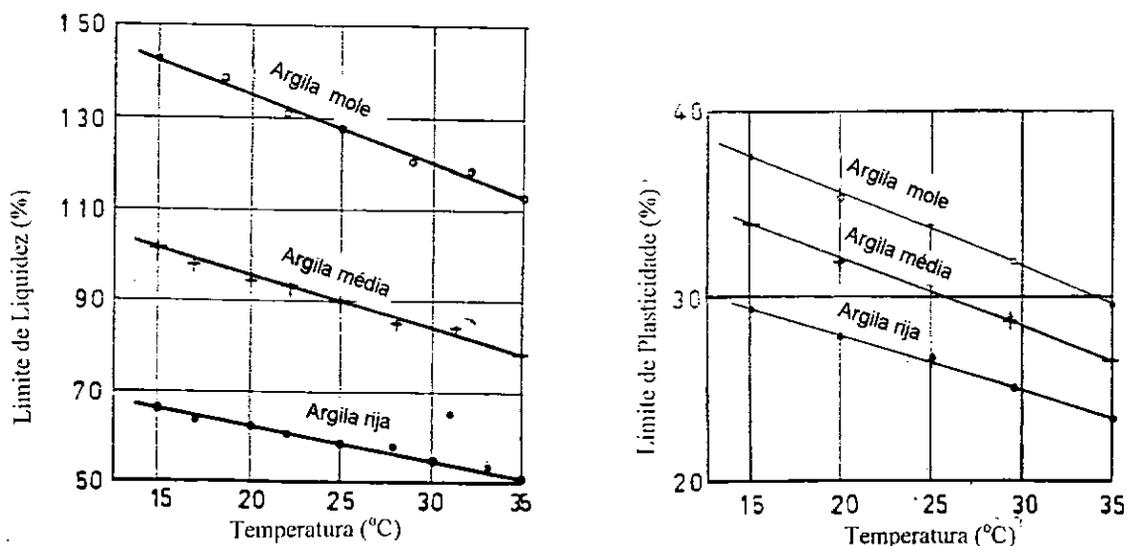


Fig. 2-1 - Efeito da temperatura nos limites de liquidez e plasticidade de três argilas. Youssef et al.(1961).

2.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VARIAÇÃO DE VOLUME E POROPRESSÃO

Em ensaios realizados por vários autores (Paaswel-1967, Campanella & Mitchell-1968, Demars & Charles-1982, Burghignoli et al.-1992) observa-se que mudanças cíclicas de temperatura causam uma variação de volume irreversível. Para solos normalmente adensados o aumento de temperatura causa uma contração, enquanto em solos sobreadensados observa-se tanto expansão quanto contração. Este efeito parece não ser só conseqüência da variação da temperatura. Feijó (1991) mostrou que para a argila do Sarapuí sob temperatura constante corpos de prova com razões de sobreadensamento ($OCR \leq 2$) comprimiam mesmo após um descarregamento. Mostrou também que corpos de prova com $OCR \geq 6$ apresentavam uma expansão secundária. Para valores de $2 \leq OCR \leq 6$ os corpos de prova não apresentavam variação de volume após a compressão primária.

Os resultados dos ensaios de adensamento convencionais, executados por Campanella & Mitchell (1968), sob temperatura controlada, indicam que o índice de compressão ($C_c = \Delta e /$

$\Delta \log \sigma'_v$), não sofre alteração com a variação de temperatura, entretanto, quanto maior a temperatura, menor é o índice de vazios para qualquer tensão, conforme apresentado na Fig. 2-2. Isto ocorre pois a parcela de resistência viscosa do solo diminui com o aumento da temperatura e o solo sofrerá portanto, maiores deformações. Além disto, as tensões de sobreadensamento obtidas nos ensaios diminuem com o aumento da temperatura.

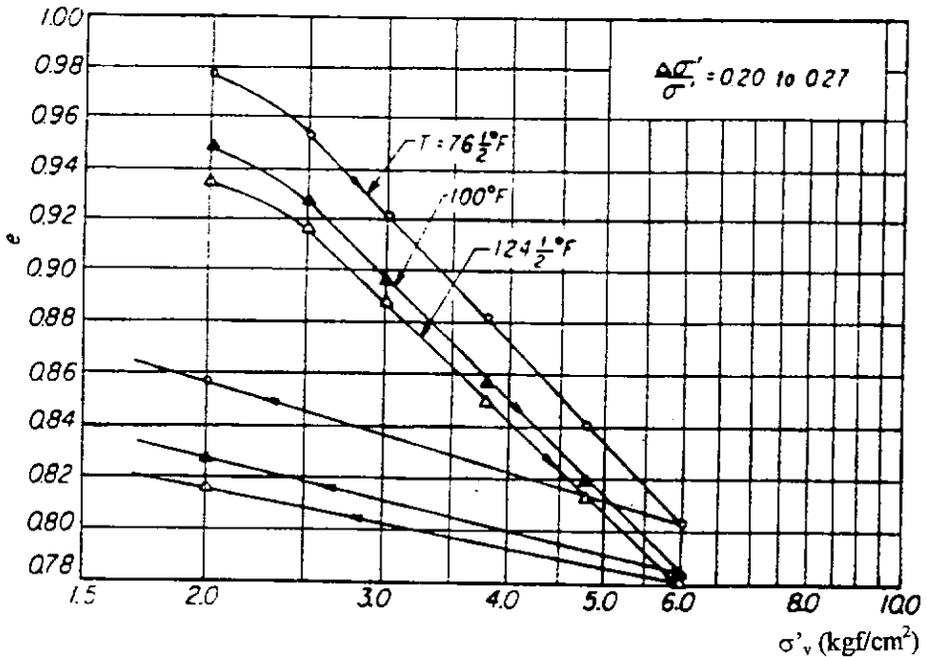


Fig. 2-2 - Efeito da temperatura no adensamento hidrostático da argila saturada. Campanella & Mitchell (1968).

Além dos ensaios de adensamento, Campanella & Mitchell (1968) executaram também ensaios triaxiais drenados e não drenados executados sob temperatura controlada, com medidas de poro-pressão. As amostras foram inicialmente adensadas hidrostaticamente a uma tensão de 2kgf/cm^2 e a uma temperatura de 65°F por um período de cerca de 10.000min, para que se pudesse desconsiderar a variação de volume devido a compressão secundária. Após o que, foram executados ensaios drenados, com ciclos de temperatura, com tensões constantes, sem aplicação de tensão de desvio.

Os resultados obtidos mostram que a maior parte da deformação permanente ocorre durante o primeiro ciclo de aumento de temperatura. Após o primeiro ciclo de temperatura a variação de volume com a variação de temperatura foi praticamente constante.

Após a fase drenada, utilizaram-se as mesmas amostras para a execução de ensaios não-drenados, para verificação do efeito da temperatura na poro-pressão. A Fig. 2-3 apresenta os resultados destes ensaios. Quando a temperatura da amostra é aumentada, a poro-pressão aumenta e a tensão efetiva diminui, o que causará deformação se a drenagem for permitida.

A redução da temperatura causará uma redução do valor da poro-pressão e uma expansão, criando um “loop” de histerese, análogo ao da curva de recompressão dos ensaios de adensamento convencionais. Os fatores que controlam esta variação da poro-pressão são : magnitude da variação da temperatura, porosidade, diferença entre os coeficientes de expansão térmica dos grãos do solo e água, deformação volumétrica relativa a efeitos físico-químicos e compressibilidade do solo.

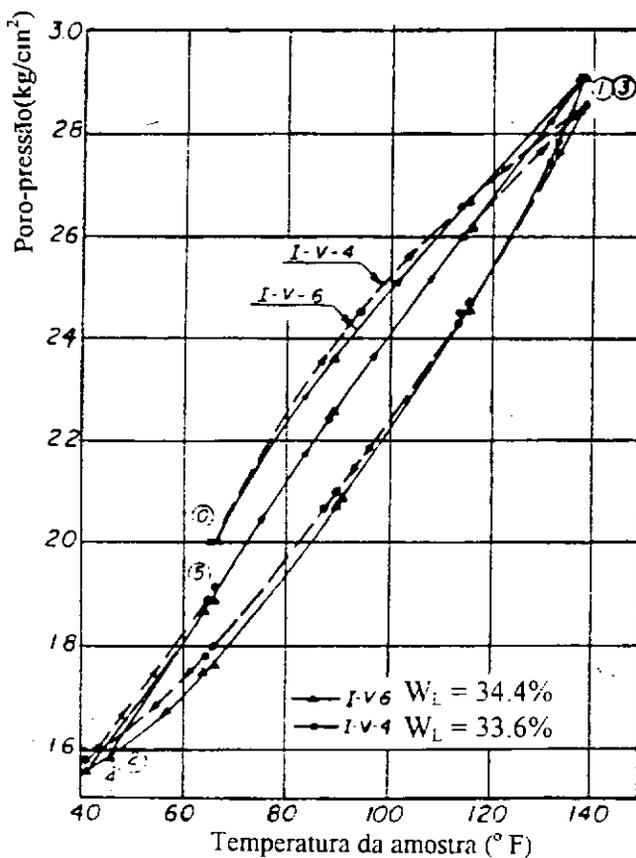


Fig. 2-3 - Efeito da temperatura na poro-pressão em ensaios não drenados. Campanella & Mitchell (1968).

Demars & Charles (1982) executaram ensaios de compressão hidrostática, com tensões confinantes variando de 3.5 a 400 kPa. Para a verificação do comportamento do solo

frente à variação da temperatura, as amostras foram inicialmente adensadas a 25°C, quando se permitiu um pequeno adensamento secundário, para então serem aquecidas a 50°C. Mediu-se a variação de volume referente a esta fase. Procedeu-se então ao esfriamento das amostras, a 25°C, medindo-se também a variação de volume. Foram executados ensaios no trecho sobreadensado e normalmente adensado.

Em amostras normalmente adensadas, observou-se que há variação permanente do índice de vazios (Δe_{st}), cuja correlação com o índice de plasticidade (IP) da amostra é aproximadamente linear, apresentado na Fig. 2-4. Campanella & Mitchell (1968) correlacionaram o índice de vazios com a variação de temperatura e IP : $\Delta e_{st} = (0.00048 + 0.0000088 \text{ IP}) \Delta T$, onde ΔT é a variação de temperatura do ciclo, em graus Centígrados.

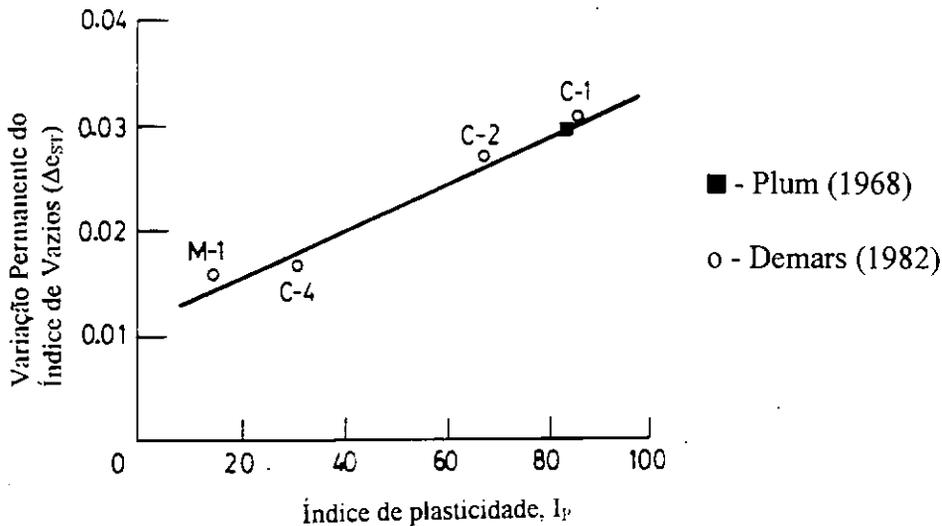


Fig. 2-4 - IP x Δe_{st} para ciclos de 25°C-50°C- 25°C. Demars & Charles (1982).

Portanto, os resultados obtidos para amostras normalmente adensadas submetidas a ciclos de temperatura, indicam que solos com maior índice de plasticidade são mais suscetíveis à variação de volume como consequência do aumento da temperatura.

Para os solos sobreadensados, a magnitude da variação permanente de volume devido ao aumento da temperatura depende do tipo de solo e da plasticidade, mas decresce com o aumento do OCR ("overconsolidation ratio" - razão de sobreadensamento), conforme indicado na Fig. 2-5.

Em função dos resultados obtidos por Feijó (1991), onde uma amostra submetida a um alto OCR apresenta expansão secundária, é possível que o aumento da temperatura permita uma expansão secundária mais rápida.

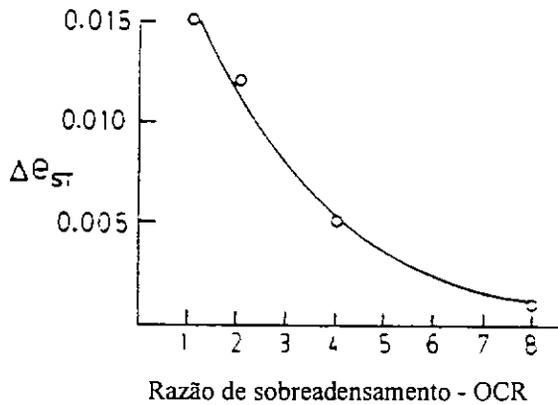


Fig. 2-5 - Redução permanente do índice de vazios relativo ao ciclo de temperatura x OCR, para a primeira sequência de recompressão. Demars & Charles (1982).

O máximo valor de Δe_{st} (0.015) é o mesmo para os dois ciclos, e é possível que seja uma constante para uma determinada argila e um determinado ciclo de temperatura e não dependa do nível de tensão.

Burghignoli et al.(1992) executaram ensaios em amostras amolgadas na argila de Toldi em que concluem que tanto o valor de Δe_{st} quanto o sinal (contração ou expansão) dependem do OCR. A Fig. 2-6 apresenta os resultados dos ensaios de compressão hidrostática, para ciclos de temperatura variando de 22 a 42°C.

No adensamento, normalmente o ciclo de temperatura produz um decréscimo de índice de vazios. Entretanto após um descarregamento há um aumento do índice de vazios, cuja magnitude depende do OCR. Ao passar da condição de normalmente adensada para a condição de sobreadensada, a argila ensaiada mudou de contração devido à variação de temperatura para expansão devido à variação de temperatura.

Como será visto adiante, é possível que isto seja um efeito combinado da temperatura e OCR, pois os ensaios de Feijó (1991) mostraram que, sob temperatura constante, após um descarregamento, o corpo de prova pode apresentar compressão ou expansão secundária, dependendo do valor do OCR.

Eriksson (1989) executou ensaios convencionais de adensamento em argilas siltosas sulfídicas, para variação de temperatura de 5°C a 55°C. A Fig. 2-7 apresenta a variação da tensão de sobreadensamento x temperatura dos ensaios.

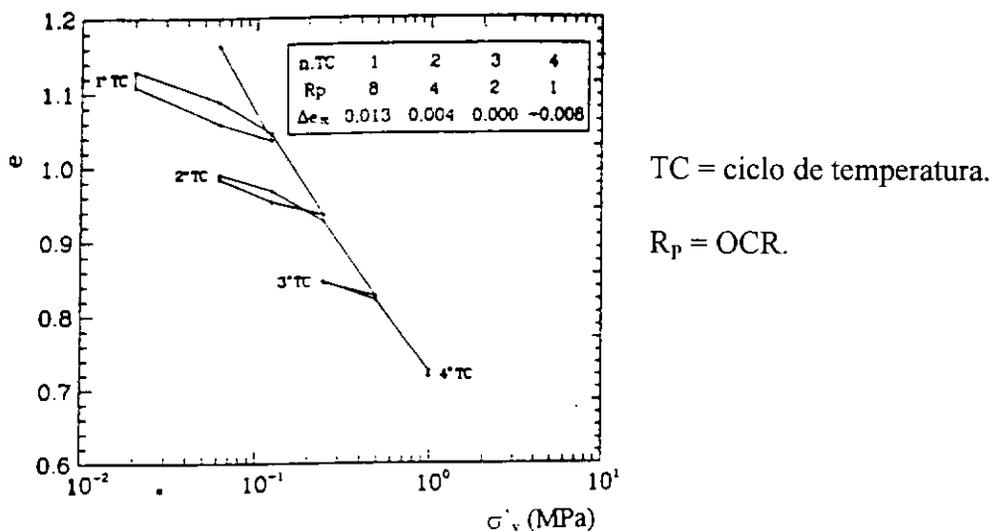


Fig. 2-6 - Compressão hidrostática com ciclos térmicos intermediários, temperatura variando de 22-42-22°C. Burghignoli et al.(1992).

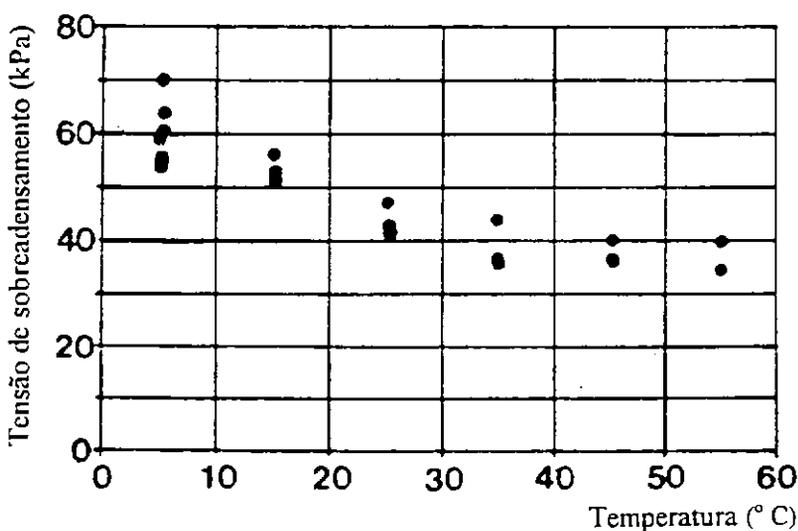


Fig. 2-7 - Tensão de sobreadensamento da argila sulfídica de Lulea, em função da temperatura do ensaio. Eriksson (1989).

Para temperaturas maiores que 35°C, observa-se a tendência da tensão de sobreadensamento convergir assintoticamente para o valor de 30 kPa. Moritz (1995) também observou comportamento semelhante ao ensaiar argilas suecas.

O que se observa é que de uma maneira geral as argilas de locais e formação diferenciados apresentam comportamentos similares quando sujeitas à variação de

temperatura, em função, por exemplo, de sua plasticidade e OCR. Tanto argilas moldadas em laboratório (Campanella & Mitchell - 1968), quanto argilas naturais apresentam a mesma tendência.

2.3 .ESTUDOS DA UNIVERSIDADE LAVAL

2.3.1 Influência da velocidade de deformação vertical específica

Leroueil et al.(1985) executaram vários ensaios de adensamento, a temperatura constante, em amostras de pequena espessura, de várias argilas saturadas de Champlain :

- ensaios de adensamento unidimensional a velocidade de deformação vertical específica controlada (“Constant Rate of Strain Consolidation” - CRSC). Na Fig. 2-8, estão apresentados alguns resultados de ensaios CRSC executados na argila de Batiscan;

- ensaios de adensamento com gradiente controlado (“Controlled Gradient” - CGTS), no qual a diferença entre a poro-pressão do topo e da base da amostra é mantida constante;

- ensaios de fluência (“creep tests”) com duração de mais de 70 dias, ensaios de adensamento convencionais com razão de incremento de tensão constante $\Delta\sigma'_v / \sigma'_v = 0.5$.

Os resultados dos ensaios indicam que o comportamento reológico destas argilas pode ser descrito através de duas curvas : $(\sigma'_p (\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v)$ e $(\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v)$, onde : σ'_p é a tensão de sobreadensamento, ϵ_v é a deformação específica vertical, σ'_v é a tensão vertical efetiva e $\dot{\epsilon}_v$ é a velocidade de deformação específica vertical.

O modelo admite que para uma determinada tensão vertical efetiva e velocidade de deformação vertical específica existe uma deformação vertical específica associada, independente do tipo de ensaio de adensamento executado. Entretanto o modelo não prevê o comportamento do trecho sobreadensado e apresenta discrepâncias para ensaios executados a baixas velocidades ($<10^{-8} \text{ s}^{-1}$) e a altas velocidades ($>10^{-5} \text{ s}^{-1}$). Para exemplificar o modelo proposto, apresentam-se os resultados dos ensaios executados na argila de Batiscan.

Foram executados ensaios CRCS e de fluência nesta argila sob várias tensões verticais efetivas, indicados nas Fig. 2-8 e Fig. 2-9.

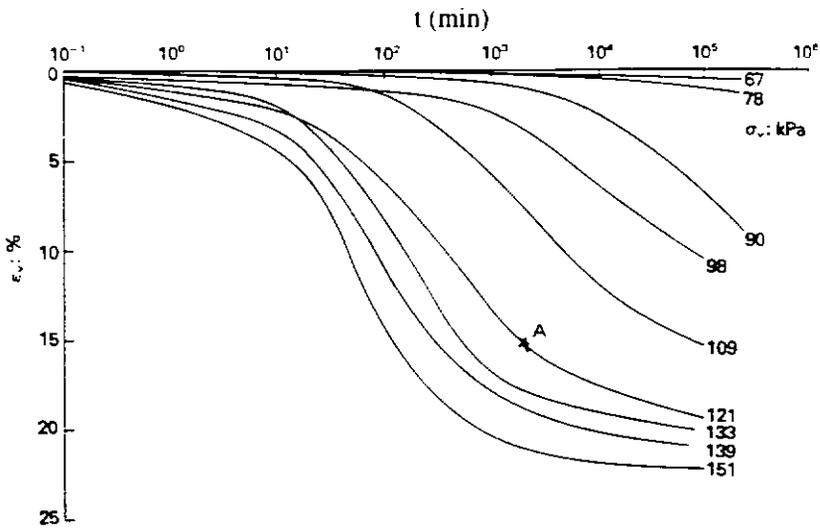


Fig. 2-8- Ensaio CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al (1985).

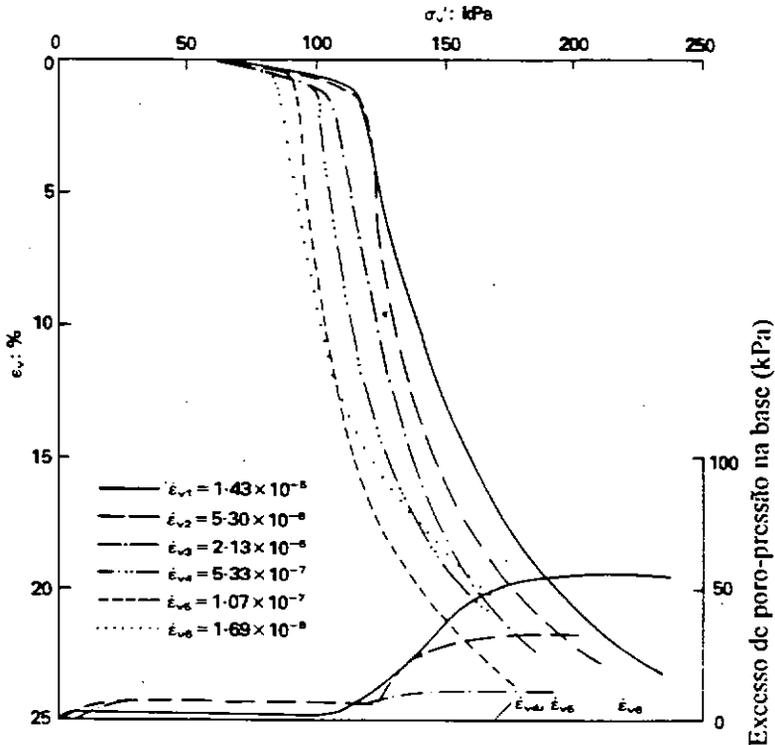


Fig. 2-9 - Curva $\epsilon_v \times \log t$ - ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

Tomando-se como exemplo o ponto A, da curva $\epsilon_v \times t$, desta figura, dispõe-se, neste ponto dos valores da tensão vertical efetiva (121 kPa) e da deformação vertical específica referente a esta tensão. Calcula-se a velocidade de deformação vertical específica neste ponto a partir da deformação vertical específica e do tempo. Isto é feito para todos os pontos do ensaio, obtendo-se portanto a curva $\dot{\epsilon}_v \times \epsilon_v$, para a tensão de 121 kPa. Para os demais ensaios executados à diferentes níveis de tensão segue-se o mesmo procedimento, para todos os pontos, conforme indicado na Fig. 2-10.

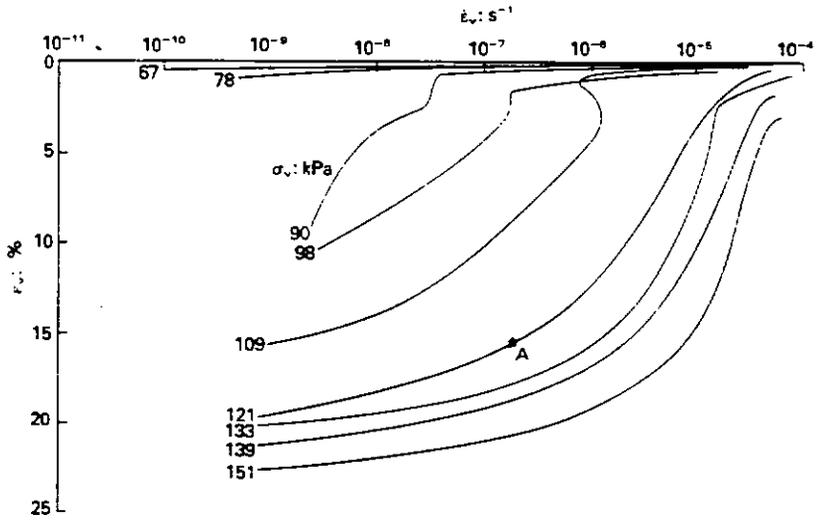


Fig. 2-10 - Curva ($\dot{\epsilon}_v \times \epsilon_v$) para ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

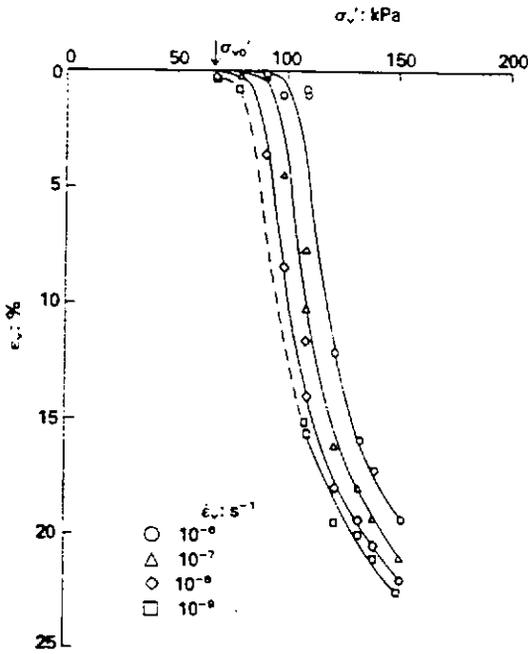


Fig. 2-11 - Curvas para $\dot{\epsilon}_v$ constante, deduzidas de ensaios de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

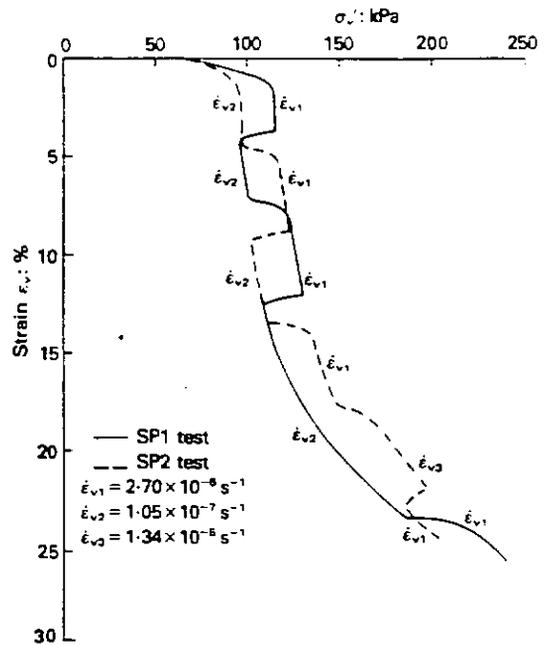


Fig. 2-12 - Ensaios oedométricos especiais CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

Obtém-se a correlação das $\dot{\epsilon}_v \times \epsilon_v$ para cada nível de tensão aplicada, e portanto pode-se correlacionar $\epsilon_v \times \sigma'_v$ para cada velocidade de deformação vertical específica, conforme indicado na Fig. 2-11, tal qual um ensaio de adensamento CRSC.

As curvas $\sigma'_v (\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v$, para $\dot{\epsilon}_v$ constante, deduzidas a partir dos ensaios de fluência, podem ser então comparadas com as obtidas nos ensaios CRSC, para as mesmas velocidades.

A Fig.2-12 apresenta os resultados de ensaios CRSC especiais para velocidades de deformação vertical específica variando durante o ensaio. Os resultados obtidos indicam a existência de uma única correlação entre $\sigma'_v \times \epsilon_v \times \dot{\epsilon}_v$ para esta argila, pois ao se variar a velocidade de deformação vertical específica durante o ensaio, obtêm-se curvas tensão-deformação distintas para $\dot{\epsilon}_{v1}$ e $\dot{\epsilon}_{v2}$.

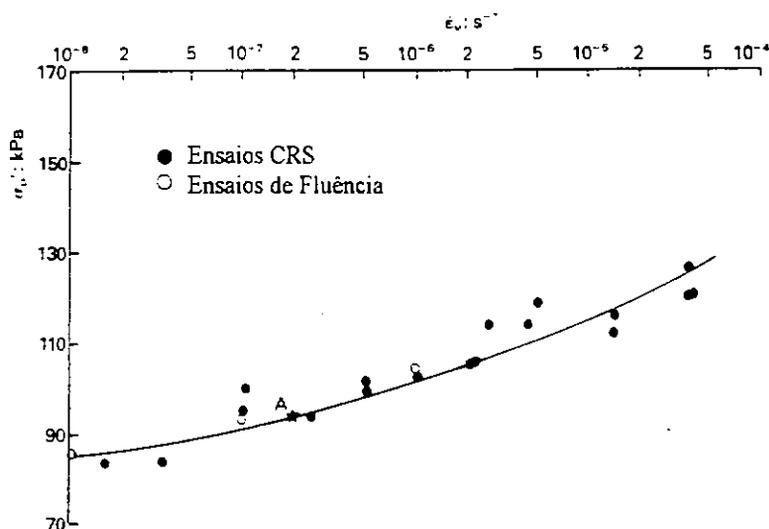


Fig. 2-13 - Variação da tensão de sobreadensamento com a velocidade de deformação vertical específica - argila de Batiscan. Leroueil et al (1985).

A tensão de sobreadensamento de uma argila, obtida em um ensaio de adensamento varia com a velocidade de deformação vertical específica utilizada no ensaio. Na Fig. 2-13 tomando-se o ponto A como exemplo, a tensão de sobreadensamento, σ'_p , é de 94 kPa. Considerando-se todos os pontos, tem-se a correlação $\sigma'_p (\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v$. Pode-se, portanto obter-se uma curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v$.

A curva normalizada apresentada na Fig. 2-14 apresenta bons resultados até deformações da ordem de 16 %. Entretanto para altas velocidades de deformação vertical específica os resultados não concordam com a curva normalizada. É possível que essa não concordância seja devida à forma pela qual são calculadas as tensões efetivas nos ensaios CRSC fazendo com que o valor de σ'_v para altas velocidades seja maior que o realmente atuante. Esse assunto será abordado novamente no capítulo 3.

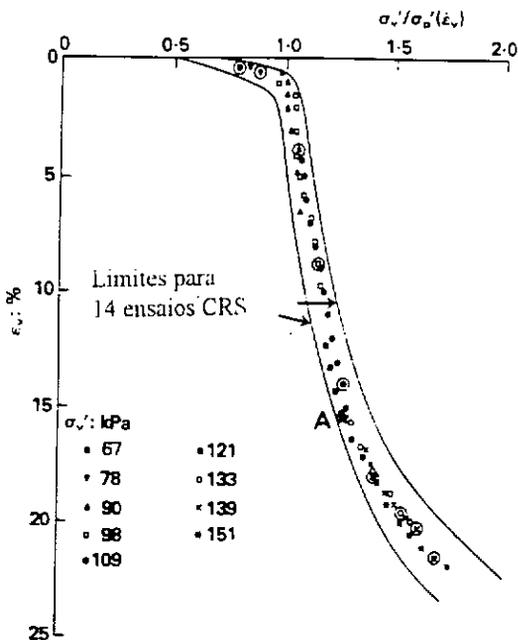


Fig. 2-14 - Correlação normalizada entre tensão efetiva e deformação vertical específica deduzida do ensaio CRSC - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

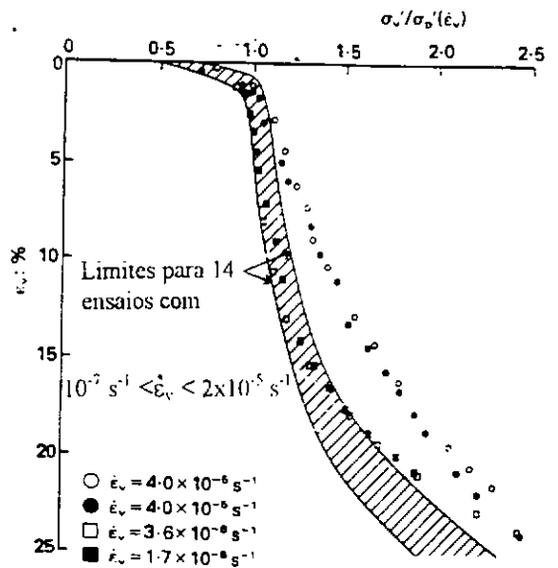


Fig. 2-15 - Correlação normalizada entre tensão efetiva e deformação vertical específica deduzida do ensaio de fluência - argila de Batiscan. Leroueil et al. (1985).

Para se comparar os pontos normalizados dos ensaios de fluência com os ensaios CRSC, apresentados na Fig. 2-15, inseriu-se na curva o limite dos resultados dos 14 ensaios executados. Observa-se uma boa concordância com os resultados dos ensaios CRSC.

2.3.2 - Influência da temperatura e velocidade de deformação vertical específica

Boudali et al (1994) estenderam o modelo proposto por Leroueil et al (1985), analisando a influência da velocidade de deformação vertical específica e da temperatura no adensamento da argila Berthierville. Foram executados ensaios CRSC em argilas naturais a temperaturas de 5°, 20° e 35°C, para várias velocidades de deformação vertical específica, cujos resultados estão apresentados na Fig. 2-16.

O excesso de poro pressão medido na base, para uma mesma tensão efetiva é maior para temperaturas menores. Isto ocorre porque para menores temperaturas a viscosidade da água livre aumenta, logo a condutividade hidráulica diminui conforme observa-se na Fig. 2-17. Na realidade considerando-se que o aumento da temperatura afeta a viscosidade da água adsorvida, a poro-pressão deveria aumentar com o aumento da temperatura, pois o solo fica "mole", devido à perda da resistência, entretanto o que se observa é que quem controla a variação da poro-pressão durante o adensamento em um ensaio CRSC é a água livre.

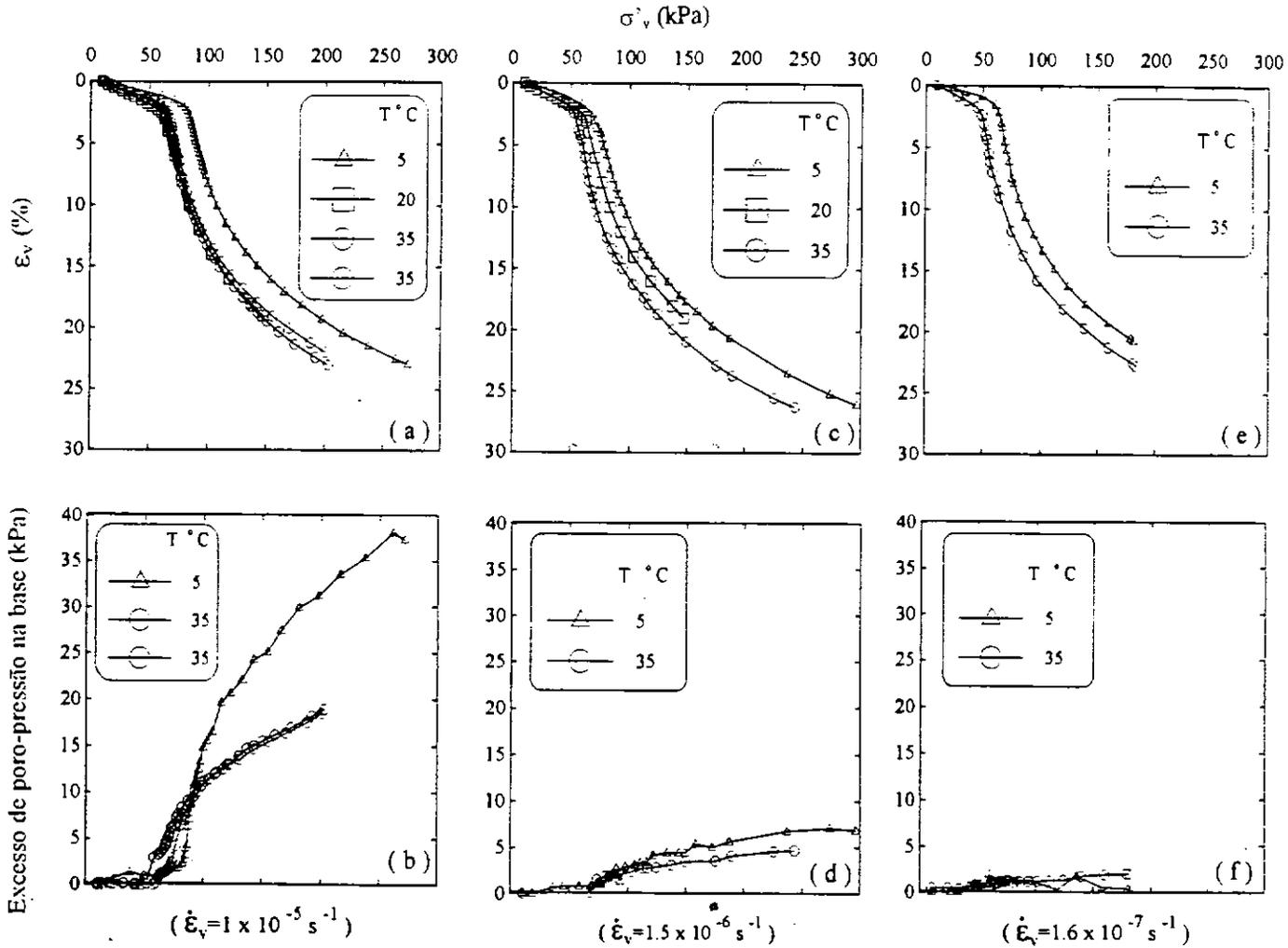


Fig. 2-16 - Efeitos da velocidade de deformação vertical específica e temperatura no adensamento unidimensional - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994).

Observou-se nos ensaios executados na argila de Berthierville, que para índices de vazios menores que 1,4, o logaritmo da condutividade hidráulica da amostra decresce linearmente. Para um mesmo índice de vazios, à 5°C, a condutividade hidráulica é cerca de duas vezes menor que à 35°C, pois para esta variação de temperatura a viscosidade da água é duplicada.

Na Fig. 2-18 está apresentada a curva normalizada em função da tensão de sobreadensamento obtida em função da velocidade de deformação e temperatura. Os resultados obtidos são compatíveis com os resultados de Campanella (1965), pois se as curvas são paralelas num diagrama $e \times \log \sigma'_v$, podem ser normalizadas.

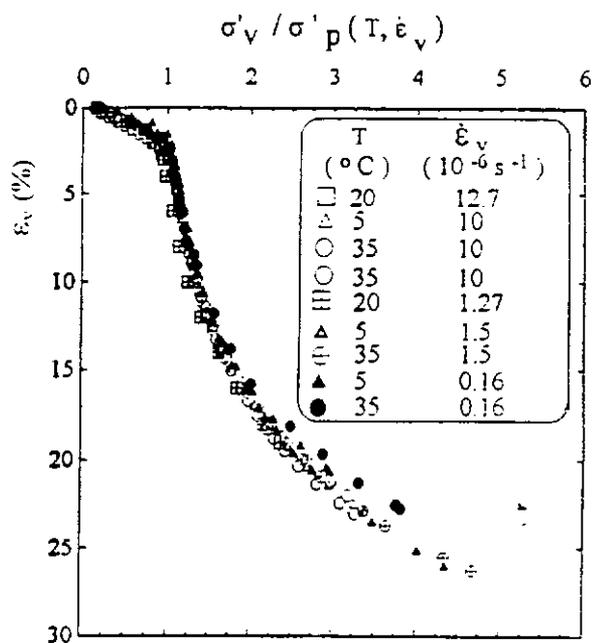
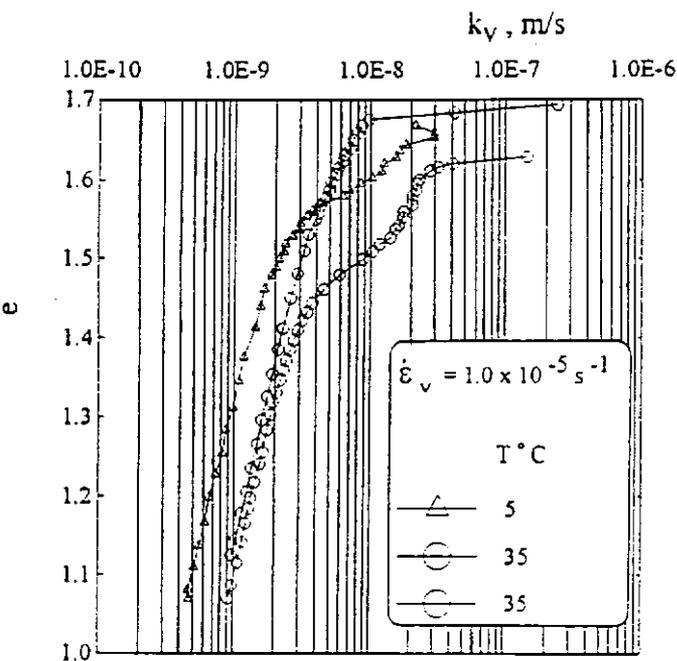


Fig. 2-17 - Condutividade hidráulica deduzida de ensaios CRSC a temperaturas de 5° C e 35° C - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994).

Fig. 2-18 - Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p(T, \dot{\epsilon}_v)$ - argila de Berthierville. Boudali et al.(1994).

2.4 ESTUDOS DA COPPE

Os estudos sobre o comportamento reológico das argilas sob condição unidimensional tomaram impulso na COPPE a partir de 1983. Schmertmann (1983) promoveu uma enquete sobre a evolução de K_0 durante o adensamento secundário. As opiniões dos entrevistados variaram entre K_0 constante, decrescendo (o que indica que a medida que o solo adensa mais se aproxima da ruptura, o que é uma contradição) ou crescendo. Alguns entrevistados por não possuírem ou desconhecerem evidências experimentais, afirmaram não saber o que ocorria com o K_0 durante o adensamento secundário.

Taylor & Merchant (1940) e Taylor (1942) já levantaram a possibilidade de K_0 crescer durante o ensaio de adensamento edométrico como consequência da dissipação de tensões cisalhantes.

Lacerda (1977) ao executar ensaios de fluência drenada na “San Francisco Bay Mud” sob condições unidimensionais numa câmara triaxial, observou que durante o adensamento secundário era necessário aumentar a tensão confinante (σ'_h) com o tempo para manter a deformação horizontal nula. Logo para a “San Francisco Bay Mud”, no trecho normalmente

adensado, K_0 cresce com o tempo e portanto não era constante e não poderia ser considerado uma propriedade do solo (Fig. 2-19)

Os resultados de Lacerda (1977) foram questionados pelo fato de seus ensaios não serem ensaios K_0 , já que era necessário o aumento da tensão confinante σ'_h para restabelecer a condição $\varepsilon_h = 0$. Entretanto, Kavazanjian & Mitchell (1984) repetindo o mesmo ensaio na "San Francisco Bay Mud", porém com controle muito mais rigoroso de ε_h , chegaram ao mesmo resultado.

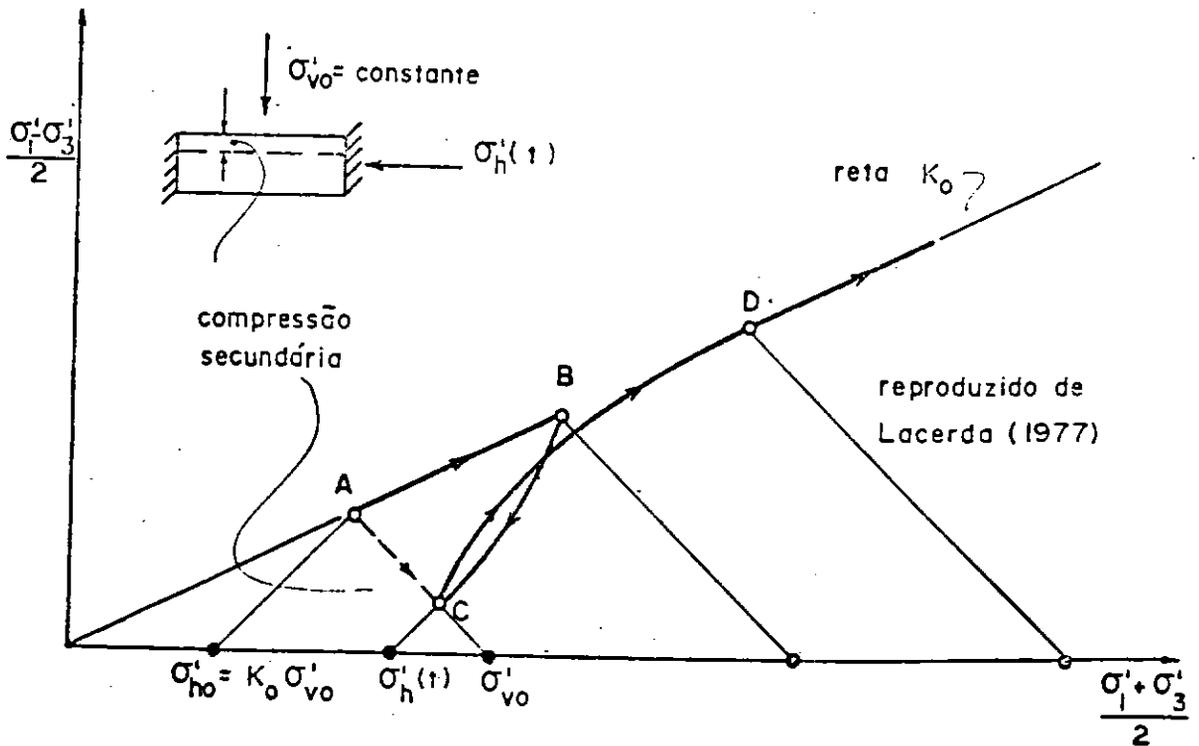


Fig. 2-19 - Caminho de tensões durante a compressão secundária. Lacerda (1977).

A constatação do crescimento de K_0 com o tempo levou Lacerda & Martins (1985) a uma série de questões de natureza física quanto ao adensamento secundário já que as abordagens que fazem uso de C_α ou C_α / C_c (Mesri, 1973 e Mesri & Godlewski, 1977), por exemplo, não explicam o fenômeno físico.

Lacerda & Martins (1985) propoem um mecanismo descrito a seguir.

Admitindo-se que durante o adensamento primário o coeficiente de empuxo no repouso de um solo normalmente adensado (denotado por K_{0n}) permaneça constante, o caminho de tensões efetivas seguido é AB conforme apresentado na Fig. 2-20

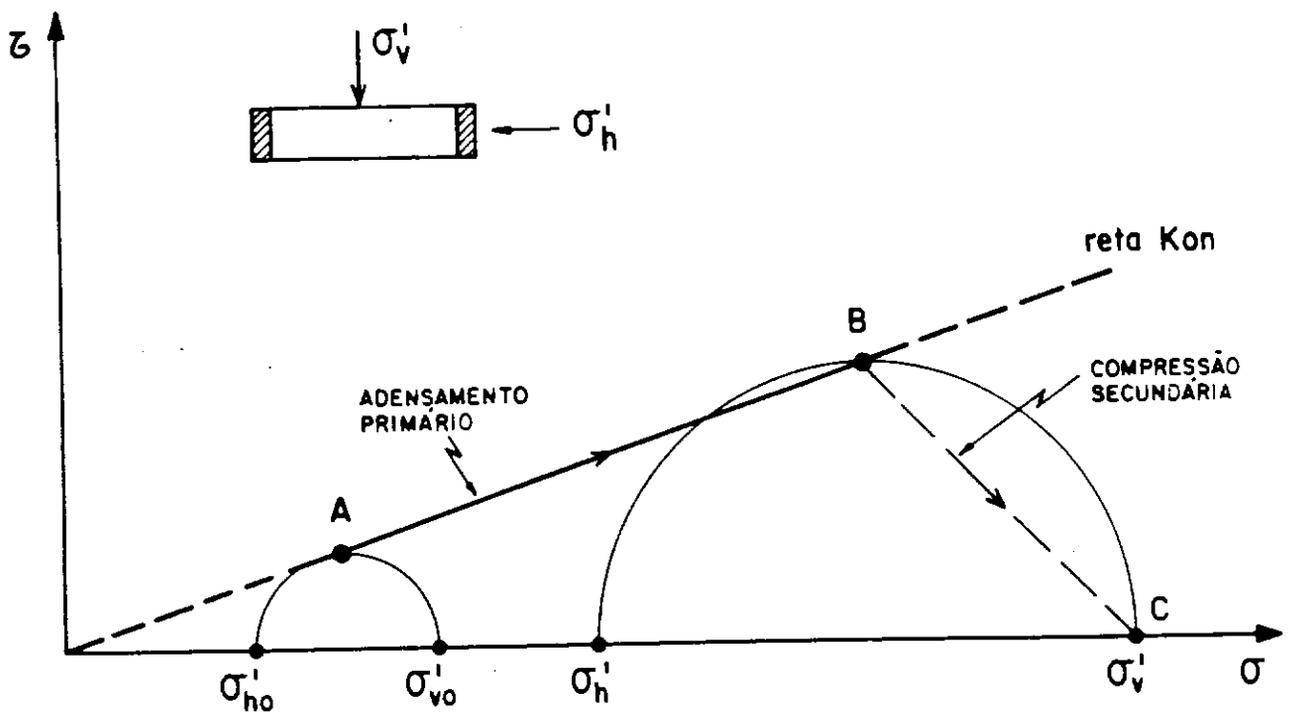


Fig. 2-20 - Caminho de tensões efetivas de uma amostra normalmente adensada no ensaio edométrico. Feijó (1991).

Chegando ao ponto B não há mais variação da tensão vertical efetiva σ'_{vB} . Entretanto, admitindo-se que só pode haver variação de volume se houver variação da tensão octaédrica efetiva (σ'_{oct}), para σ'_{oct} crescer é necessário que σ'_h cresça. Assim sendo, o caminho de tensões efetivas a ser seguido será BC na Fig. 2-20, com conseqüente variação de volume ao longo do tempo, com poro-pressão nula, que é por definição a compressão secundária.

De acordo com este mecanismo, a compressão secundária estaria hipoteticamente ligada a fenômenos viscosos que teriam por conseqüência a dissipação das tensões cisalhantes e aumento da σ'_{oct} . Com isto a compressão secundária seria incluída no Princípio das Tensões Efetivas pois embora σ'_v se mantenha constante a compressão adicional observada com o tempo seria decorrente do aumento da tensão efetiva horizontal (σ'_h). Na Fig. 2-21 apresenta-se um esquema do mecanismo.

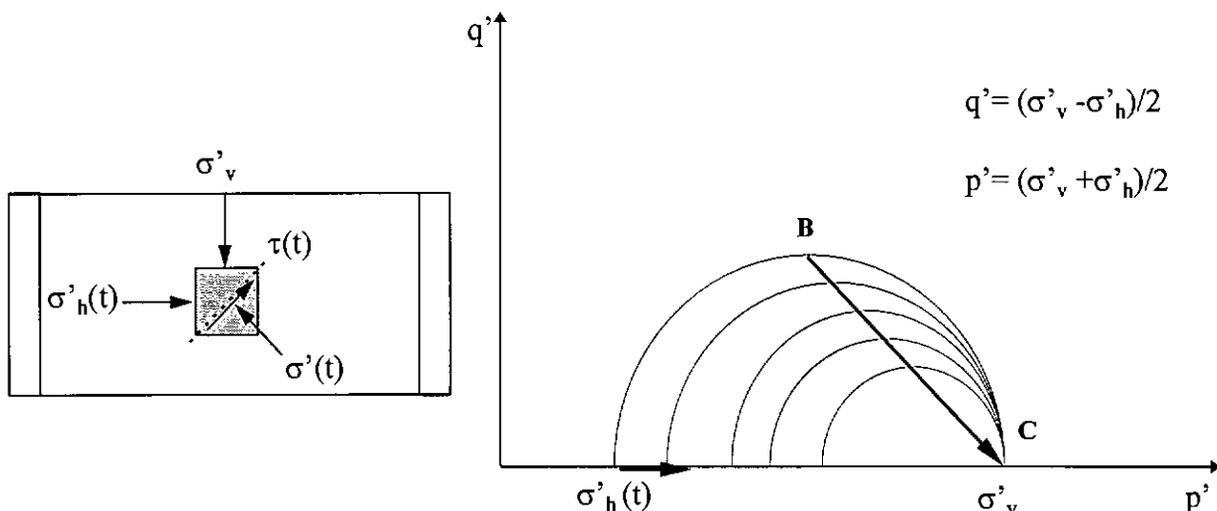


Fig. 2-21 - Variação da tensão octaédrica no ensaio edométrico .

Mantendo-se σ'_v constante e admitindo-se que haja dissipação das tensões cisalhantes (τ), fenômeno conhecido como relaxação, o Círculo de Mohr deve diminuir de diâmetro o que só pode acontecer com σ'_v constante, se σ'_h crescer com o tempo.

Com base na discussão acima Lacerda & Martins (1985) argumentaram que o fenômeno deveria cessar quando as tensões cisalhantes na massa de solo desaparecessem, fazendo com que a longo prazo K_0 tendesse a 1. Com isso poder-se ia adicionar às curvas de envelhecimento “aging” de Bjerrum (1967) uma curva limite correspondente a tempo infinito e $K_0 = 1$, que representasse o processo, como apresentado na Fig. 2-22.

Motivados pela discussão acima Martins & Lacerda (1985) apresentam uma teoria de adensamento com compressão secundária cujas hipóteses, além daquelas da teoria clássica são:

- Os adensamento primário e secundário ocorrem simultaneamente;
- Há uma relação de tensões tal que a razão de variação da tensão desviadora (q) com o tempo é proporcional ao seu valor corrente. Esta hipótese é traduzida por :

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda q \quad (2-2)$$

sendo λ um parâmetro que controla a velocidade da relaxação;

- Quem controla a variação de volume é a σ'_{oct} de acordo com

$$\epsilon_v = \frac{\Delta\sigma'_{oct}}{M'} \quad (2-3)$$

sendo M' o módulo de compressão volumétrica (admitido constante). Com estas hipóteses a expressão para a deformação volumétrica específica $\epsilon_v(t)$ é dada por :

$$\epsilon_v(t) = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{v0}}{M'} + \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{v0}}{M'} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (2-4)$$

A primeira parcela da expressão (2-4) fornece a deformação por adensamento primário $\epsilon_{vp}(t)$ e a segunda a deformação por adensamento secundário $\epsilon_{vs}(t)$. Estas deformações estão representadas na Fig. 2-23.

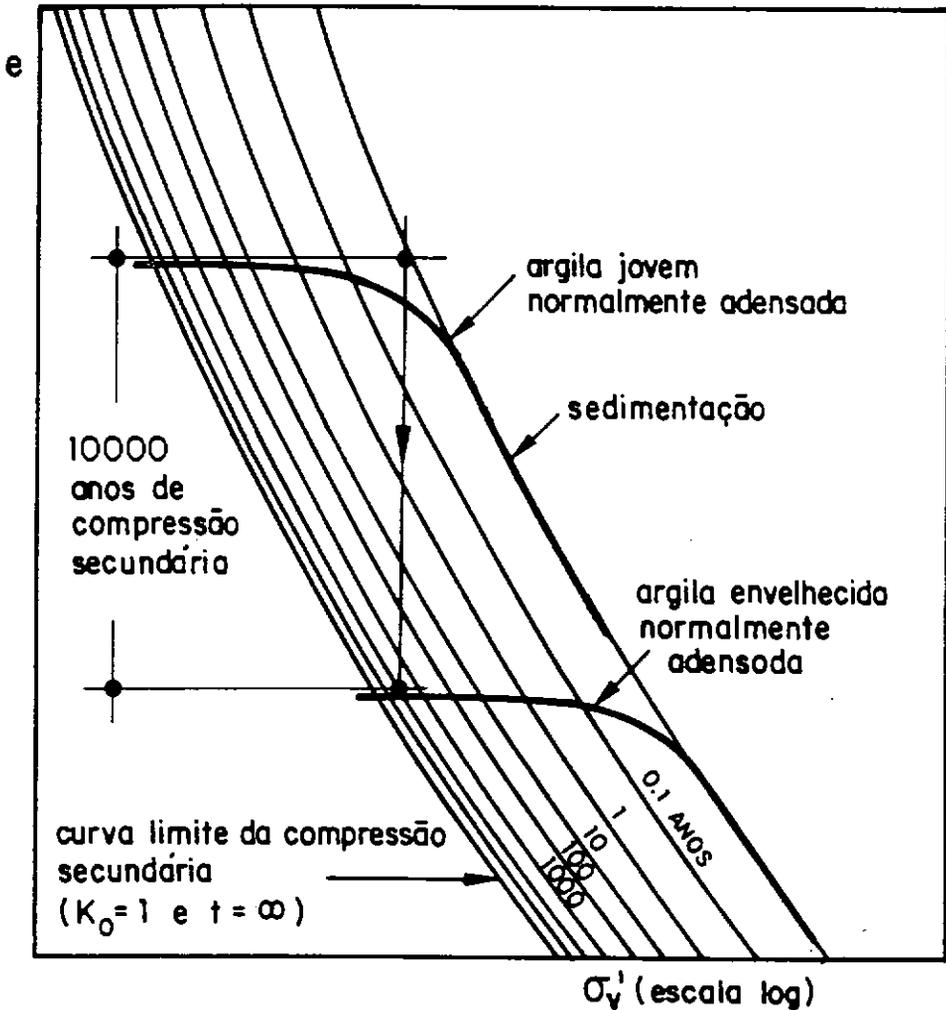


Fig. 2-22 - Esquema da compressão secundária, Bjerrum (1967) e Lacerda & Martins (1985).

Já que as compressões primária e secundária ocorrem simultaneamente, o caminho seguido na Fig. 2-23 é AEC e não ABC como nas abordagens que admitem que o adensamento secundário só se inicia ao fim do primário.

Num ponto intermediário do processo tal como E na Fig. 2-23 a porcentagem de adensamento primário U_{zp} é dada por :

$$U_{zp} = \frac{\overline{FD}}{\overline{GB}} = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}} = \frac{\epsilon_{vp}(t)}{\epsilon_{vp\infty}} \quad (2-5)$$

A porcentagem de adensamento secundário U_{zs} é dada por:

$$U_{zs} = \frac{\overline{DE}}{\overline{BC}} = \frac{\epsilon_{vs}(t)}{\epsilon_{vs\infty}} \quad (2-6)$$

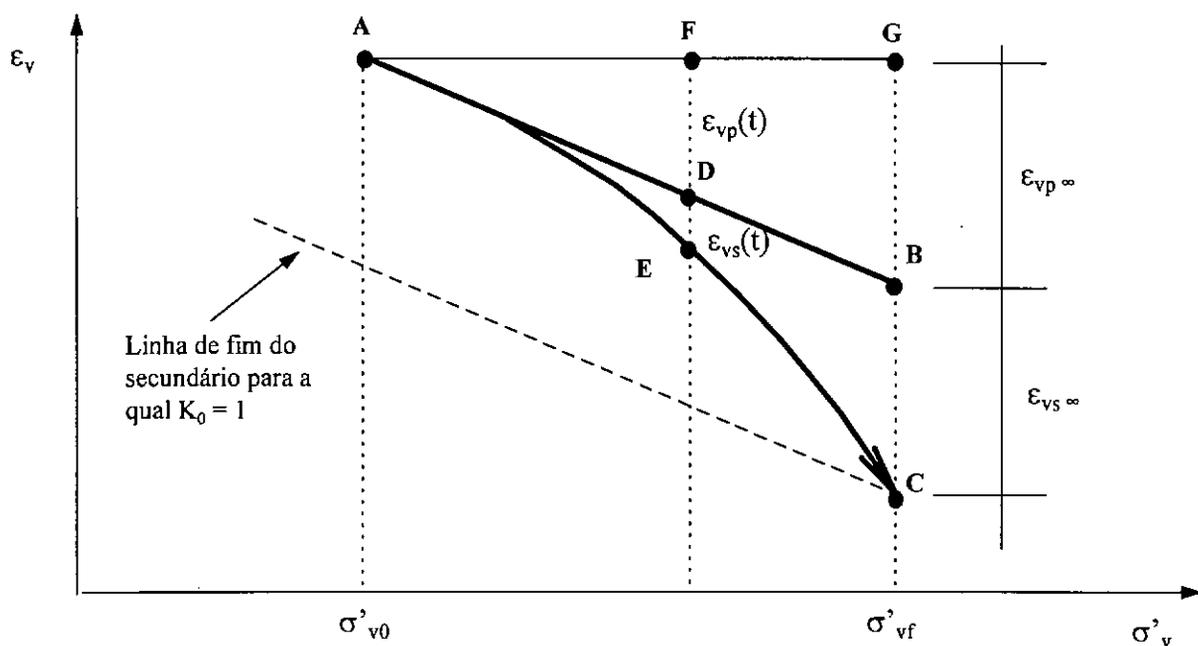


Fig. 2-23- Representação esquemática das deformações por adensamento primário e secundário.

A porcentagem de adensamento global U_z é definida por:

$$U_z = \frac{\varepsilon_{vp}(t) + \varepsilon_{vs}(t)}{\varepsilon_{vp\infty} + \varepsilon_{vs\infty}} \quad (2-7)$$

e dada por:

$$U_z(z, t) = \frac{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}) \left[1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \operatorname{sen} \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T) \right]}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0} + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\lambda t)]}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0} + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n})} \quad (2-8)$$

onde $M = (2m+1)\pi/2$ e T o fator tempo.

A porcentagem média de adensamento é obtida integrando-se (2-8) :

$$\bar{U}(T) = \frac{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) \left[1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T) \right]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) + \frac{2}{3}(1 - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3}(1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\theta T)]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) + \frac{2}{3}(1 - K_{0n})} \quad (2-9)$$

onde $\theta = \lambda t/T$.

A expressão (2-9) é representada graficamente nas Fig. 2-24 e Fig. 2-25 para $K_{0n} = 0.6$.

É interessante notar nas Fig. 2-24 e Fig. 2-25 os efeitos de θ e da relação $\Delta\sigma / \sigma$ sobre as curvas de adensamento. Quanto menor o valor de θ (ou de λ) mais lentamente se manifesta a compressão secundária. A influência da razão $\Delta\sigma / \sigma$ aparece claramente na Fig. 2-24. Quanto menor o valor de $\Delta\sigma / \sigma$ maior é o efeito da compressão secundária fazendo com que sejam maiores as diferenças entre as curvas $\bar{U} \times T$ que representam a expressão (2-9) e a curva $\bar{U} \times T$ da teoria de Terzaghi. Esta característica decorre do fato de a linha hipotética de final de secundário ser paralela à linha de final do primário fazendo com que a variação do índice de vazios correspondente ao adensamento secundário seja independente do valor de $\Delta\sigma / \sigma$ o que não acontece com a compressão primária.

Para estudar a influência da relação $\Delta\sigma / \sigma$ e do ajuste da equação (2-9) às curvas experimentais de laboratório (deformação x tempo), Martins (1987) executou 3 ensaios de adensamento numa mistura de 90% de caulim e 10% de bentonita. Da mistura assim formada, após homogeneização, foram moldados três corpos de prova os quais foram submetidos, no domínio normalmente adensado às relações $\Delta\sigma / \sigma = 0.33$, 0.50 e 1.00. Os incrementos de tensão se deram ao final do primário do estágio anterior (definido pelo método de Taylor) tendo sido mantidos por mais de 2 anos.

Os resultados da Fig. 2-26 mostram claramente que quanto maior o valor de $\Delta\sigma / \sigma$ menor se torna a importância da compressão secundária em presença da compressão primária. Esse aspecto também foi estudado por Vieira (1988) cujas curvas de adensamento obtidas em ensaios de longa duração na argila de Sarapuí mostraram que, para $\Delta\sigma / \sigma = 7$, no trecho normalmente adensado, a compressão secundária era desprezível se comparada à primária Fig. 2-27.

Quanto ao ajuste da expressão (2-9) aos dados experimentais, mostrados na Fig. 2-28 para os ensaios na mistura caulim e bentonita, observa-se que embora a expressão (2-9) seja

qualitativamente satisfatória, o ajuste não é bom, notadamente na parte final da curva de deformação x tempo. Este assunto será discutido com mais detalhe posteriormente.

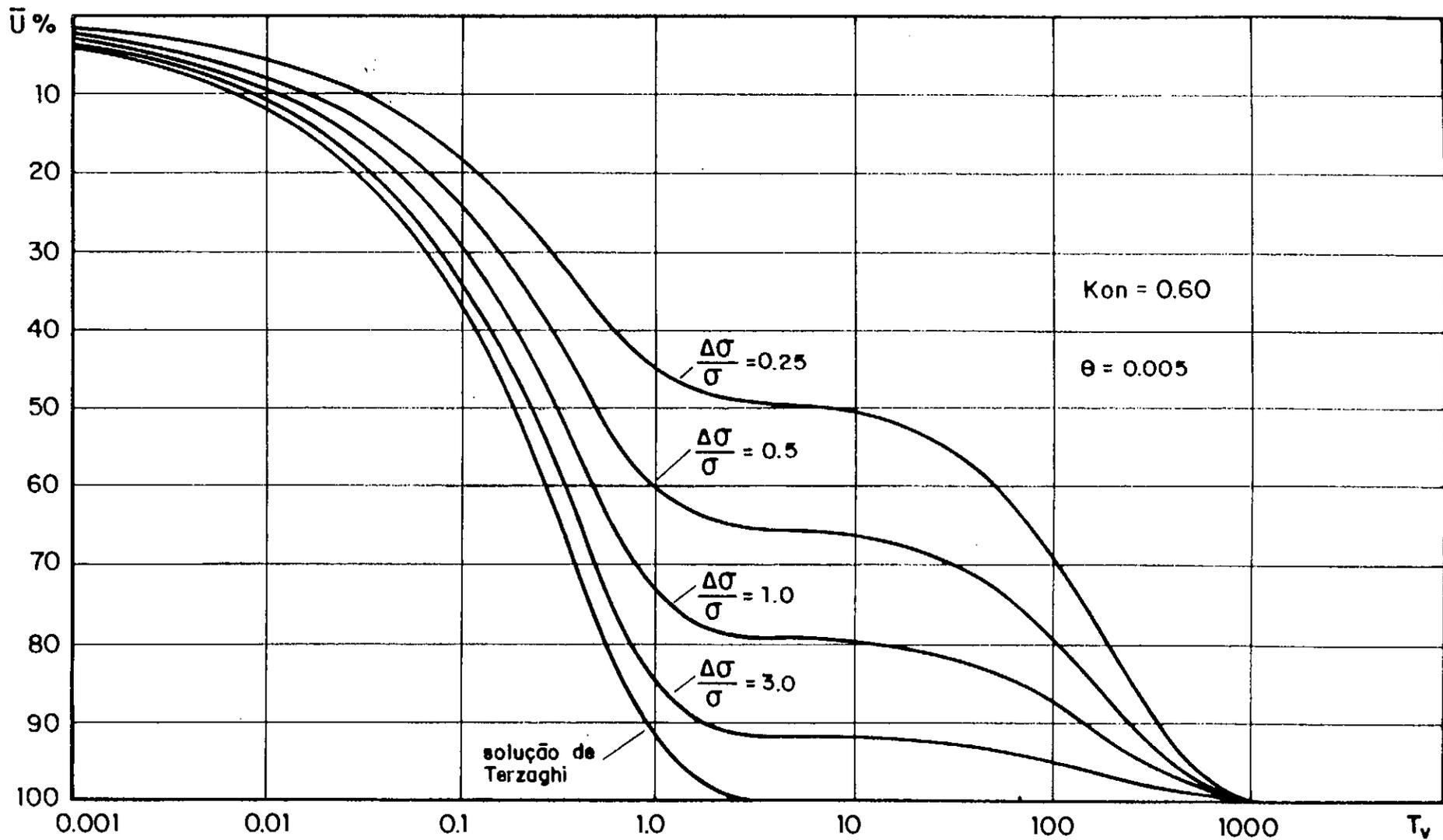


Fig. 2-24 - Curvas $\bar{U} \times T_v$ para diferentes $\Delta\sigma / \sigma$ e $K_{on} = 0.6$ e $\theta = 0.005$. Martins & Lacerda (1985)

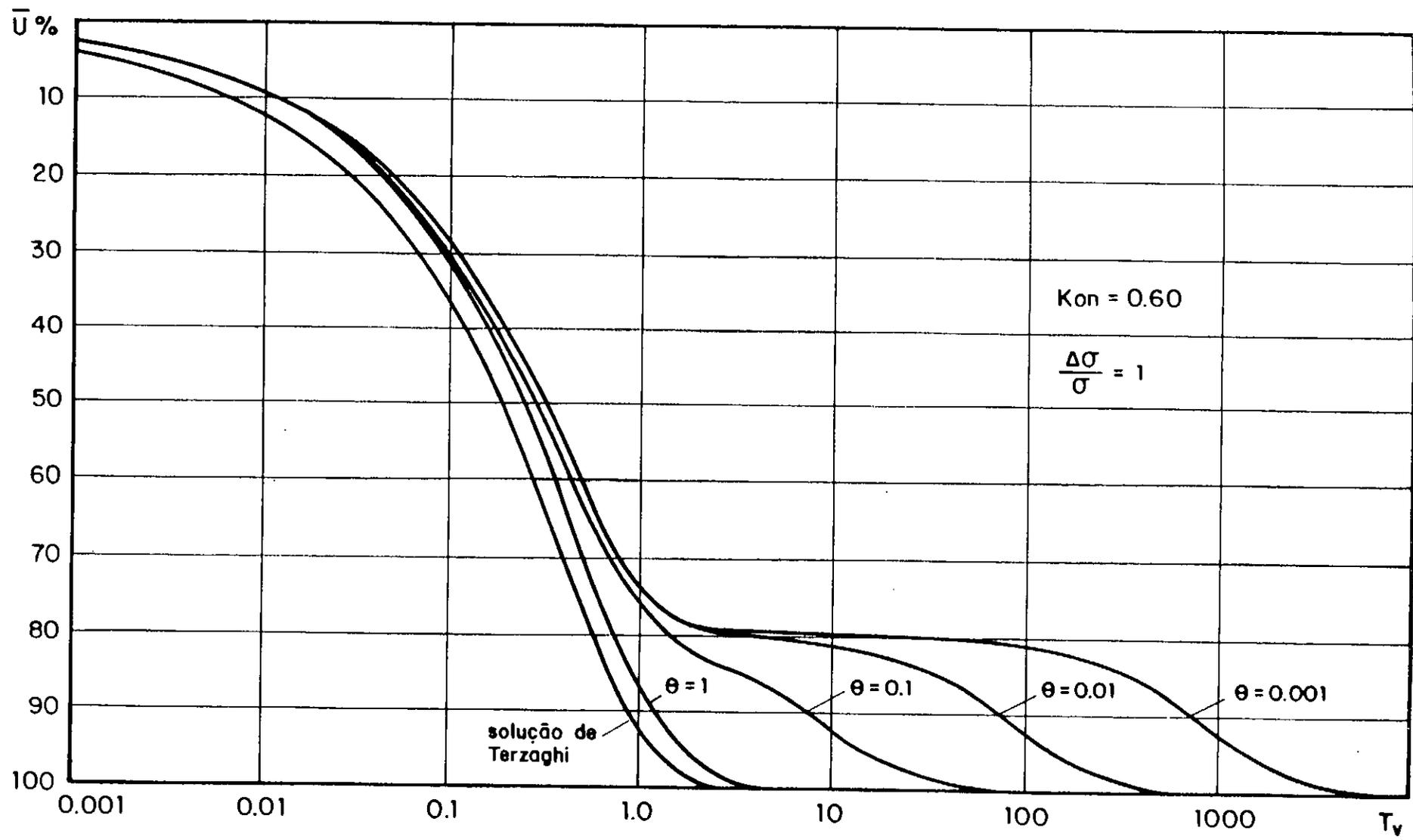


Fig. 2-25 - Curvas $U \times T_v$ para diferentes θ , $\Delta\sigma / \sigma = 1$ e $K_{on} = 0.6$. Martins & Lacerda (1985).

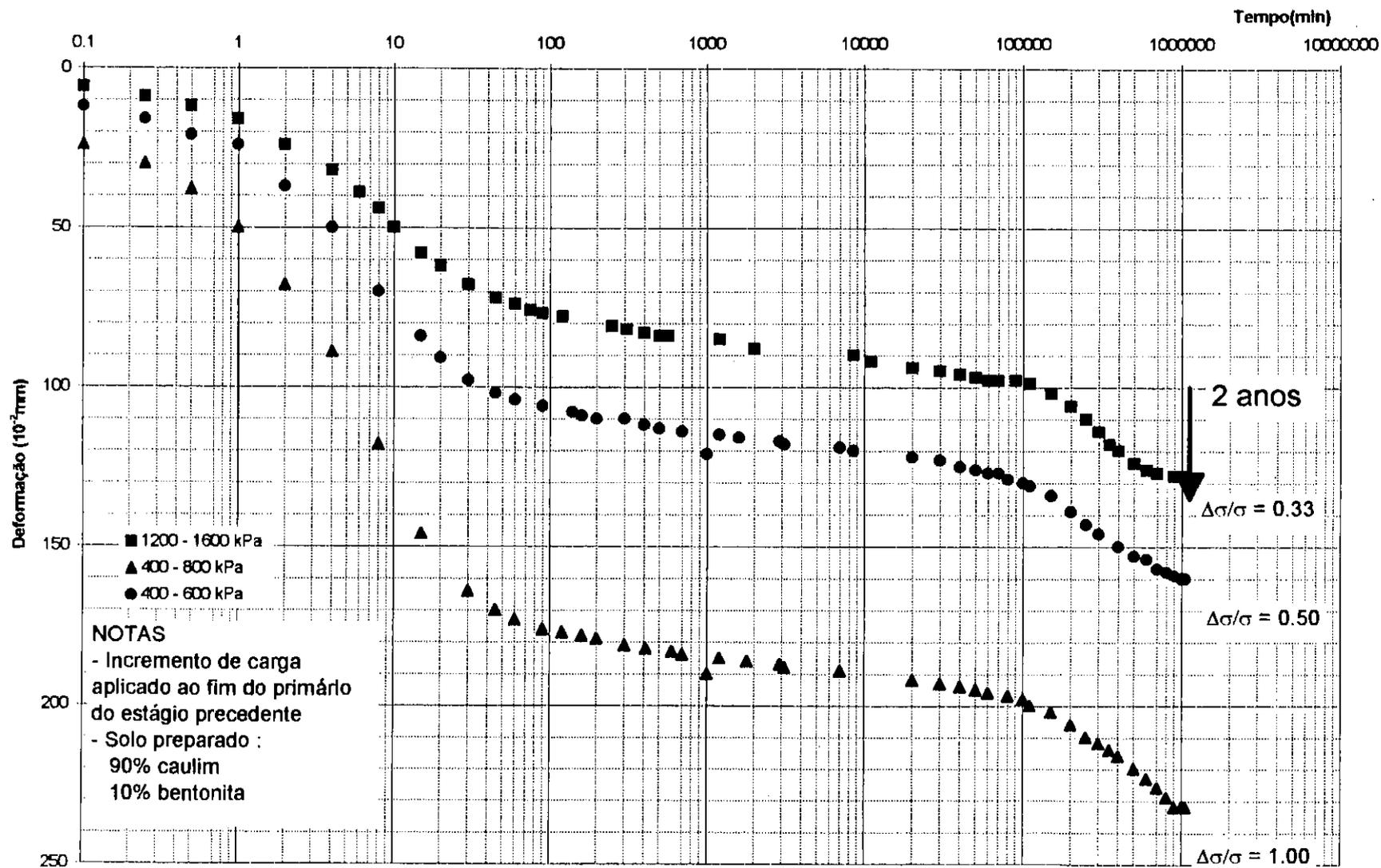


Fig. 2-26 - Ensaio edométricos de longa duração $\Delta\sigma/\sigma = 0.33, 0.5, 1.0$. Martins (1987)

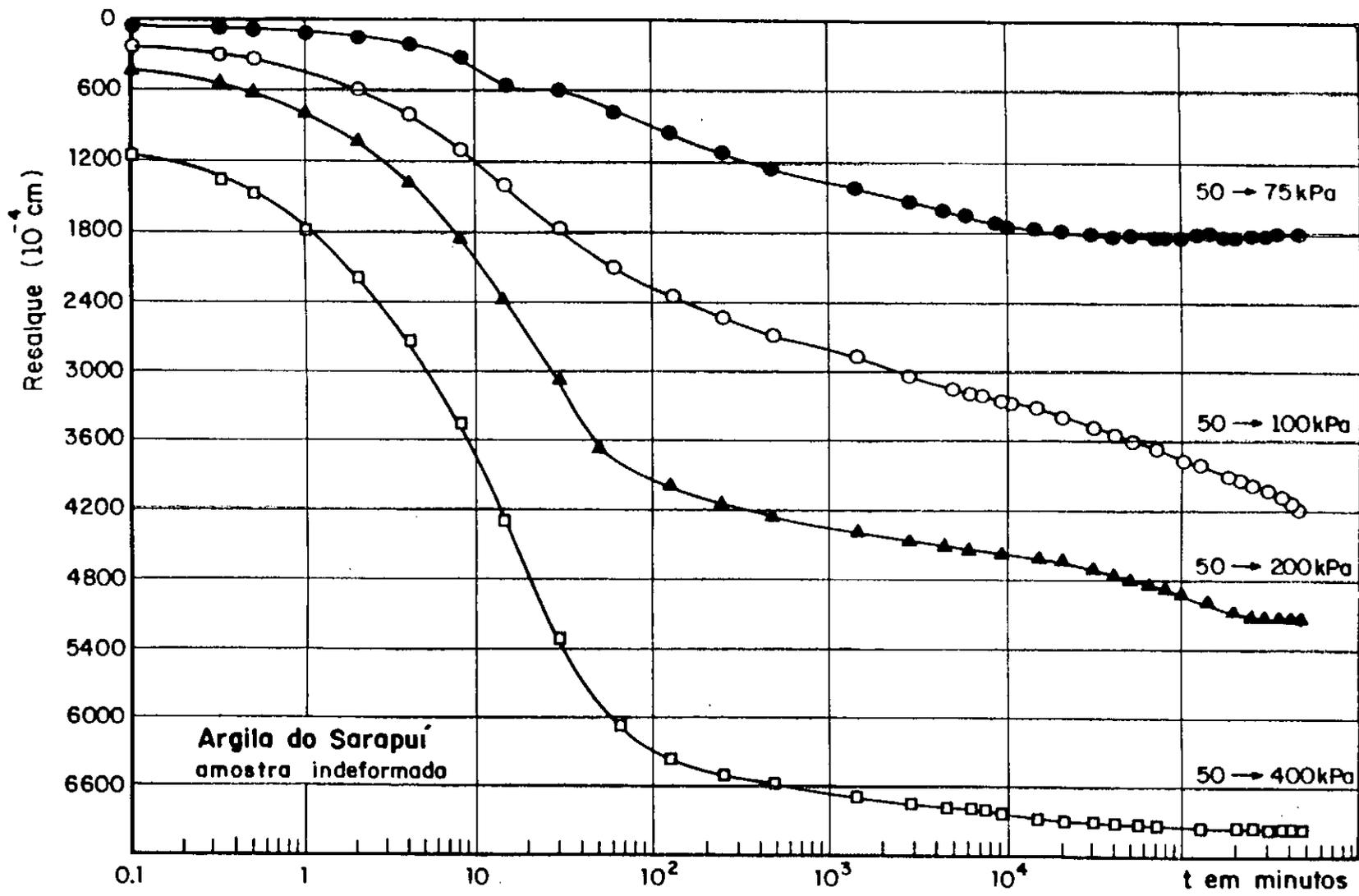


Fig. 2-27- Curvas deformação x tempo - ensaios edométricos de longa duração. Vieira (1988).

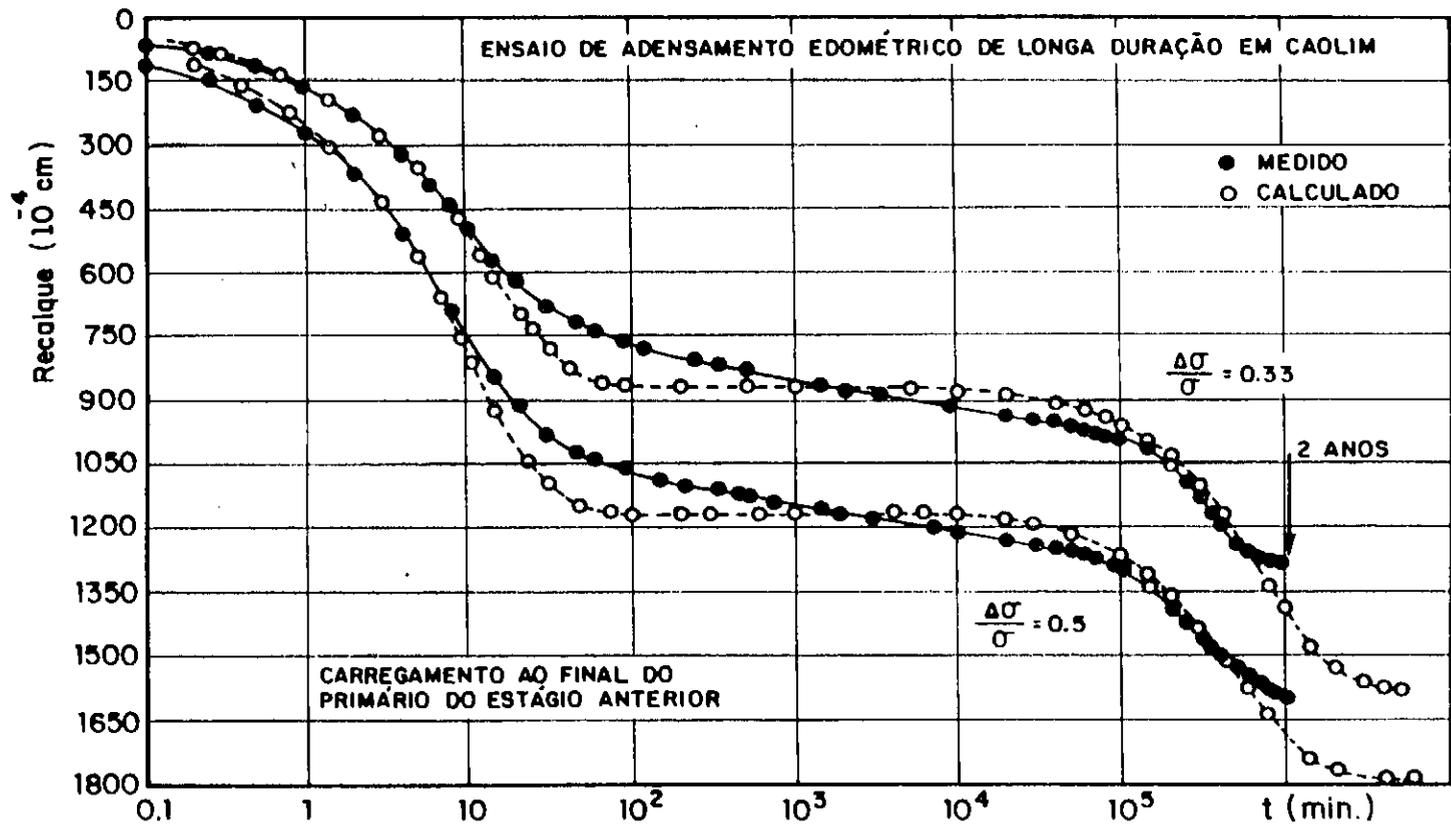


Fig. 2-28 - Curvas deformação x tempo para ensaios de longa duração. Martins (1987).

Um outro aspecto interessante que decorre do mecanismo concebido por Lacerda & Martins (1985) e que está intimamente ligado à existência da linha final do secundário é o efeito do descarregamento. Sabe-se que um descarregamento provoca um sobreadensamento. Esse sobreadensamento gera um aumento de K_0 . Sendo a velocidade de adensamento secundário, de acordo com Martins & Lacerda (1985), tanto menor quanto maior o valor de K_0 , deve-se esperar que todo o corpo de prova descarregado de um determinado índice de vazios e tensão vertical efetiva, acima da linha de fim do secundário (já contada a expansão primária), retorne à compressão secundária com uma velocidade correspondente à linha sobre a qual se encontra. Assim, observando-se a Fig. 2-29 deve-se esperar que as compressões secundárias nos pontos A, B, C, D e E reapareçam (após a expansão primária) respectivamente com as seguintes velocidades: $\dot{\epsilon}_A > \dot{\epsilon}_B > \dot{\epsilon}_C > \dot{\epsilon}_D > \dot{\epsilon}_E$, o que já havia sido observado por Johnson (1970). Esse aspecto também foi observado por Vieira (1988).

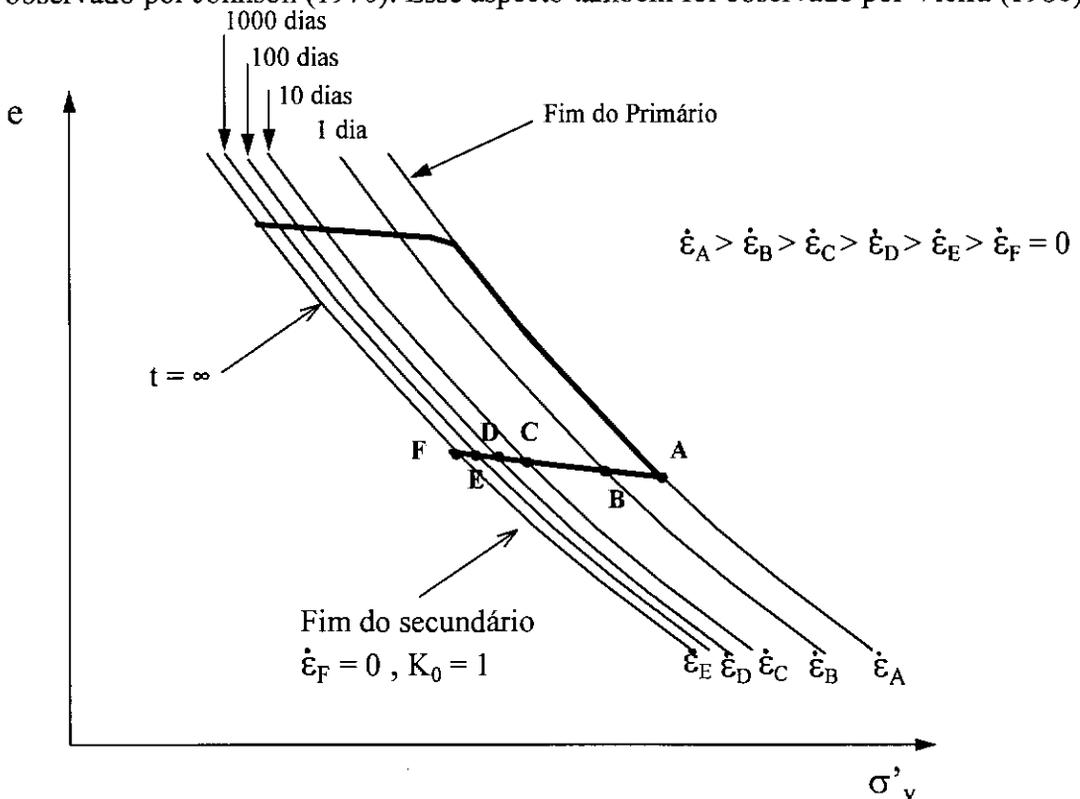


Fig. 2-29- Aparecimento da compressão secundária após descarregamento.

Baseado no comportamento esquematizado na Fig. 2-29 é de se esperar que exista um determinado descarregamento para o qual a compressão secundária retorne com velocidade zero ou não ocorra mais. De acordo com o mecanismo proposto por Martins & Lacerda (1985) este descarregamento é tal que conduz o solo ao ponto F da Fig. 2-29, ponto que estaria sobre a linha final do adensamento secundário e portanto com $K_0 = 1$.

Um outro aspecto do mecanismo proposto por Lacerda & Martins (1985) indica que se o fenômeno estiver de fato ligado à dissipação de tensões cisalhantes, como mostrado na Fig. 2-21, a partir de um determinado descarregamento onde o OCR forneça um valor de $K_0 > 1$, deve-se esperar, após a expansão primária, uma expansão secundária. Isto porque com $K_0 > 1$ o estado de tensões efetivas passa a ser representado pelo círculo de Mohr da Fig. 2-30, onde $\sigma'_h > \sigma'_v$. Como no ensaio edométrico, após a expansão primária ocorrida em função do descarregamento, σ'_v permanece constante, a dissipação das tensões cisalhantes, admitida como hipótese, só pode ocorrer com a diminuição de σ'_h . Neste caso o caminho de tensões seria GH como apresentado na Fig. 2-30. Nesse caso ocorreria a diminuição da σ'_{oct} provocando uma expansão secundária. Esta expansão secundária deveria ir diminuindo de velocidade à medida que σ'_h fosse decrescendo até cessar quando $\sigma'_h = \sigma'_v$ ou $K_0 = 1$.

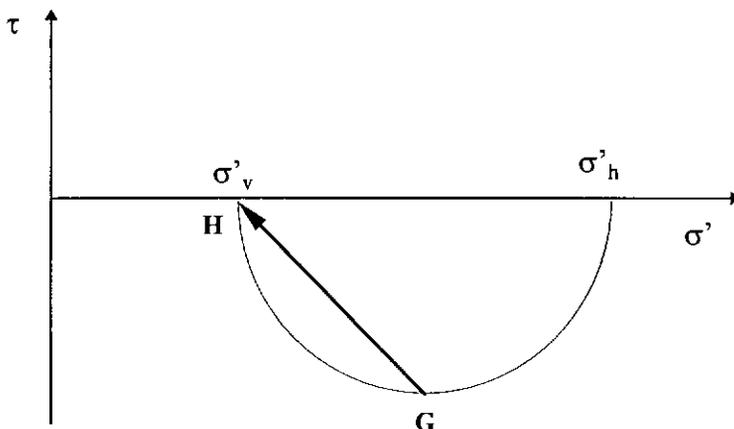


Fig. 2-30 - Círculo de Mohr para expansão secundária.

Independente da questão do final do secundário coincidir com a condição $K_0 = 1$, o fato é que Vieira (1988) mostrou que para valores altos de OCR, a expansão secundária se verificou, como indicado na Fig. 2-31. Além disso pode-se constatar que a velocidade de expansão secundária era tão mais elevada quanto maior fosse o valor de OCR.

Com isto imaginava-se que a relação e x σ'_v levando-se em consideração o problema do adensamento secundário pudesse ser representada como na Fig. 2-32. Sendo a linha de fim de secundário (correspondente a $K_0 = 1$) a divisão entre uma faixa de compressão secundária e uma faixa de expansão secundária. Além disso a velocidade de compressão ou expansão secundárias seria proporcional à distância vertical do ponto (e, σ'_v) à linha de fim do secundário, de acordo com esse mecanismo, apresentaria velocidade de deformação zero.

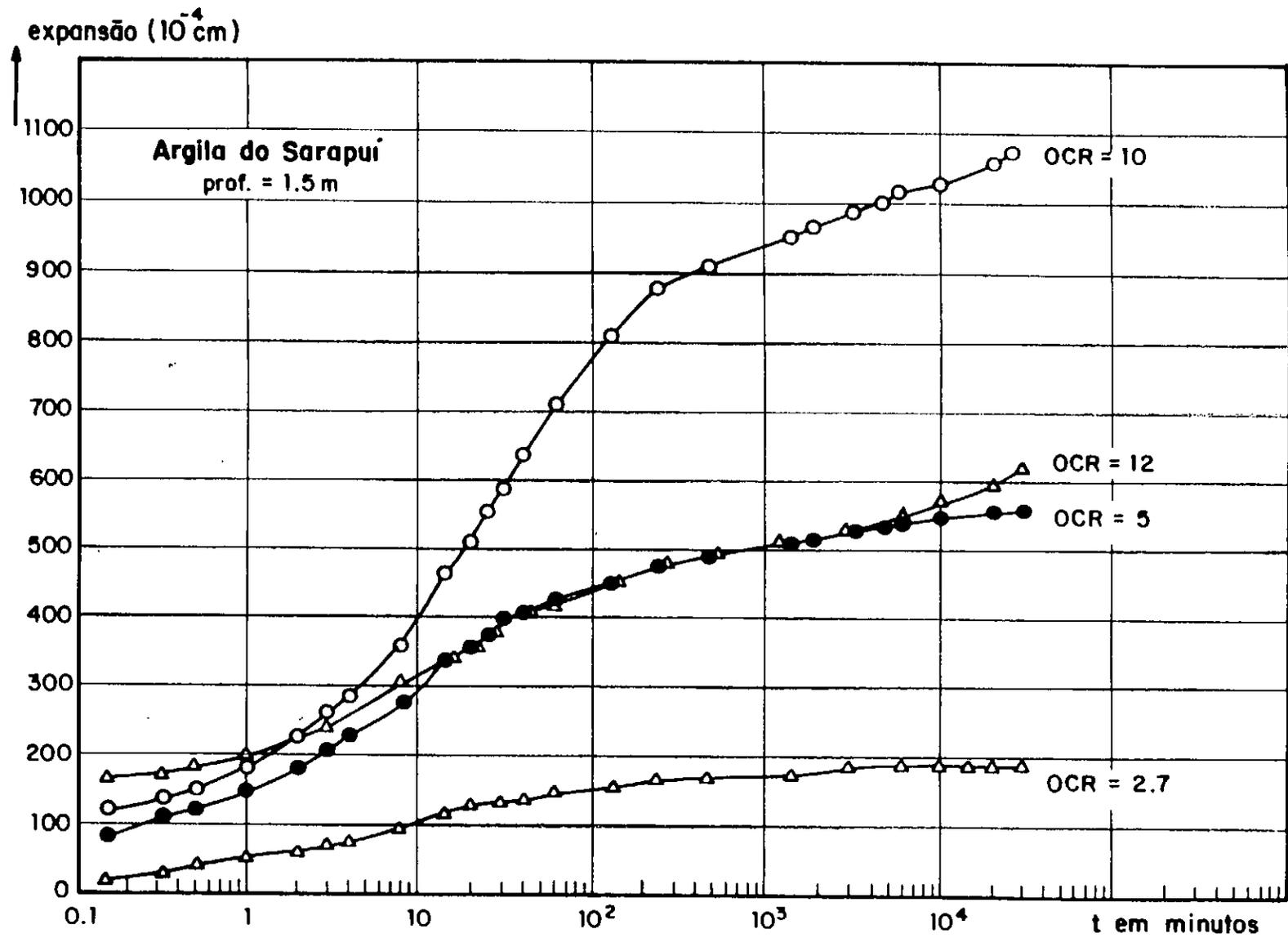


Fig. 2-31- Expansão secundária de amostras com diferentes valores de OCR - Argila de Sarapuí - Vieira (1988).

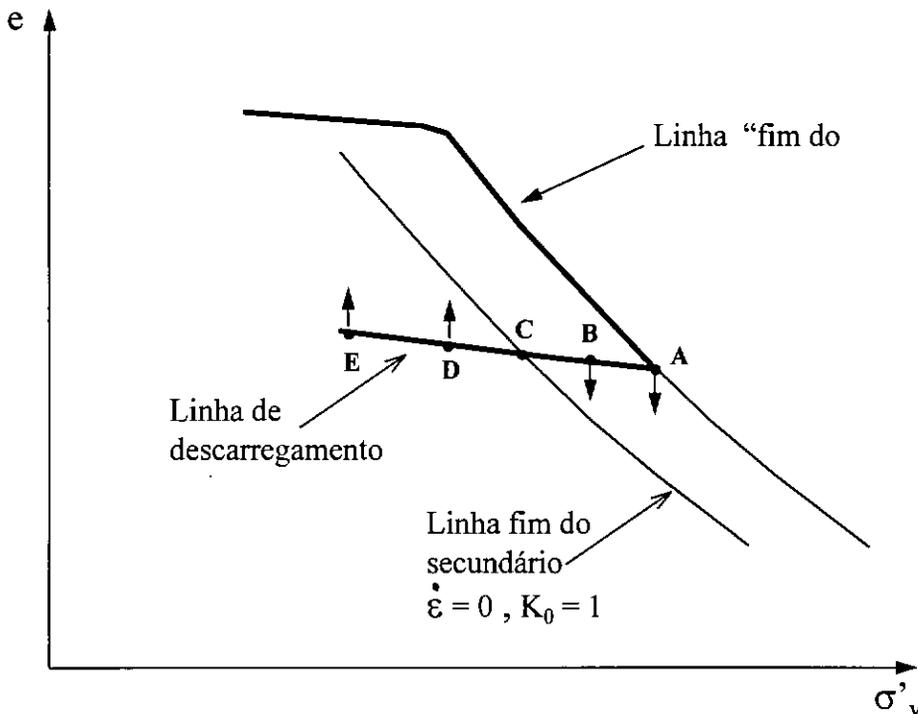


Fig. 2-32 - Representação da linha do fim do secundário correspondente a $K_0 = 1$.

Assim sendo, os pontos A e B da Fig. 2-32 apresentariam compressão secundária com $\dot{\epsilon}_A > \dot{\epsilon}_B$ e os pontos D e E apresentariam expansão secundária com $\dot{\epsilon}_E > \dot{\epsilon}_D$, sendo $\dot{\epsilon}_c = 0$.

Para estudar com mais detalhe o comportamento retratado pela Fig. 2-32, Feijó (1991) realizou 6 ensaios edométricos de longa duração, sob temperatura controlada, em amostras indeformadas da argila de Sarapuí.

Os ensaios foram feitos de tal forma que se pudesse observar o comportamento dos corpos de prova submetidos a diferentes valores de OCR sob uma tensão vertical efetiva fixa. Assim os 6 corpos de prova foram submetidos às tensões verticais efetivas de 150, 200, 400, 600, 800 e 1200 kPa apenas o tempo suficiente para que fosse alcançado o fim do primário (determinado pelo método de Taylor). Tão logo isto ocorreu, os corpos de prova foram descarregados para 100 kPa gerando-se OCRs de 1.5, 2, 4, 6, 8 e 12 em que se observaram as deformações durante 200 dias. Os resultados estão mostrados nas Fig. 2-33 e Fig. 2-34.

Para analisar os resultados das Fig. 2-33 e Fig. 2-34 com base no mecanismo proposto por Lacerda & Martins (1985) é necessário conhecer os valores de K_0 gerados pelo descarregamento. Como o valor de K_0 não foi medido tomou-se para sua estimativa a expressão de Mayne e Kulhawy (1982).

$$K_0 = (1 - \text{sen} \phi') \text{OCR}^{\text{sen} \phi}$$

$$\text{Para a argila de Sarapuí } \phi' = 25^\circ \text{ e } K_0 = 0.577 \text{OCR}^{0.423}$$

Com essa expressão os valores de K_0 estimados para os ensaios em questão imediatamente após o descarregamento estão apresentados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 - Condição dos corpos de prova após o descarregamento. Feijó (1991).

| CORPOS DE PROVA | σ'_{vm} (kPa) | σ'_v (kPa) | OCR | K_0 (estimado) |
|-----------------|-------------------------|----------------------|------|---------------------|
| 2CP1 | 150 | 100 | 1.5 | 0.69 |
| 2CP2 | 200 | 100 | 2.0 | 0.77 |
| 2CP3 | 400 | 100 | 4.0 | 1.04 |
| 2CP4 | 600 | 100 | 6.0 | 1.23 |
| 2CP5 | 800 | 100 | 8.0 | 1.39 |
| 2CP6 | 1200 | 100 | 12.0 | 1.65 |

Mesmo que os valores de K_0 da Tabela 2-2 não sejam acurados, eles servem como valores indicativos dos comportamentos em termos de tendência.

De acordo com o mecanismo exposto anteriormente deveriam ser observadas compressões secundárias para todos os corpos de prova que apresentassem $K_0 < 1$ e expansões secundárias para aqueles que apresentassem $K_0 > 1$. Para o corpo de prova 2CP3 que apresenta K_0 aproximadamente igual a 1 não se deveria esperar nem compressão secundária nem expansão secundária.

Quanto às velocidades de deformação, o mecanismo prevê que quanto mais afastados os corpos de prova estiverem da condição $K_0 = 1$ maiores serão as velocidades de compressão secundária (se $K_0 < 1$) e maiores as velocidades de expansão secundária (se $K_0 > 1$).

Analisando-se as Fig. 2-33 e Fig. 2-34 observa-se claramente que os corpos de prova com OCR = 1.5 e 2.0 com valores de K_0 de 0.69 e 0.77, após sofrerem uma expansão primária, tornaram a comprimir. Observa-se também que a velocidade de compressão secundária do corpo de prova 2CP1 é significativamente maior que a do corpo de prova 2CP2, que apresenta uma velocidade de compressão baixa porém claramente perceptível, tornando-se nula ao final do período de observação.

O corpo de prova 2CP3, cujo valor de K_0 foi estimado em 1.04, passada a expansão primária, não apresentou variação de volume. Assim este corpo de prova também se comporta, a exemplo dos dois anteriores, de acordo com o mecanismo exposto.

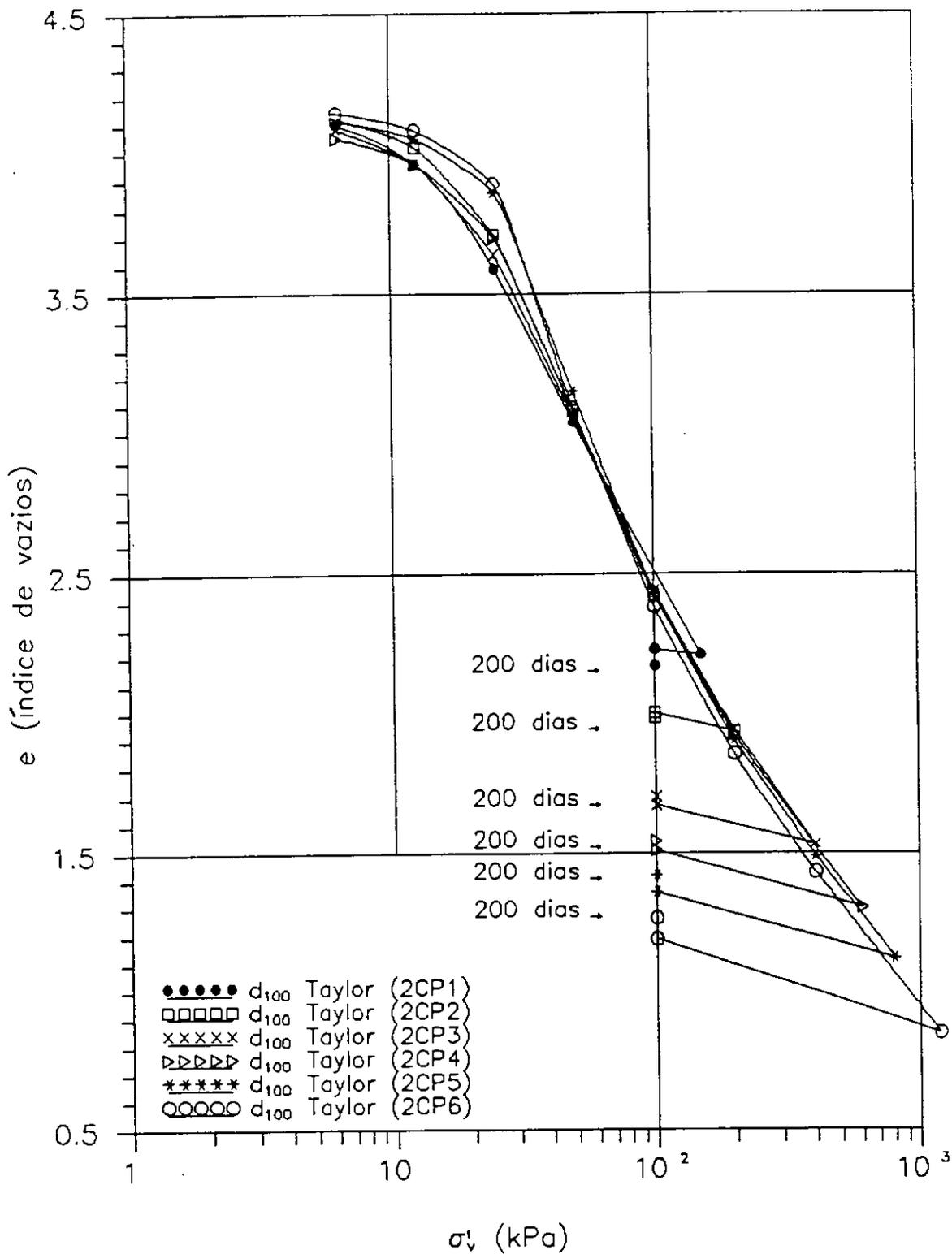


Fig. 2-33 - e x $\log \sigma'_v$ - segunda bateria de ensaios - Feijó (1993).

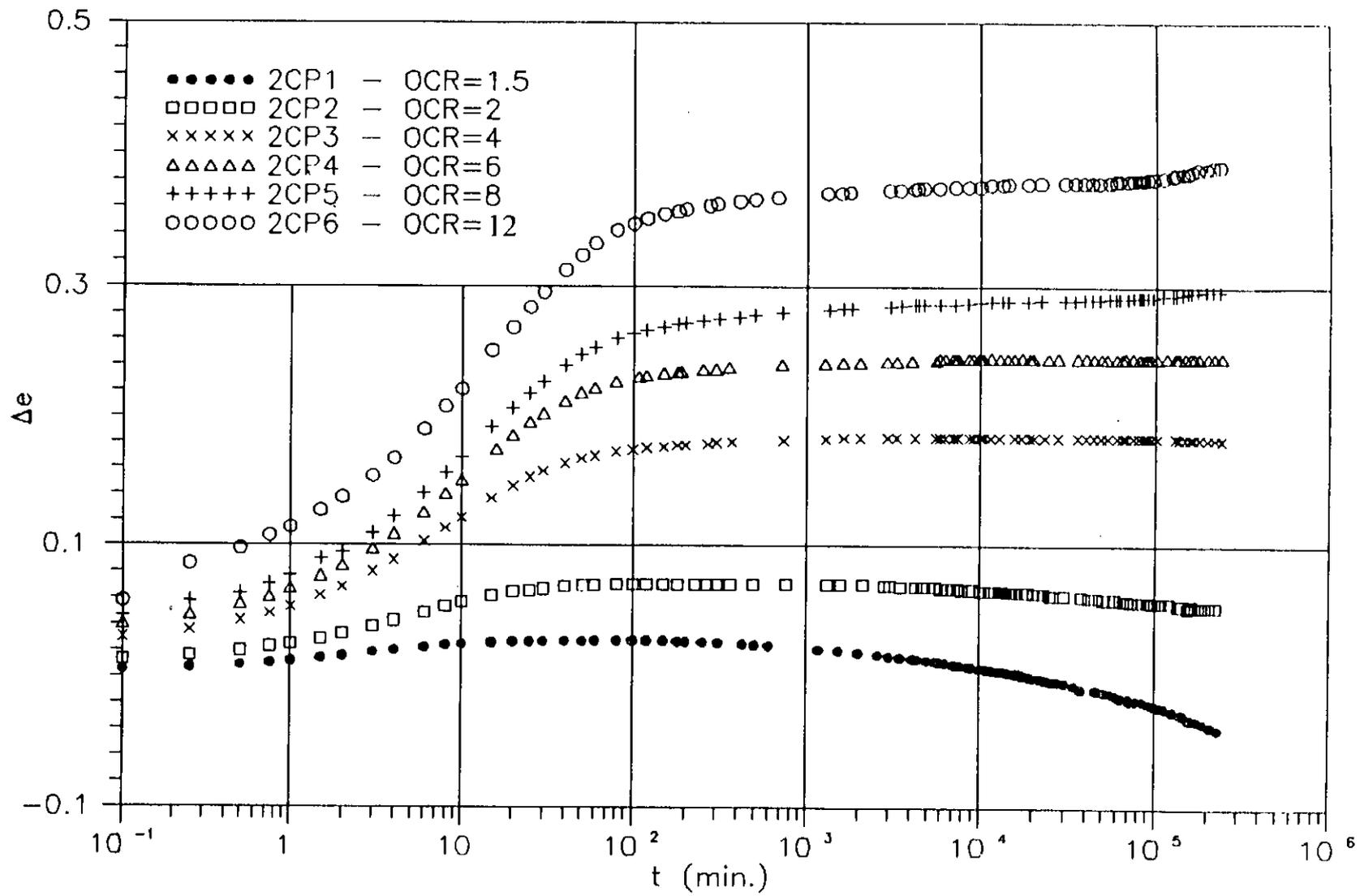


Fig. 2-34 - Variação do índice de vazios x tempo - segunda bateria de ensaios. Feijó (1993).

Os corpos de prova 2CP5 e 2CP6 cujos valores de K_0 foram estimados respectivamente em 1.39 e 1.65 mostraram expansão secundária após a expansão primária. Além disso, a velocidade de expansão do corpo de prova 2CP6 é significativamente maior que a do corpo de prova 2CP5. Assim estes corpos de prova também se comportam de acordo com o mecanismo descrito.

O corpo de prova 2CP4, com K_0 estimado em 1.23, deveria apresentar, após a expansão primária, de acordo com o mecanismo, uma expansão secundária. Entretanto o que se observou foi uma expansão, após 200 dias de ensaio de apenas 0.03%.

Baseado nos resultados experimentais, Feijó (1991) pode concluir que dentro da faixa de $2 < OCR < 6$ ($0.77 < K_0 < 1.23$) não havia, para a argila de Sarapuí, nem compressão nem expansão secundárias.

Os resultados experimentais sugerem a existência de uma região no gráfico $q' \times p'$, limitada pelas retas $K_0 = 0.77$ e $K_0 = 1.23$, simétricas em relação ao eixo p' , para a qual existe um equilíbrio indiferente (Fig. 2-35) em termos de deformações secundárias. Assim sendo, o valor de K_0 , ao invés de tender a 1, conforme proposto por Lacerda e Martins (1985), tenderia para estes valores que definem uma faixa de equilíbrio indiferente, conforme indicado nas Fig. 2-35 e Fig. 2-36., para a argila de Sarapuí.

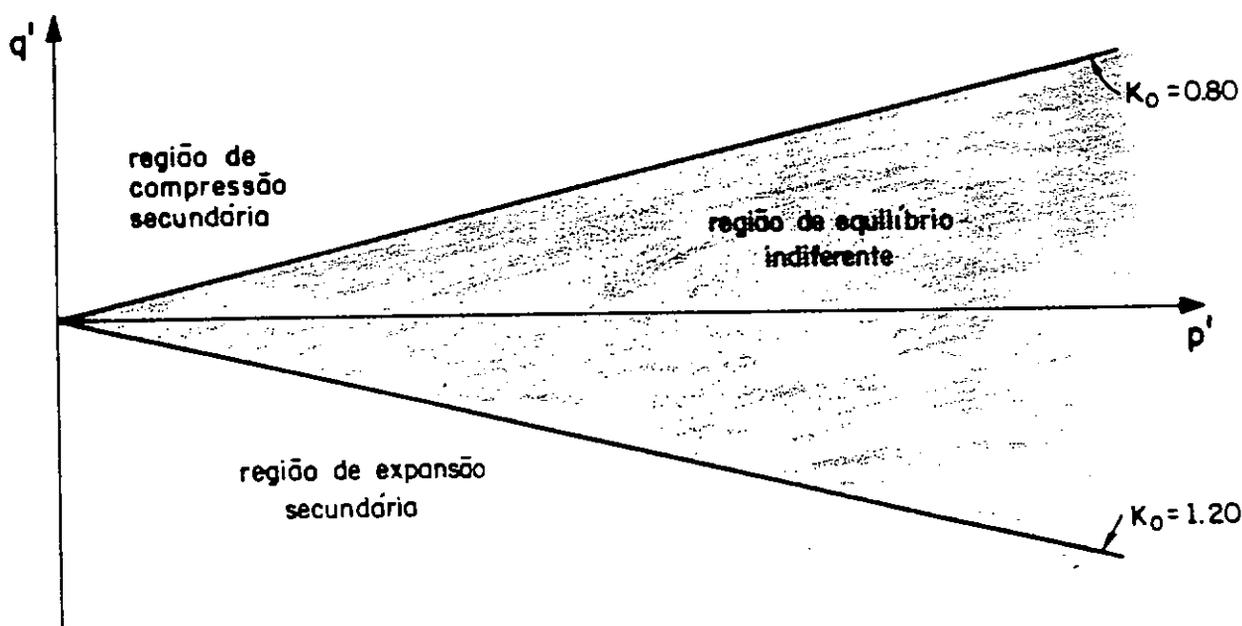


Fig. 2-35 - Região do plano $q' \times p'$ onde o equilíbrio é indiferente. Feijó (1991).

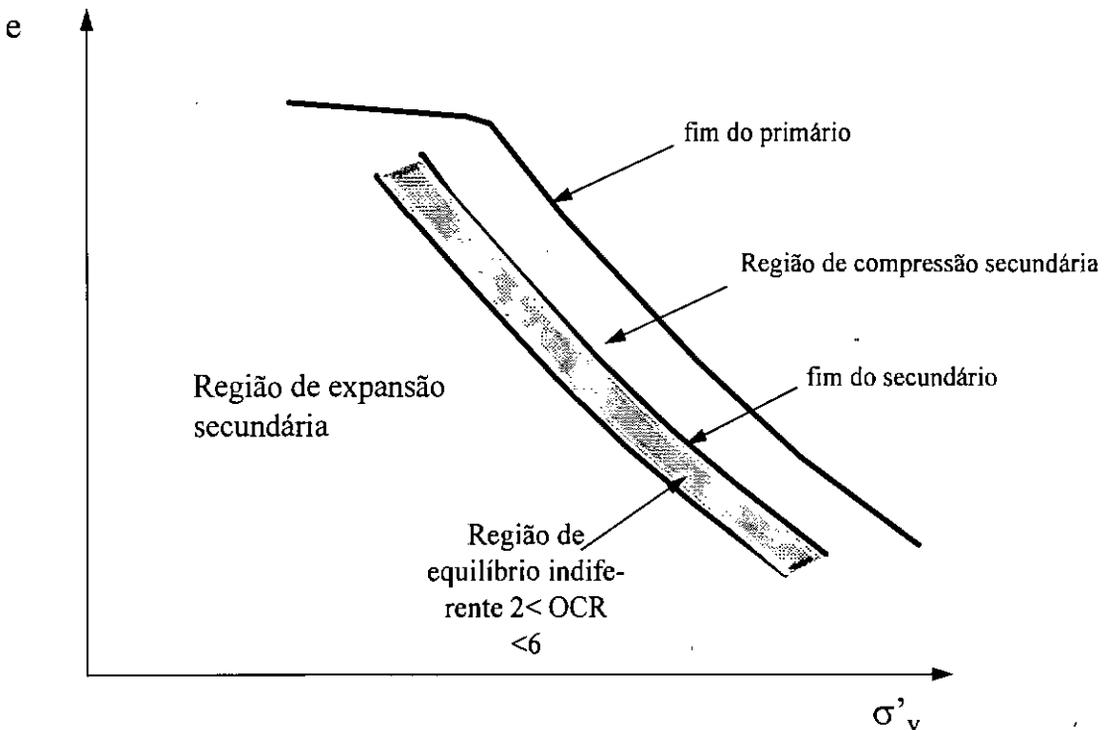


Fig. 2-36- Região de equilíbrio indiferente - argila de Sarapuí.

Com os resultados experimentais apresentados por Feijó (1991), mostrou-se que para $2 < OCR < 6$ não havia nem expansão nem compressão secundária. Entretanto, não se conseguiu, de fato, mostrar a variação K_0 (ou a dissipação das tensões cisalhantes) com o tempo como um fenômeno associado ao adensamento secundário. Por outro lado, os resultados experimentais sugerem que a resistência ao cisalhamento do solo seja composta de duas parcelas : uma de atrito função da tensão normal efetiva e outra da viscosidade dependente do índice de vazios e da velocidade de deformação.

Este conceito, apresentado por Taylor (1942) para o adensamento unidimensional e estendido por Martins (1992) para estados de tensão axisimétricos, permitem concluir que no adensamento secundário, como a velocidade de deformação vai diminuindo com o tempo, vai também crescendo a resistência viscosa o que faz com que o solo se torne menos resistente à compressão. Esse decréscimo de resistência, que se manifesta através da diminuição das tensões cisalhantes, e que faz com que σ'_{11} aumente na compressão secundária, continua até que a velocidade de deformação seja nula, momento no qual a parcela das tensões cisalhantes devida à viscosidade desaparece, restando apenas a resistência por atrito. Sob essas condições o adensamento secundário cessa e não se observam mais deformações com o tempo.

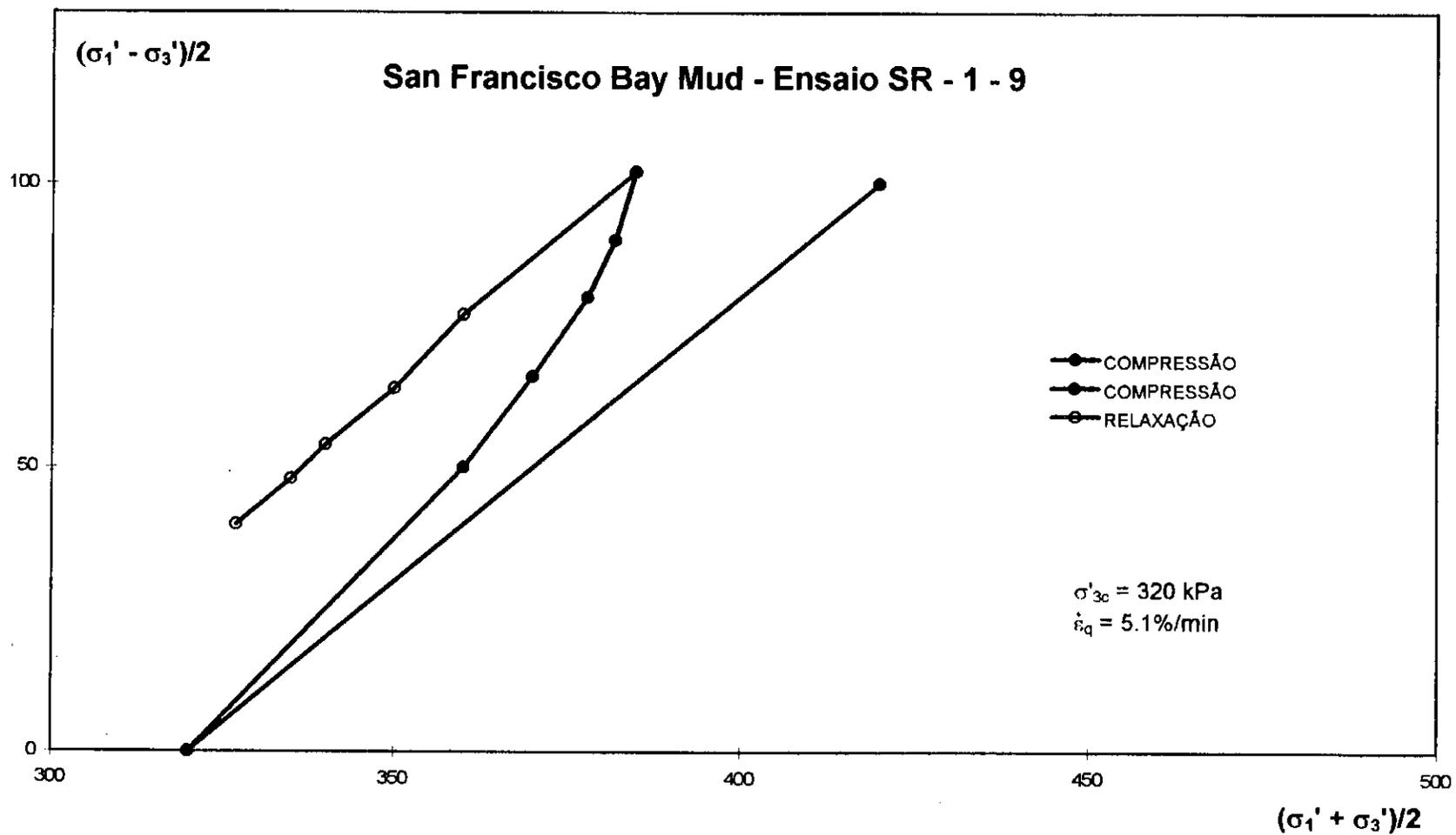
De acordo com o exposto acima, o fenômeno da resistência viscosa deve ocorrer independentemente das condições de drenagem e portanto deve estar presente em ensaios não drenados. Isto faz com que haja uma maneira indireta de reforçar a idéia de que o fenômeno do adensamento secundário se dá com a dissipação das tensões cisalhantes e conseqüente aumento de K_0 .

Lacerda (1977) mostra que em ensaios não-drenados de relaxação de tensões (ensaio CIU em que a prensa é desligada antes que o corpo de prova atinja a ruptura) a σ'_v decresce com o tempo ao passo que a σ'_h e a poro-pressão permanecem constante (Fig. 2-37). É interessante notar que neste ensaio, durante a relaxação o corpo de prova não sofre variação de volume (ensaio não drenado) e nem distorção (deformação vertical nula), fazendo com que a deformação horizontal seja nula.

Em vista do observado na Fig. 2-37, Lima (1993) realizou ensaio de relaxação durante um estágio de adensamento unidimensional na argila Sarapuú. Para isto foi utilizado o equipamento empregado em ensaios CRSC descrito por Carvalho (1989). O procedimento do ensaio era o seguinte: o corpo de prova era submetido à contrapressão em estágios de 25kPa até 100kPa. Verificada a saturação do corpo de prova por intermédio do valor do parâmetro B, a tensão vertical era aplicada via pote de mercúrio e registrado o excesso de poro-pressão inicial, seguido da abertura da drenagem.

Durante o adensamento registravam-se as poro-pressões e as deformações. O gráfico deformação $\times \sqrt{t}$ era plotado simultaneamente à evolução das deformações para que se determinasse com antecedência o fim do primário através do d_{100} do método de Taylor. Quando o extensômetro vertical atingia o fim do primário, fazia-se uma leitura do excesso de poro-pressão remanescente, (que nunca excedeu 2 kPa) e fechava-se a drenagem observando-se daí por diante o excesso de poro-pressão.

O comportamento típico da poro-pressão após o fechamento da drenagem está apresentado na Fig. 2-38 onde se observa um crescimento considerável de seu valor. Esse fenômeno está de acordo com os resultados dos ensaios de relaxação de Lacerda (1977) e pode ser facilmente explicado pelo mecanismo proposto por Lacerda & Martins (1985) e Martins (1992).



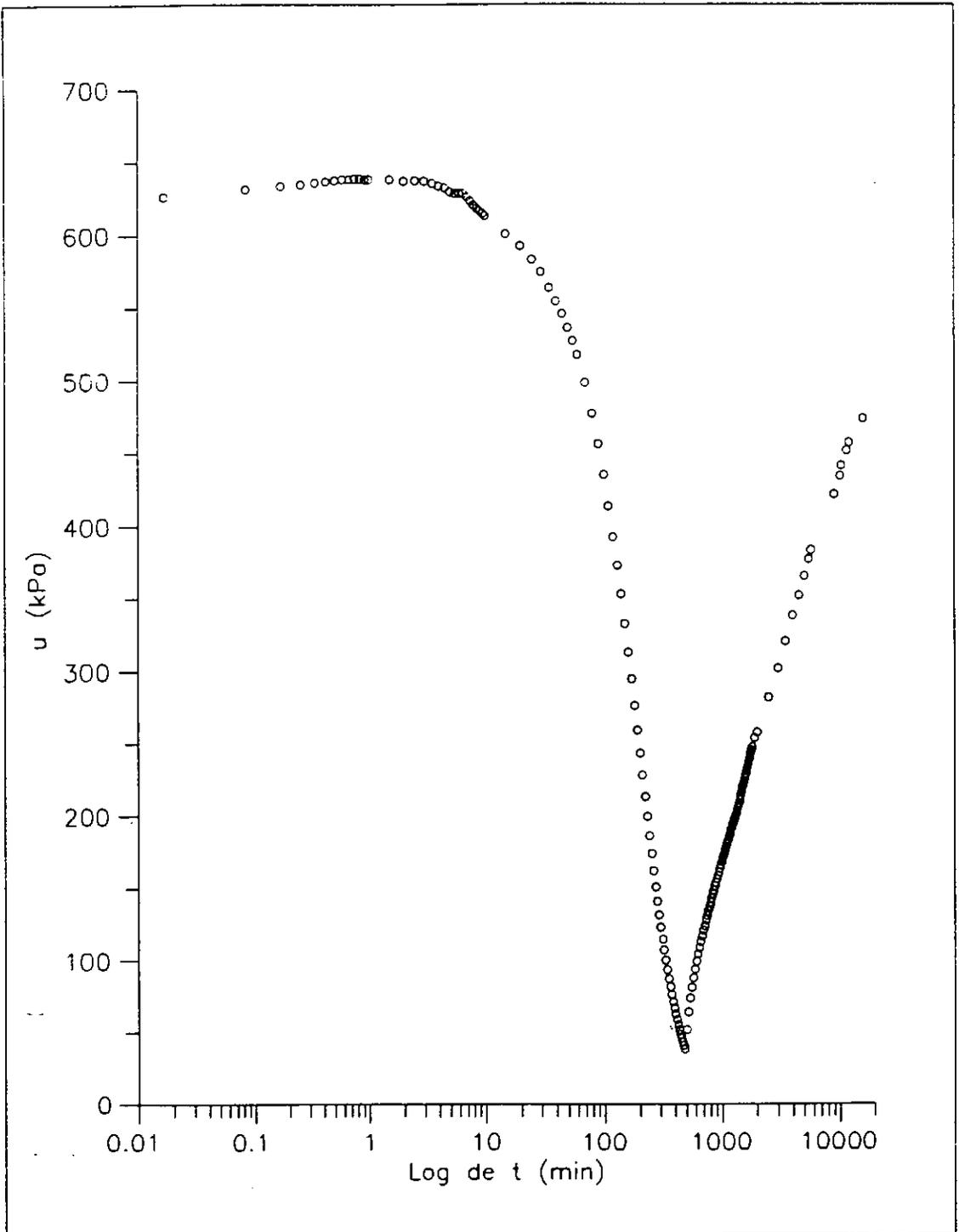


Fig. 2-38 - Comportamento das poro-pressões para o estágio de 100 para 800 kPa (ensaio 09).
Lima (1993).

Após o fechamento da drenagem no ensaio de adensamento, o corpo de prova não pode sofrer nem variação de volume e nem distorção. Além disso o corpo de prova está submetido a uma tensão vertical total constante (aplicada pelo pote de mercúrio). Admitindo-se que haja relaxação de tensões como ocorreu nos ensaios de Lacerda (1977), ou como prevê o mecanismo proposto por Lacerda & Martins (1985) o caminho de tensões efetivas é AB, indicado na Fig. 2-39, e o caminho de tensões totais AC (necessariamente uma vez que σ_v é constante).

Como consequência, à medida em que o corpo de prova segue os caminhos de tensões AC e AB da Fig. 2-39, σ'_h e σ'_v permanecem constantes ao passo que σ'_v diminui e σ'_h e a poro-pressão aumentam. De acordo com o discutido por Feijó (1991) a relaxação deve terminar quando a relação $\sigma'_h / \sigma'_v = K_0$ limite, que para a argila de Sarapuú deve ser da ordem de 0.8.

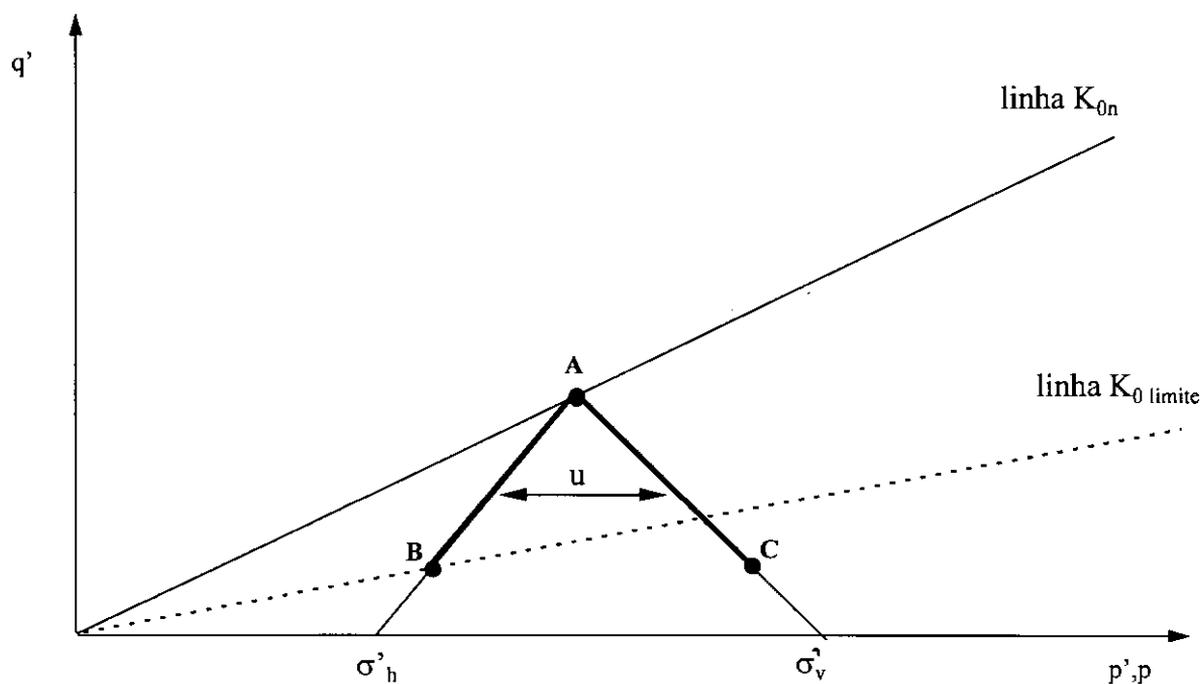


Fig. 2-39 - Caminhos de tensões na relaxação de um corpo de prova normalmente adensado do edômetro. Lima (1993).

No gráfico e $x \log \sigma'_v$, como o processo é não drenado e a tensão σ'_v diminui com o tempo, há um caminho horizontal a ser seguido no tempo da direita para a esquerda conforme indicado na Fig. 2-40. Espera-se que este caminho termine na linha de fim do secundário, com o $K_0 = K_0$ limite. Nesta linha, correspondente à $\dot{\epsilon} = 0$, as tensões cisalhantes correspondem somente a resistência por atrito conforme exposto por Martins (1992). Uma

série de ensaios de relaxação no edômetro se encontra em curso na COPPE para estudar em detalhe este fenômeno.

Finalmente, em função das evidências experimentais de que K_0 tende a valores menores que 1 ao final do adensamento secundário, pode-se modificar a expressão (2-9) para:

$$\bar{U}(T) = \frac{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) \left[1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T)\right]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) + \frac{2}{3}(K_{0L} - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3}(K_{0L} - K_{0n}) [1 - \exp(-\theta T)]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1\right) + \frac{2}{3}(K_{0L} - K_{0n})} \quad (2-10)$$

onde K_{0L} é o K_0 limite e os demais termos são os mesmos apresentados em (2-9).

Os ajustes da expressão (2-10) aos dados experimentais da Fig. 2-26 dos ensaios executados por Martins (1987) estão apresentados nas Fig. 2-41, Fig. 2-42 e Fig. 2-43.

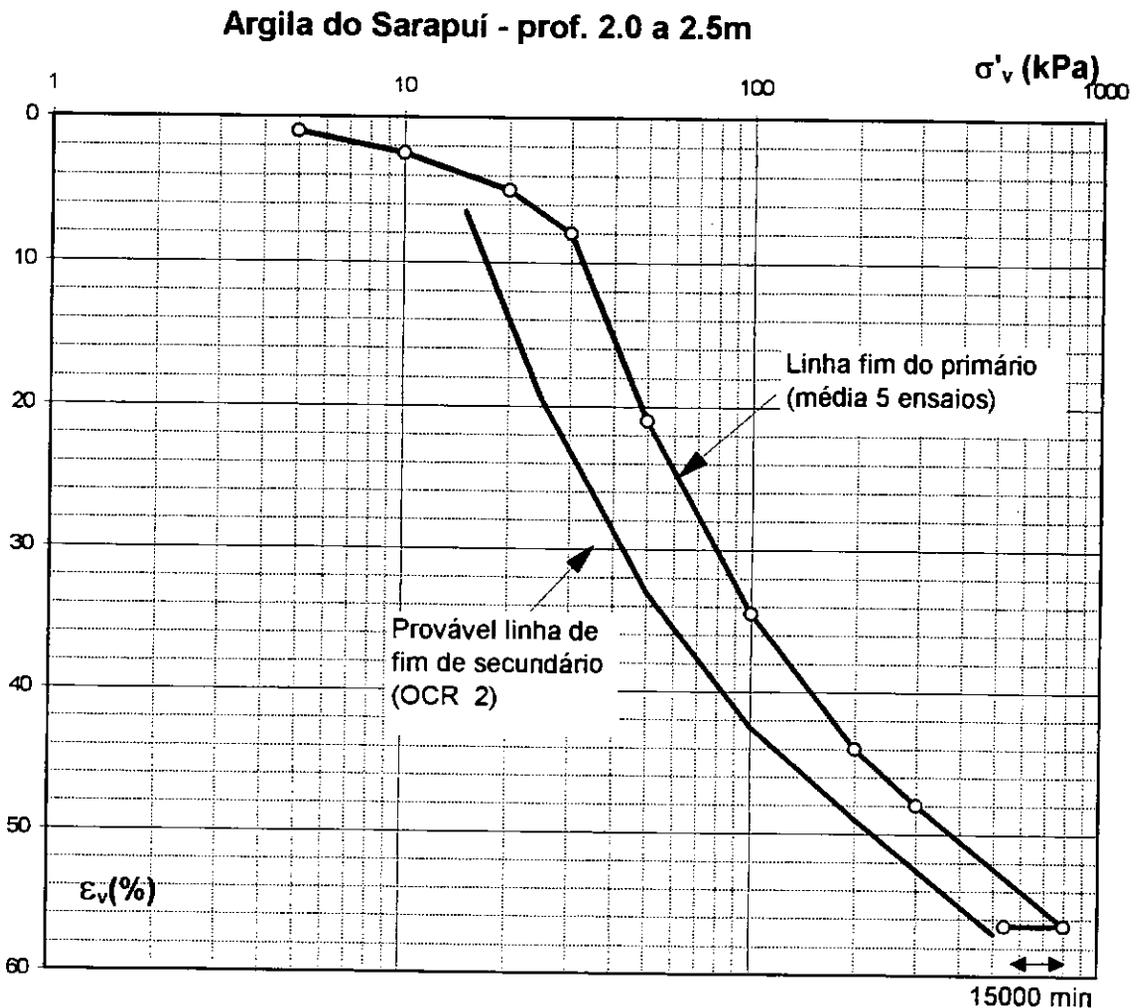


Fig. 2-40- Linha provável de fim do secundário da argila de Sarapuí. Lima (1993).

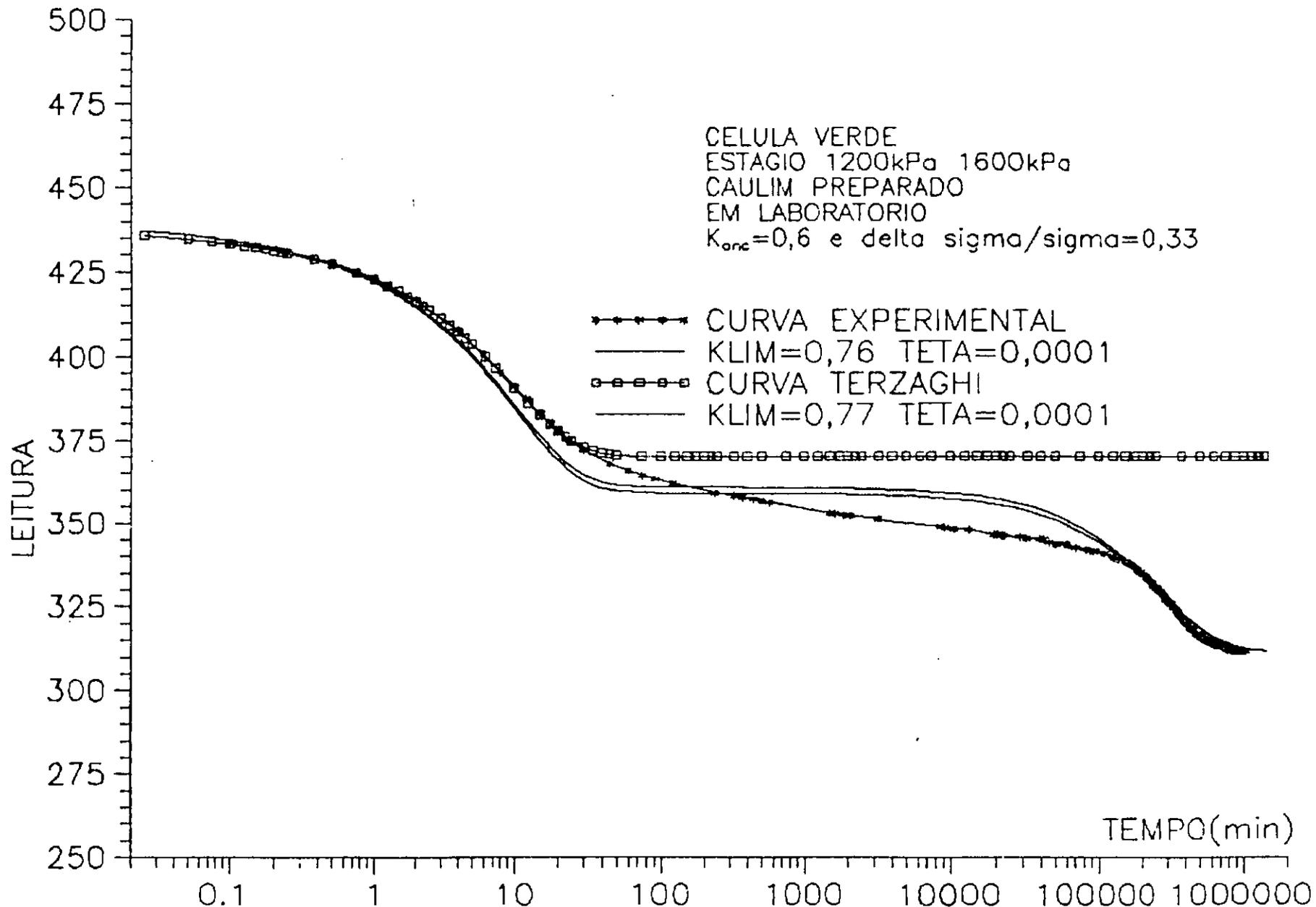


Fig. 2-41 - Comparação das curvas deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 1200 -1600 kPa - Martins & Lacerda (1985).

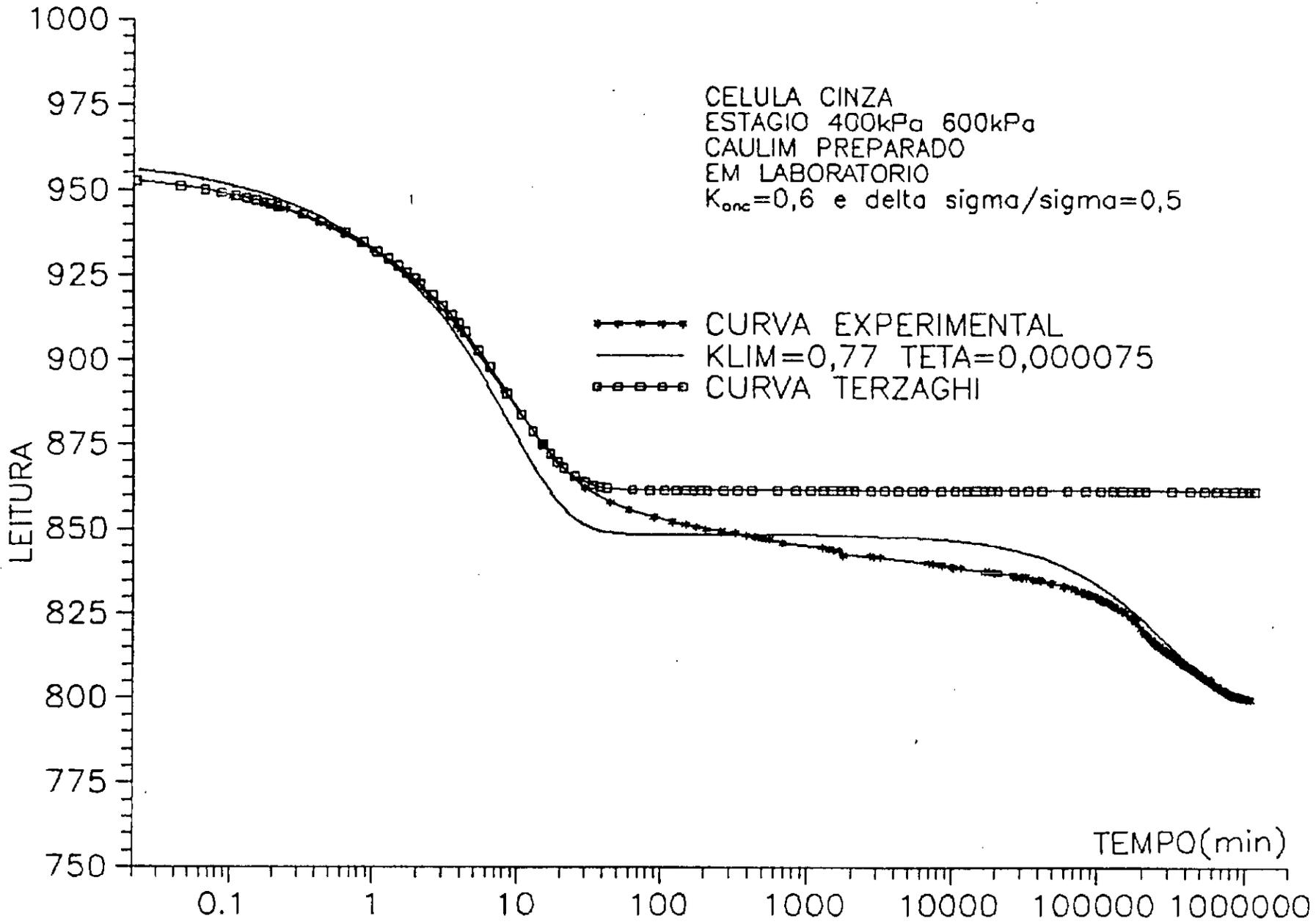


Fig. 2-42 - Comparação das curvas deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 400 -600 kPa - Martins & Lacerda (1985).

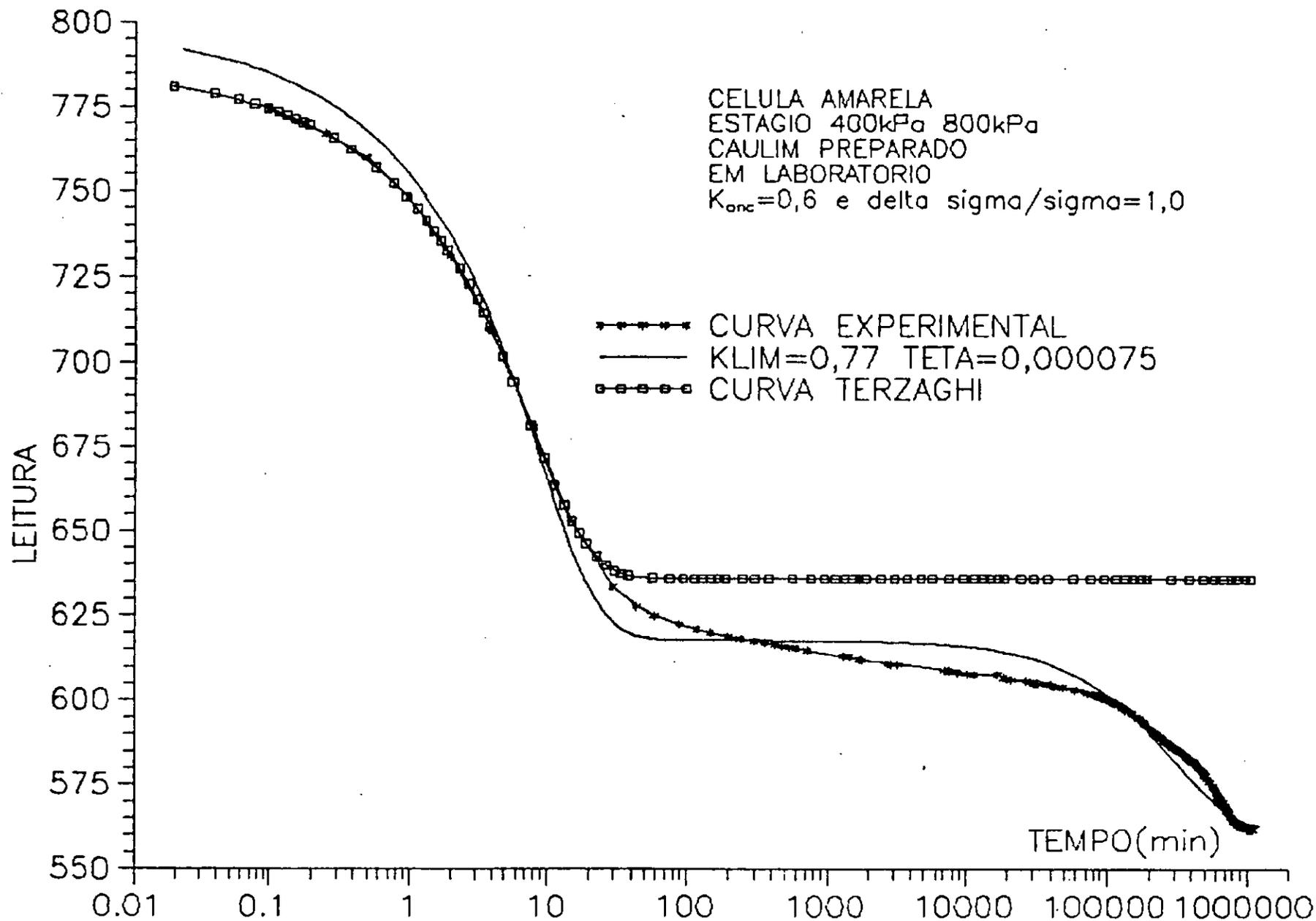


Fig. 2-43 - Comparação das curvas deformação x tempo dos ensaios edométricos de longa duração / curvas teóricas - estágio 400 -800 kPa - Martins & Lacerda (1985).

3. DESCRIÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO E DA METODOLOGIA DE ENSAIOS

3.1 ENSAIOS REALIZADOS

Com base nos estudos já existentes de influência da temperatura no adensamento, descritos na Revisão Bibliográfica, procedeu-se a elaboração de um plano de trabalho com a execução de ensaios de adensamento CRSC, de fluência e convencionais (24h). Todos os ensaios foram realizados na Universidade Laval a partir de convênio existente entre esta universidade e a UFRJ.

Os ensaios de adensamento com velocidade de deformação vertical específica controlada ou CRSC (constant rate of strain consolidation) permitem medida contínua de poro-pressão e obtenção de parâmetros de adensamento do solo (Carvalho - 1989). A variação das tensões de sobreadensamento obtidas nestes ensaios é bastante significativa e deve portanto, ser corrigida para as condições de velocidade de deformação e temperatura existentes em campo. Além disto em ensaios convencionais a determinação da tensão de sobreadensamento é imprecisa em virtude do número reduzido de pontos nas proximidade da tensão de sobreadensamento, o que não ocorre com os ensaios CRSC, já que as medidas de poro-pressão e tensão são contínuas.

Executaram-se ensaios de fluência sob um carregamento de 160 kPa, até a velocidade de deformação vertical específica de 10^{-9} s^{-1} . Estes ensaios tiveram como objetivo verificar qual a influência da temperatura no adensamento secundário e também verificar o modelo Boudali et al.(1994) ao se comparar os resultados dos dois tipos de ensaios (CRSC e fluência). Previa-se inicialmente a concordância dos resultados dos ensaios, isto é, considerando-se que o comportamento tensão-deformação é função da temperatura, velocidade de deformação vertical específica, deformação vertical específica e nível de tensão, e considerando-se estes fatores como “coordenadas” de uma função, as curvas tensão-deformação dos ensaios CRSC e de fluência devem ser coincidentes em pontos de mesmas “coordenadas”.

A escolha de utilização de amostras de grande diâmetro (15 cm), nos ensaios de fluência, deveu-se à existência, na Universidade Laval, de uma célula de grande diâmetro que possibilitava a adaptação de um sistema de controle de temperatura através da instalação de uma serpentina de cobre no interior da célula e exterior ao corpo de prova, e ao mesmo tempo

permitia a medida de poro-pressão, na base do corpo de prova. A vantagem é que se ensaia uma amostra mais representativa.

A execução de ensaios convencionais e CRSC, a 20°C, após os ensaios de fluência, teve como objetivo avaliar a variabilidade natural das amostras utilizadas nestes ensaios.

O quadro resumo dos ensaios executados e o cronograma de trabalhos executados nas argilas de Ariake, Osaka e Saint Polycarpe, estão apresentados respectivamente nas Tabelas 3-1, 3-2 e 3-3.

Tabela 3-1 - Quadro resumo dos ensaios realizados. Argilas de Ariake e Osaka.

ARGILA DE ARIAKE

| ENSAIO | PROF. (m) | UMIDADE INICIAL(%) | INDICE DE VAZIOS INICIAL | VEL.DEF. (s ⁻¹) | TEMP. (°C) | σ'_p (kN/m ²) | NOTAS |
|---------------------|--------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------------|--------------------|
| ENSAIOS CRSC | | | | | | | |
| CRSC13 | 12 | 91.25 | 2.919 | 2×10^{-6} | 5-20 | 69 | σ'_p a 5°C |
| CRSC14 | 12 | 94.59 | 2.890 | 2×10^{-6} | 50-20 | 61 | σ'_p a 50°C |

ARGILA DE OSAKA

| ENSAIO | PROF. (m) | UMIDADE INICIAL(%) | INDICE DE VAZIOS INICIAL | VEL.DEF. (s ⁻¹) | TEMP. (°C) | σ'_p (kN/m ²) | NOTAS |
|--------------------|--------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------------------------------|---|
| ENSAIO CRSC | | | | | | | |
| CRSC16 | -68 | 82.71 | 2.174 | 2×10^{-6} | 50-20-5 | - | σ'_p entre 2 ciclos de temperatura |

Tabela 3.2 - Quadro resumo dos ensaios realizados. Argila de Saint Polycarpe.

ARGILA DE SAINT POLYCARPE

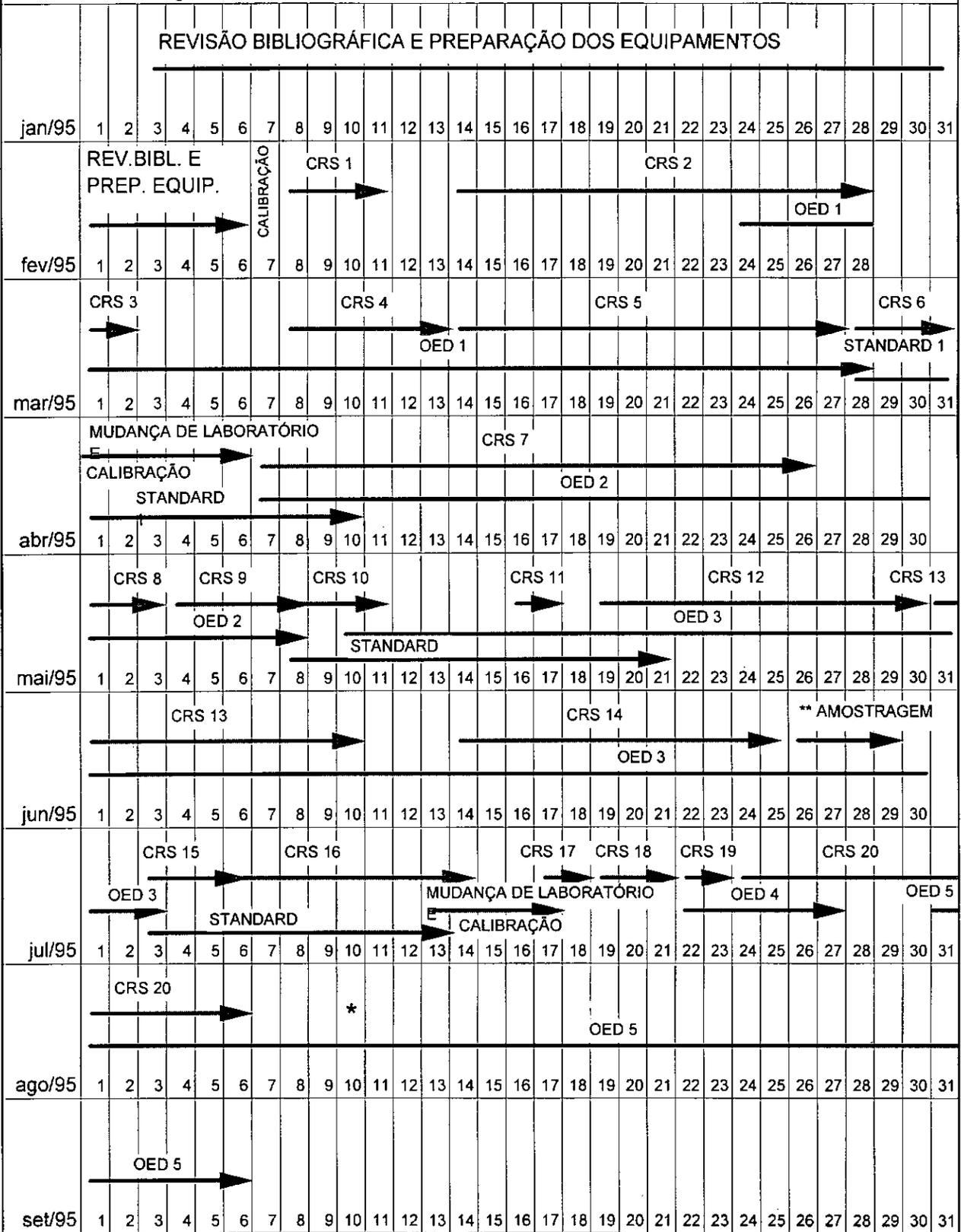
| ENSAIO | PROF. (m) | UMIDADE INICIAL (%) | INDICE DE VAZIOS INICIAL | VEL. DE DEF. (s ⁻¹) | TEMP. (°C) | σ'_p (kN/m ²) (*) | NOTAS |
|--|--------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------|--|--------------------|
| ENSAIOS CRSC | | | | | | | |
| CRSC1 | 7.58 | 60.46 | 1.707 | 2×10^{-6} | 20 | 129 | |
| CRSC2 | 7.58 | 60.71 | 1.700 | 1.7×10^{-7} | 20 | 119 | |
| CRSC3 | 7.79 | 60.59 | 1.719 | 1.7×10^{-5} | 20 | 147 | |
| CRSC4 | 7.79 | 59.68 | 1.709 | 2×10^{-6} | 50 | 115 | |
| CRSC5 | 8.21 | 58.15 | 1.663 | 2×10^{-6} | 50-20 | 121 | σ'_p à 50°C |
| CRSC6 | 7.64 | 53.13 | 1.503 | 2×10^{-6} | 20 | - | APÓS OED1 |
| CRSC7 | 8.21 | 57.68 | 1.641 | 1.7×10^{-7} | 5 | 143 | |
| CRSC8 | 8.38 | 56.67 | 1.591 | 1.7×10^{-5} | 5 | - | VAZAMENTO(**) |
| CRSC9 | 8.38 | 57.05 | 1.608 | 2×10^{-6} | 5 | 157 | |
| CRSC10 | 7.86 | 42.72 | 1.307 | 2×10^{-6} | 20 | - | APÓS OED2 |
| CRSC11 | 8.38 | 57.37 | 1.618 | 1.7×10^{-5} | 5 | - | VAZAMENTO(**) |
| CRSC12 | 8.21 | 57.97 | 1.655 | 2×10^{-6} | 5-20 | 147 | σ'_p à 5°C |
| CRSC15 | 8.32 | 51.44 | 1.450 | 2×10^{-6} | 20 | - | APÓS OED3 |
| CRSC17 | 8.45 | 54.14 | 1.551 | 1.7×10^{-5} | 5 | 173 | |
| CRSC18 | 7.79 | 58.22 | 1.674 | 1.7×10^{-5} | 50 | 123 | |
| CRSC19 | 8.45 | 54.3 | 1.560 | 2×10^{-6} | 20 | 133 | |
| CRSC20 | 8.45 | 54.71 | 1.569 | 1.7×10^{-7} | 50 | 108 | |
| ENSAIOS EDOMÉTRICOS DE FLUÊNCIA | | | | | | | |
| OED 1 | 7.64 | 60.04 | 1.725 | - | 20 | - | |
| OED 2 | 7.86 | 59.30 | 1.682 | - | 5 | - | |
| OED 3 | 8.32 | 57.40 | 1.613 | - | 5 | - | |
| OED 4 | 7.92 | 58.02 | 1.654 | - | 50 | - | VAZAMENTO(***) |
| OED 5 | 8.24 | 55.95 | 1.625 | - | 50 | - | |
| ENSAIOS EDOMÉTRICOS CONVENCIONAIS | | | | | | | |
| ST 1 | 7.71 | 52.32 | 1.470 | - | 20 | - | APÓS OED1 |
| ST 2 | 7.86 | 51.11 | 1.428 | - | 20 | - | APÓS OED2 |
| ST 3 | 8.32 | 51.28 | 1.442 | - | 20 | - | APÓS OED3 |

(*)Tensão de sobreadensamento calculada pelo método proposto por Butterfield(1979).

(**)Dados destes ensaios não foram considerados, exceto o valor da umidade inicial.

(***)Dados deste ensaio foram considerado até o momento da ocorrência do vazamento.

Tabela 3-3 - Cronograma dos ensaios realizados.



* dia 10/8 - devolução do sistema de aquisição para a graduação: a partir desta data as leituras do ensaio de fluência foram realizadas com o uso do deflectômetro manual.

** coleta de amostras com o uso do amostrador Laval - local : L'Assomption - Québec.

3.2 ARGILA DE SAINT POLYCARPE

A argila de Saint Polycarpe é uma argila cinza, de alta plasticidade, inorgânica, cujo local de coleta está situado no centro da bacia do mar de Champlain, na província de Québec, Canadá. Os depósitos argilosos do leste do Canadá são em sua maioria de origem glacial ou pós-glacial e são depositados nos mares e lagos que se formaram após o recuo da calota glacial em direção ao norte, no período de 18000 a 6000 anos atrás.

Como o mar de Champlain estava em contato com o golfo do rio Saint Laurent e era também alimentado por rios e fontes glaciais, a salinidade da água varia em função do tempo e do local. A redução da salinidade de argilas marinhas é fator fundamental para a existência de argilas sensíveis. A lixiviação do sal, resultante de um abaixamento do nível do mar, como no caso das argilas de Champlain, faz com que a argila fique exposta à percolação de águas de baixa salinidade. A remoção do sal pode ocorrer por percolação destas águas e até por difusão.

A estrutura aberta e a sensibilidade destas argilas estão relacionadas à quantidade de matérias amorfas presentes nestas argilas, que pode variar de 10 a 40% (Young et al. -1979). A Fig. 3-1 apresenta a localização esquemática da área de coleta das amostras de Saint Polycarpe e também Berthierville, descritas por Boudali et al.(1994).

As amostras apresentaram-se bastante homogêneas, com teores de umidade variando de 54% a 60%, com presença eventual de conchas. Determinou-se o limite de plasticidade e foram executados ensaios de cone sueco, descritos por Head (1994), para determinação da sensibilidade e do limite de liquidez,. Os valores C_u e C_{ur} foram obtidos de ensaios de cone sueco intacto e amolgado respectivamente e o percentual de argila através de ensaios de sedimentação.

Os ensaios de cone sueco são bastante utilizados para obtenção do limite de liquidez, em argilas homogêneas, substituindo o ensaio de Casagrande. Obtêm-se os mesmos resultados em ambos os ensaios, sendo que a execução do ensaio de cone é mais simplificada que o de Casagrande. Para argilas heterogêneas a utilização destes ensaios não é aconselhada pois a heterogeneidade da argila faz com que haja uma grande diferença entre os resultados de penetração obtidos com a queda do cone na superfície da argila a ser ensaiada.

Leroueil, Tavenas & Le Bihan (1983) descrevem as propriedades características das argilas Champlain com base em diversos ensaios realizados em argilas da região. A

comparação dos resultados obtidos neste trabalho, na argila de Saint Polycarpe, com os resultados obtidos pelos autores acima, indica que esta argila é uma argila típica da região de Champlain, com características muito semelhantes às demais argilas da região.

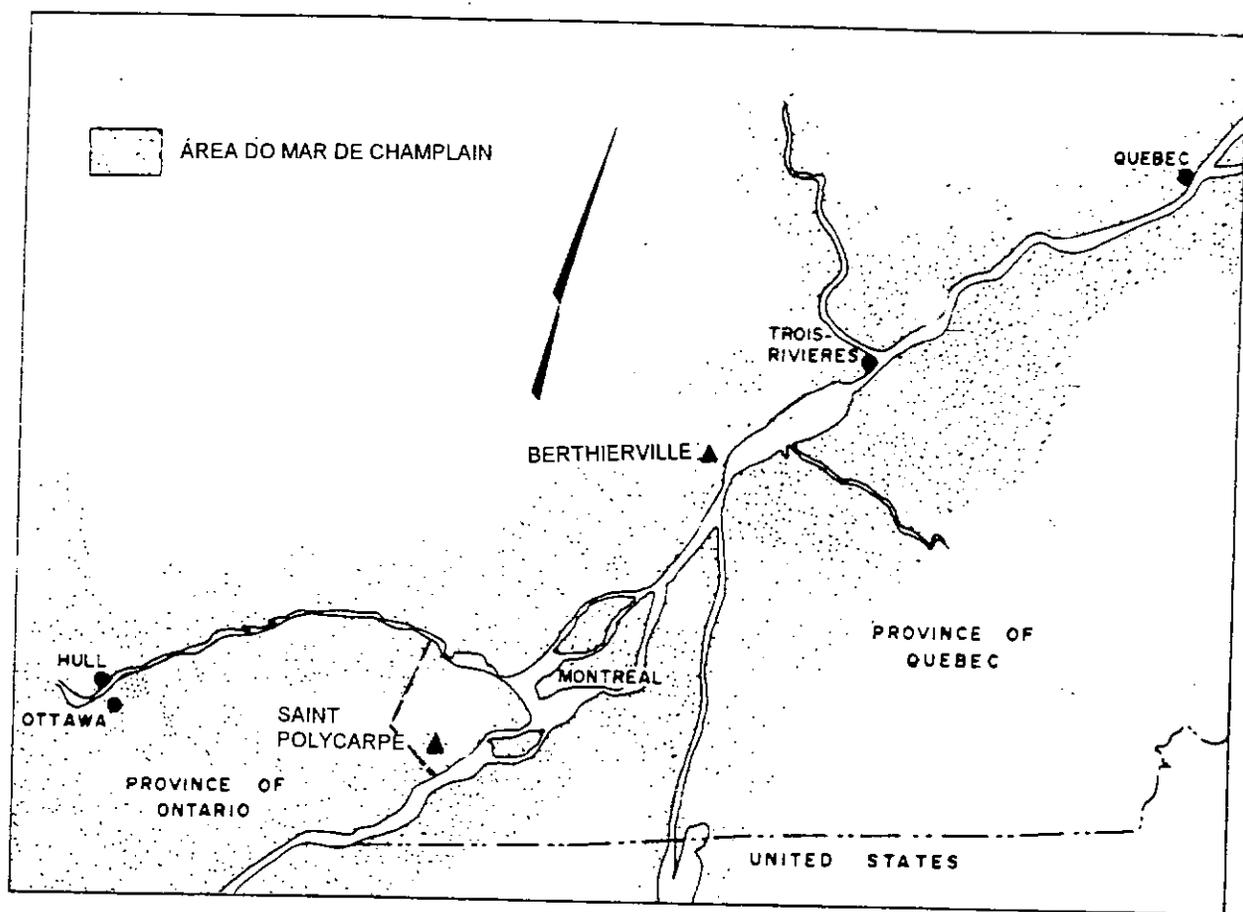


Fig. 3-1 - Localização esquemática do local de coleta das amostras. Argila de Saint Polycarpe.

Apresenta-se na Tabela 3-4 o quadro resumo das características geotécnicas da argila de Saint Polycarpe obtidas a partir dos ensaios executados. Na Tabela 3-5 apresenta-se um resumo das propriedades características das argilas da região de Champlain estabelecidas por Leroueil et al.(1983). Os valores de resistência, Limites de Atterberg, índice de vazios, porcentagem de argila, peso específico e sensibilidade podem ser obtidos nestes gráficos apenas com os resultados dos ensaios de cone intacto e amolgado.

Estes resultados são o resumo de ensaios realizados ao longo de anos de pesquisa nas várias argilas da região de Champlain. As correlações estabelecidas para as argilas de Champlain fornecem uma ordem de grandeza, a título indicativo somente, pois não substituem

a necessidade de se executar ensaios individuais.

Como dados de entrada nestes gráficos, utilizou-se uma amostra, com umidade natural de 61% e penetração no cone sueco(60-60), em amostra amolgada, de 9 mm e penetração no cone sueco (100 -30), em amostra intacta, de 4.8 mm. Os dados de saída estão apresentados na Tabela 3-6. Os resultados dos ensaios realizados na argila de Saint Polycarpe estão de acordo com os obtidos por Leroueil et al.(1983), o que permite descrevê-la como uma argila típica da região de Champlain, e compará-la às demais.

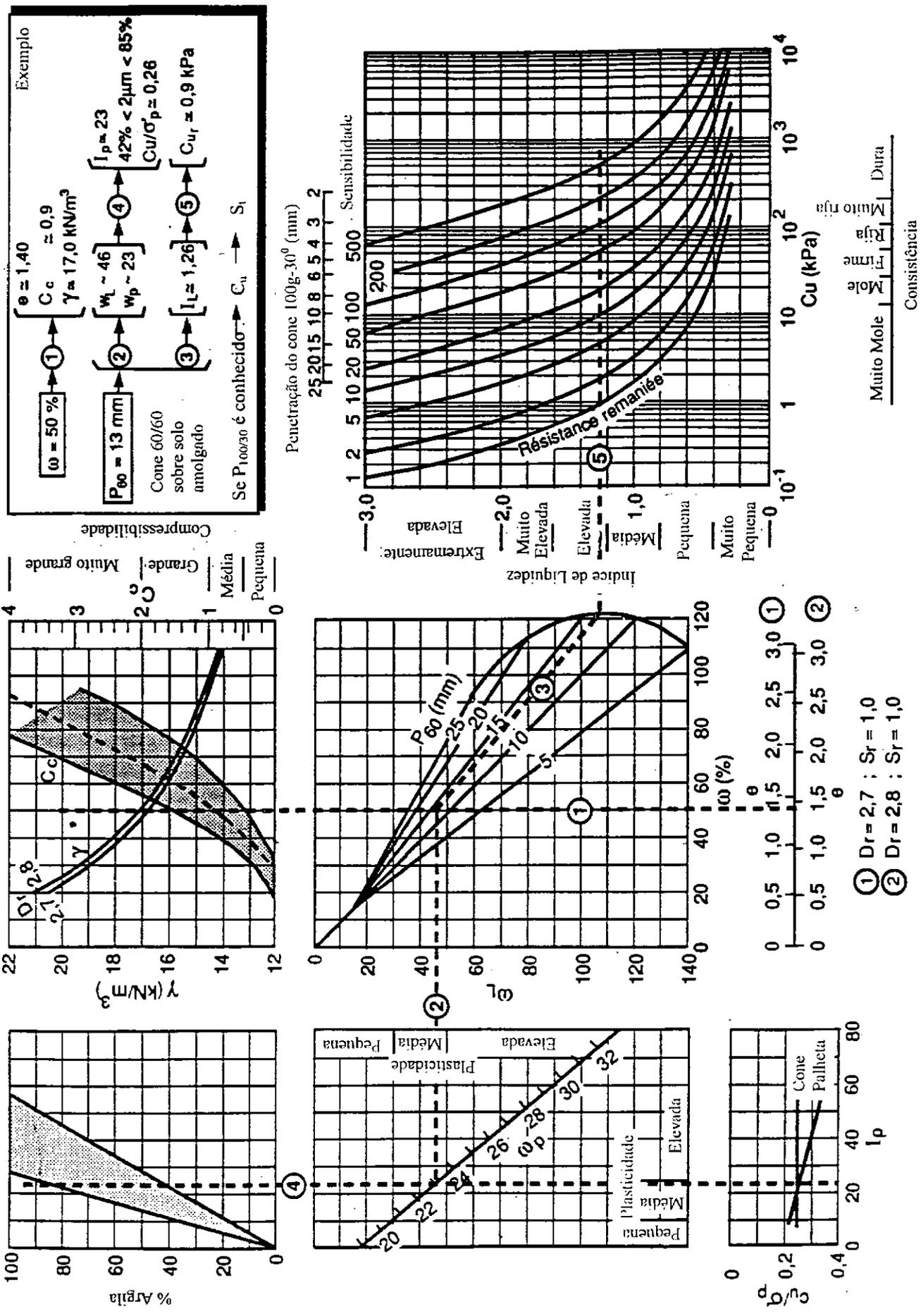
Tabela 3-4 - Quadro resumo das propriedades da argila de Saint Polycarpe. Valores obtidos a partir de ensaios de caracterização na argila de Saint Polycarpe.

| AMOSTRA | C_u (kPa) | C_{ur} (kPa) | S_t | w (%) | w_L (%) | w_P (%) | γ (kN/m ³) | e_0 | % de argila | % de silte | G (g/cm ³) |
|----------------------------|----------------|-------------------|-------|----------|--------------|--------------|----------------------------------|-------|----------------|---------------|---------------------------|
| F3-T3-E1 | 43 | 2 | 21,5 | 60,07 | 62 | 27 | 16,6 | 1,73 | 80 | 20 | 2,8 |
| F3-T3-E2 (após OED2) | - | - | - | - | 51 | 27 | 16,7 | - | - | - | - |

As amostras da argila de Saint Polycarpe, foram coletadas em 7/10/1986 com auxílio do amostrador Laval de 200 mm de diâmetro, descrito por La Rochelle et al.(1981). Logo após a coleta, as amostras foram protegidas por uma mistura de parafina e vaselina, a 50 % em peso, envolvidas por uma película de plástico, para então serem transportadas para o laboratório, onde foram mantidas em câmara úmida à temperatura de 7°C a 10°C e umidade relativa de 90%. O armazenamento das amostras foi executado em acordo com o proposto por La Rochelle et al. (1986).

Os ensaios foram executados em amostras de um mesmo furo cuja diferença de profundidade não excedeu 1m. Na Fig. 3-2 apresenta-se a variação do teor de umidade da argila de Saint Polycarpe, com a profundidade e na Fig. 3-3 o esquema das amostras utilizadas.

Tabela 3-5- Propriedades características das argilas de Champlain - Leroueil et al. (1983)



Nota : As correlações estabelecidas por Leroueil, Tavenas e Le Bihan, fornecem uma ordem de grandeza à título indicativo somente.

Tabela 3-6 - Quadro resumo das propriedades da argila de Saint Polycarpe. Valores obtidos a partir das propriedades características das argilas de Champlain. Leroueil et al.(1983)

| AMOSTRA | C_u (kPa) | C_{ur} (kPa) | S_t | w (%) | w_L (%) | w_p (%) | γ (kN/m ³) | e_0 | % de argila | G (g/cm ³) |
|----------|----------------|-------------------|-------|------------|--------------|--------------|----------------------------------|-------|----------------|-----------------------------|
| F3-T3-E1 | 45 | 2 | 21 | 60,07 | 64 | 26 | 16,1 | 1,7 | 70 a 100 | 1,8 |

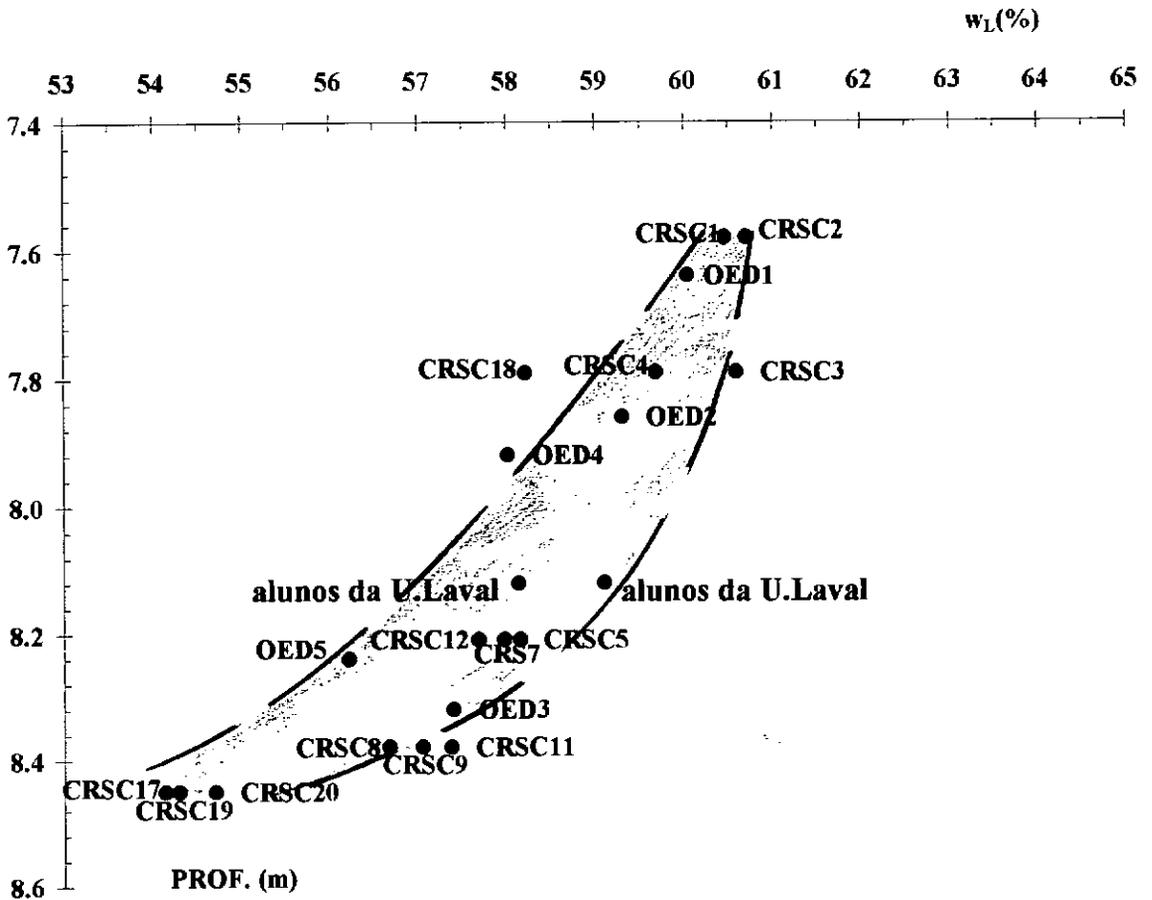


Fig. 3-2 - Variação do teor de umidade das amostras com a profundidade. Argila de Saint Polycarpe.

F3-T2 / F3-T5

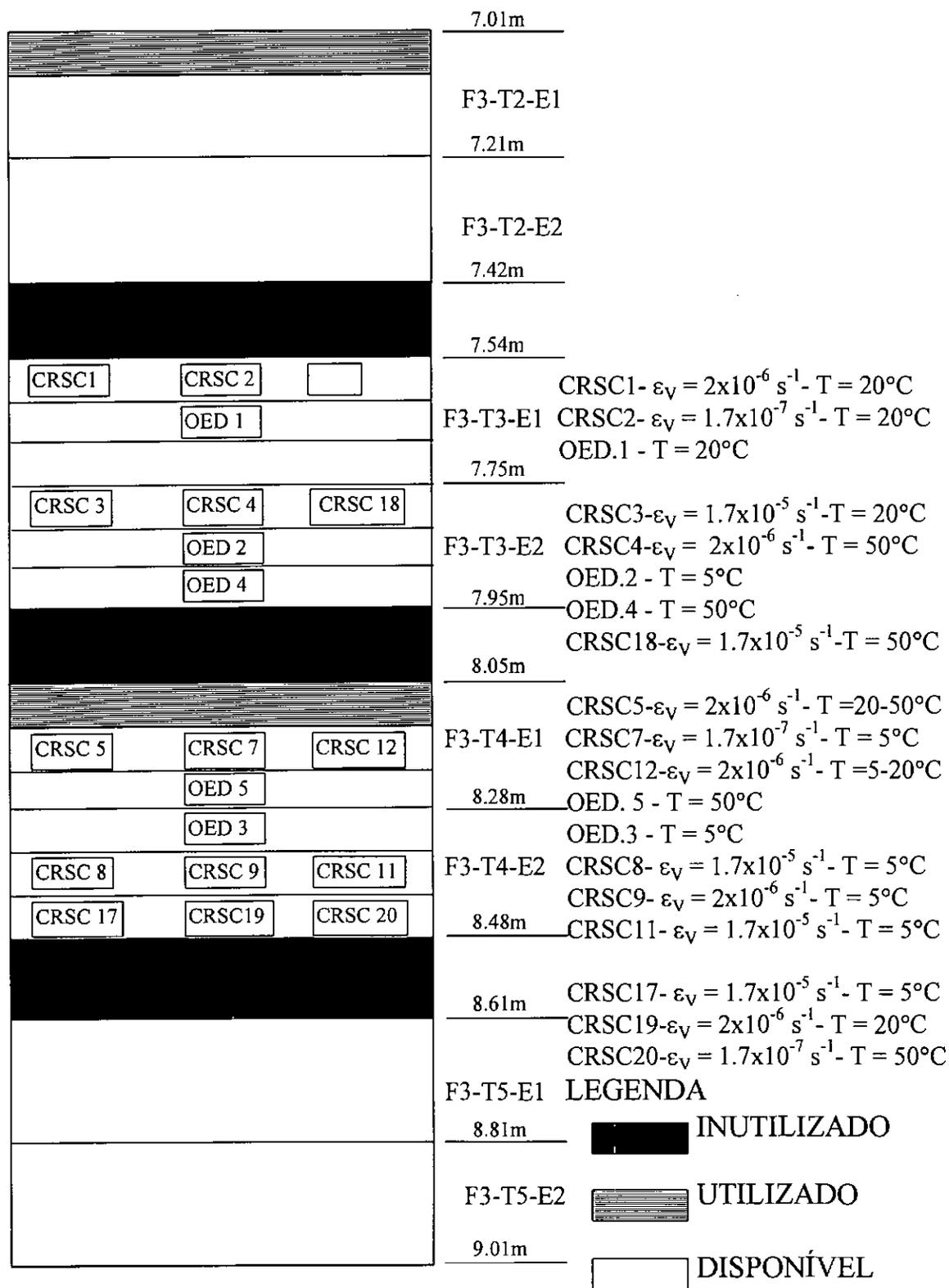


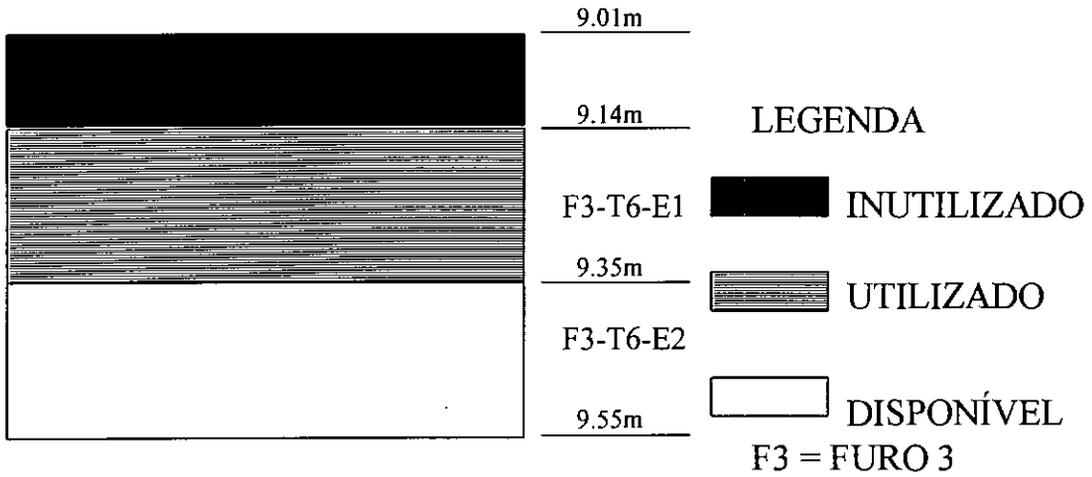
Fig. 3-3 - Esquema das amostras utilizadas.

Argila de Saint Polycarpe.

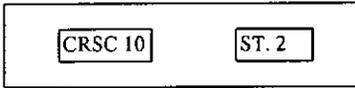
F3 = FURO 3

T2 = TUBO 2

F3-T6

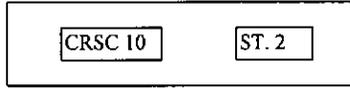


OED.1- $\sigma'_v = 160\text{kN/m}^2$



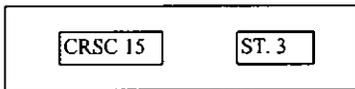
CRSC6- $\epsilon_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - $T = 20^\circ\text{C}$
STANDARD 1 - $T = 20^\circ\text{C}$

OED.2- $\sigma'_v = 160\text{kN/m}^2$



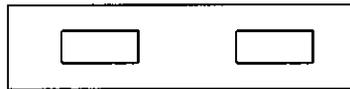
CRSC10- $\epsilon_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - $T = 20^\circ\text{C}$
STANDARD 2 - $T = 20^\circ\text{C}$

OED.3- $\sigma'_v = 160\text{kN/m}^2$

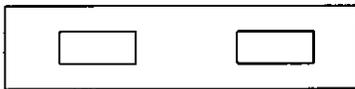


CRSC15- $\epsilon_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - $T = 20^\circ\text{C}$
STANDARD 3 - $T = 20^\circ\text{C}$

OED.4- $\sigma'_v = 160\text{kN/m}^2$



OED.5 - $\sigma'_v = 160\text{kN/m}^2$



Notas

1- O solo inutilizado indicado na legenda representa a retirada da parte superior amolgada do tubo de coleta conforme indicado na Foto 21.

2- O solo indicado utilizado na legenda representa amostras ensaiadas por alunos da Universidade Laval.

Fig. 3-3 - Esquema das amostras utilizadas. Argila de Saint Polycarpe. continuação.

3.3 ARGILAS JAPONESAS

As amostras de argilas provenientes do Japão foram enviadas à Universidade Laval via avião, com cuidado especial no transporte e armazenamento. Os ensaios foram executados nos Laboratórios de Geotecnia e Mecânica do Gelo desta Universidade.

3.3.1 Argila de Ariake

Trata-se de uma argila marinha sensível, de cor cinza escura oriunda do Japão. As amostras foram coletadas a 12 m de profundidade com o uso de amostrador Shelby de 4" e apresenta as seguintes características:

$$G_s = 2.698; \quad w_n = 121\%; \quad w_L = 97\%; \quad w_p = 55\%;$$

$$I_p = 51.398; \quad I_L = 1.291; \quad \% \text{ de argila} = 61;$$

$$\% \text{ de silte} = 35; \quad \% \text{ de areia} = 4.$$

Foram reservadas amostras do solo para a execução de ensaios de classificação mineralógica, na próxima etapa dos trabalhos.

3.3.2 Argila de Osaka

As amostras foram coletadas a 67.7m de profundidade a partir do nível do mar, conforme esquema apresentado na Fig. 3-4.

Estas amostras foram coletadas nas proximidades de um aterro hidráulico, em construção, sobre o qual será construído um aeroporto, dentro da baía de Osaka, a cerca de 4 Km do litoral. A argila de Osaka é uma argila cinza escura, bastante heterogênea com presença de areia fina e pequenas conchas.

Reservaram-se amostras para classificação mineralógica, que será objeto de estudo posterior.

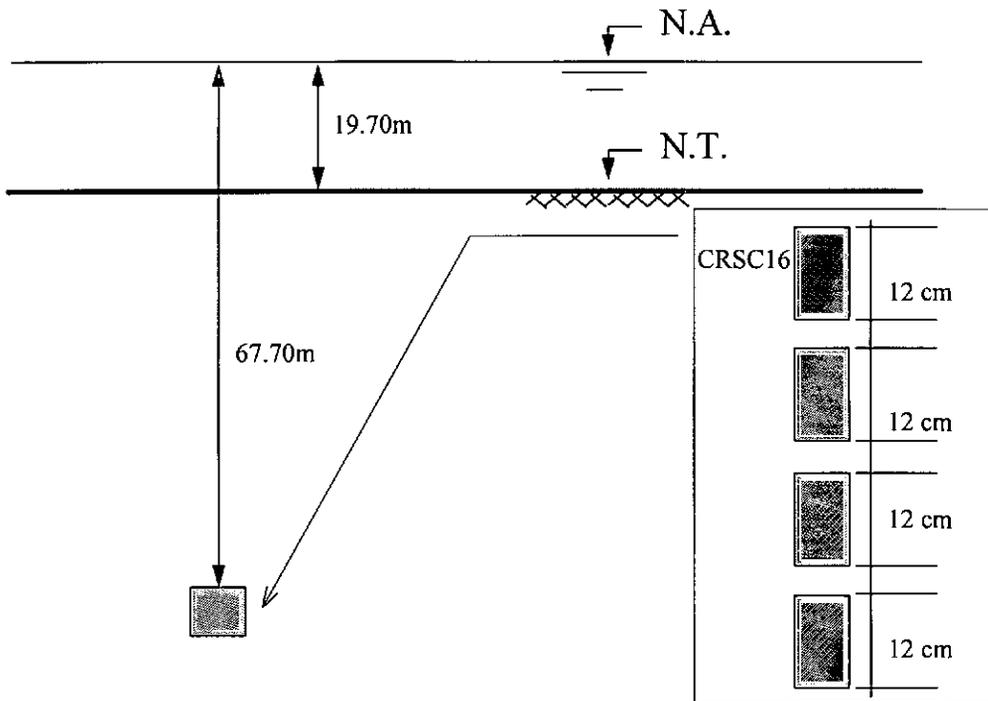


Fig. 3-4 - Esquema das amostras coletadas. Argila de Osaka.

3.4 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO CRSC

3.4.1 Descrição do equipamento.

O equipamento utilizado nos ensaios CRSC consistiu de :

- a) Prensa Wykeham Farrance com motor de 24 r.p.m - com faixa de variação de velocidades de deformação entre 1.524mm/min e 0.00061mm/min (4.57 s^{-1} à $5.1 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - para uma amostra de 20mm de altura) que podem ser reduzidas em 100 vezes, utilizando-se um redutor de velocidade acoplado às engrenagens;
- b) Sistema de controle de pressão com tubos de mercúrio, cujo esquema está apresentado na Fig. 3-5;
- c) Sistema de aquisição de dados e controle - Software Maximom Plus elaborado por Scimetric Instruments Inc., acoplado a transdutores de carga (com capacidade para até 2000 libras, ou seja, 8896 N), pressão e deslocamento;
- d) Deflectômetro Wykeham Farrance (0.001mm);
- e) Balança eletrônica com poder de resolução de 0.01g;

f) Célula e anel biselado de 20mm de altura e 75mm de diâmetro, cujo detalhe está apresentado na Fig. 3-6;

g) Cuba de acrílico envolta por isopor - para ensaios a 50°C;

h) HOBO - Temperature Logger - registra as temperaturas do ambiente durante um período de tempo pré-fixado e/ou intervalos de medida pré-fixados.

i) Termômetro Digital.

Os ensaios CRSC executados a 5°C foram executados numa câmara fria com faixa de variação de temperatura possível entre +20°C a -40°C.

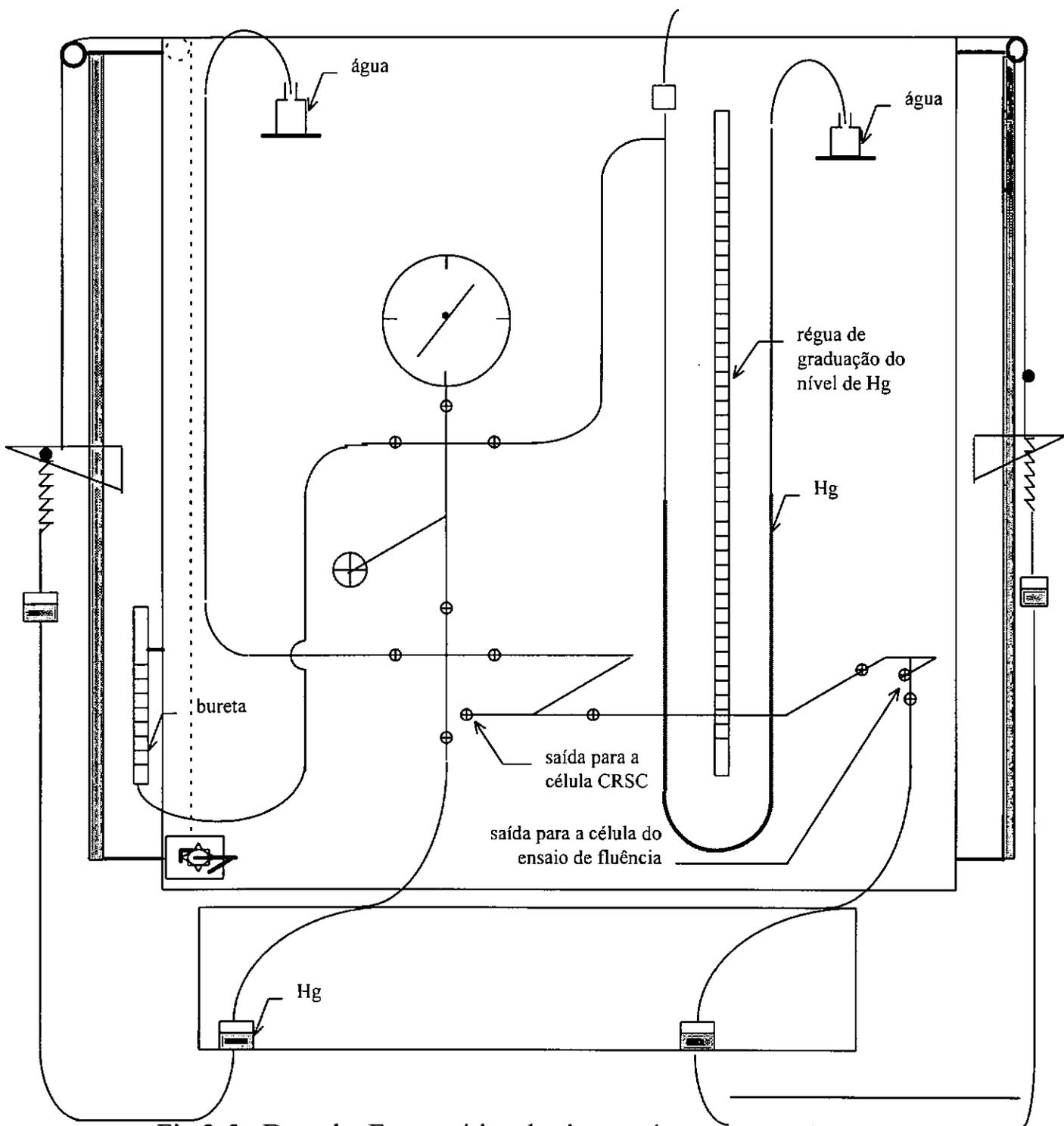


Fig.3-5 - Desenho Esquemático do sistema de contração

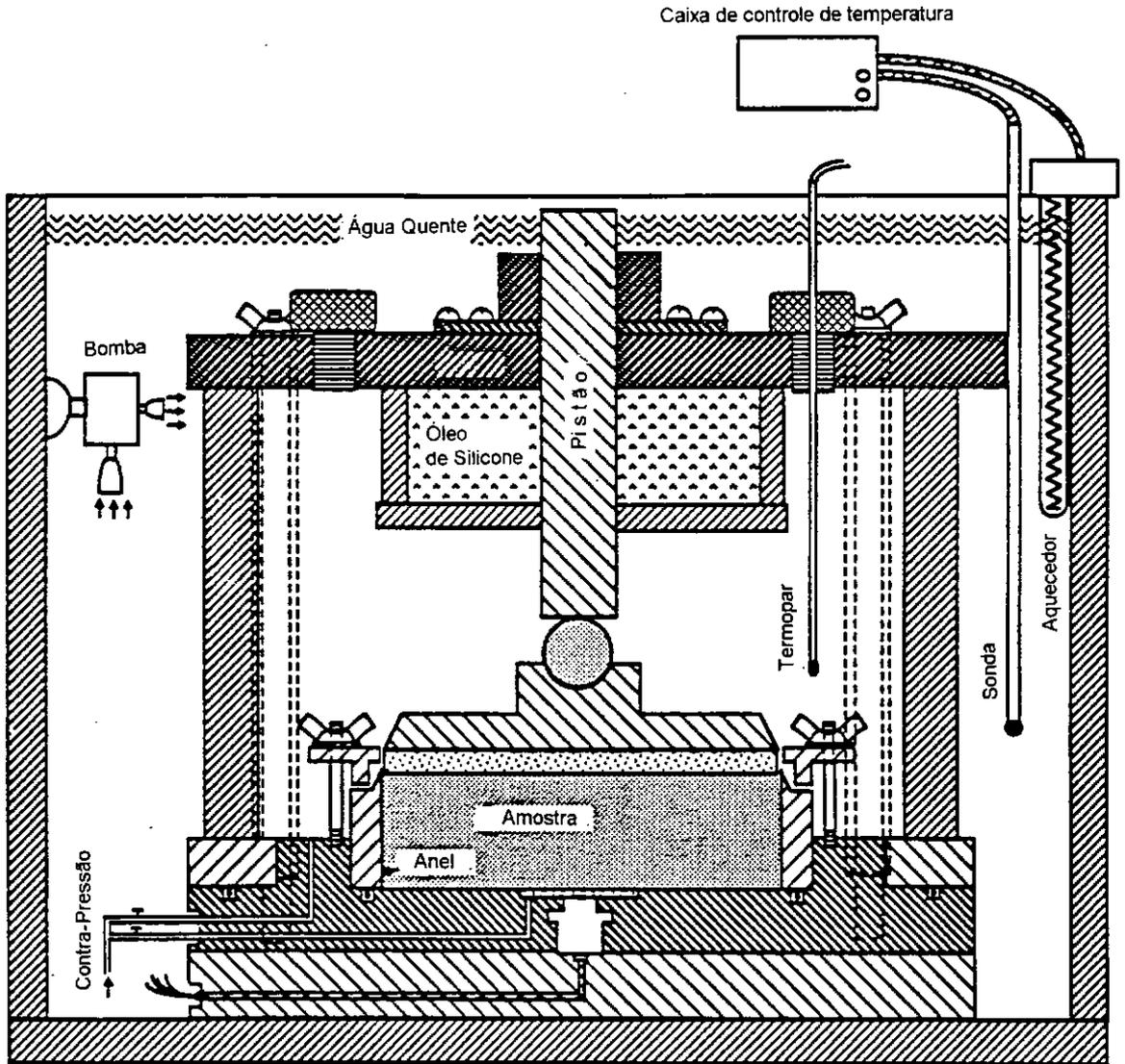


Fig. 3-6 - Desenho esquemático da célula utilizada nos ensaios CRSC. Boudali (1995).

A célula utilizada nos ensaios CRSC permite a aplicação de contra-pressão, sem permitir entretanto o controle da drenagem, que é livre no topo do corpo de prova. Com ascensão da prensa, o pistão da célula aplica uma carga no anel dinâmico, acoplado a um transdutor, que registra a força aplicada. Para diminuir o atrito do pistão no topo da célula há um reservatório de óleo.

3.4.2 Preparação dos corpos de prova.

Os corpos de prova foram talhados dentro da câmara úmida, com auxílio do anel

biselado, de um torno e fio de aço. As amostras remanescentes foram protegidas novamente pela mistura de parafina e vaselina e estocadas na câmara úmida. É necessário um cuidado especial no manuseio das argilas da região de Champlain em virtude de sua sensibilidade.

Foram coletadas amostras circundando o corpo de prova : topo, base e lateral. Estas amostras foram pesadas e levadas à estufa, onde foram mantidas por um período de aproximadamente 12h. O resfriamento das amostras foi feito em armário de vidro, para evitar a absorção da água do meio ambiente. Pesaram-se então as amostras secas e obteve-se a umidade natural média da amostra. Pesaram-se os corpos de prova antes e após os ensaios para determinar-se os índices de vazios iniciais e finais da amostra ensaiada.

3.4.3 Descrição e cálculo dos ensaios

Os ensaios foram executados com medida de poro-pressão na base e até que cerca de 25% de deformação vertical específica fosse alcançada.

Inicialmente ferveram-se as pedras porosas e os filtros de poliéster em água destilada por cerca de 15 minutos, para eliminar as bolhas de ar. Após a preparação, o corpo de prova foi colocado na célula, com uma pedra porosa no topo da amostra, para permitir a drenagem e uma pequena, na base, para a medida da poro-pressão. Entre as pedras porosas e o solo colocaram-se os filtros, que têm o mesmo diâmetro das pedras e são utilizados para evitar a colmatação das pedras porosas. Neste processo tomou-se o cuidado para que a pedra porosa da base estivesse sempre submersa.

Em todos os ensaios aplicou-se uma contra-pressão de 100 kPa, durante um período de cerca de 24h, para que as bolhas de ar se comprimissem dentro da amostra e para se obterem melhores medidas de poro-pressão. Para o cálculo da contra-pressão u_0 utilizou-se (Head - 1994):

$$u_0 = \frac{p_0(S - S_0)(1 - H)}{1 - S(1 - H)} \quad (3-1)$$

onde :

S_0 = saturação inicial da amostra;

S = saturação final da amostra;

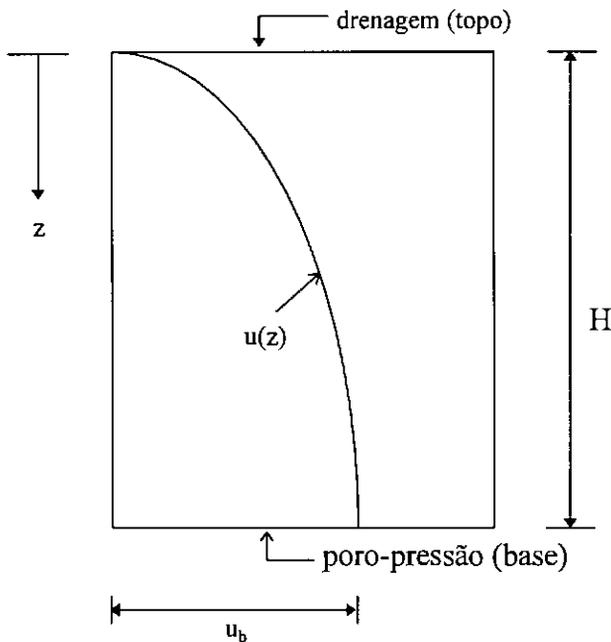
H = coeficiente de solubilidade do ar na água de Henry = 0.02 (a 20°C);

p_0 = pressão atmosférica $\approx 101\text{kPa}$.

Para $S_0 \approx 98\%$ e S final = 100%, $\Delta u_b \approx 100\text{kPa}$.

Nos ensaios de adensamento CRSC, tanto o índice de vazios quanto a tensão estão variando durante todo o ensaio. Logo, a curva tensão efetiva-deformação vertical específica é obtida a partir de valores médios da tensão-efetiva e do índice de vazios. Para se efetuar o cálculo da tensão efetiva, por exemplo deve-se recorrer a hipóteses com relação às poro-pressões (Smith & Wahls-1969 e Wissa et al. 1971).

Num ensaios CRSC, para uma determinada deformação volumétrica específica, num determinado instante, admitindo-se que a poro-pressão tenha distribuição parabólica tem-se:



$$u(z) = Az^2 + Bz + C$$

$$\text{para } u(0) = 0 \Rightarrow C = 0$$

$$U(H) = u_b \Rightarrow AH^2 + BH = u_b \Rightarrow (AH+B)H = u_b$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \Rightarrow 2aH + B = 0 \Rightarrow B = -2AH$$

$$A = -u_b / H^2 ; B = 2u_b / H$$

$$u = -\frac{u_b}{H^2} z^2 + \frac{2u_b}{H} z$$

$\overline{\sigma}'_v$ = tensão efetiva média

$\sigma' = \sigma - u$, para $\sigma(z) = \text{constante}$, tem-se:

$$\overline{\sigma}' = \frac{1}{H} \int_0^H (\sigma - u_z) dz = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma dz - \frac{1}{H} \int_0^H u_z dz$$

$$\overline{\sigma}' = \sigma - \frac{1}{H} \int_0^H \left(-\frac{u_b}{H^2} z^2 + \frac{2u_b}{H} z \right) dz = \sigma - \frac{1}{H} \left[-\frac{u_b z^3}{3H^2} + \frac{u_b z^2}{H} \right]_0^H = \sigma - \left[-\frac{u_b}{3} + \frac{3u_b}{3} \right] =$$

Tem-se portanto:

$$\overline{\sigma}'_v = \sigma - \frac{2}{3} u_b \quad (3-2)$$

Para o cálculo da condutividade hidráulica, pela lei de Darcy, tem-se :

$v = k i$, onde:

Por outro lado v é igual à velocidade de deformação dH/dt (medida do extensômetro)

para solo saturado ou $v = H \dot{\epsilon}_v$;

i = gradiente hidráulico na face drenante.

$$i = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} = \left(-\frac{2u_b}{H^2} z + \frac{2u_b}{H} \right) \frac{1}{\gamma_w}$$

Para $z = 0$ e considerando-se a contra-pressão u_0 tem-se :

$$k = \frac{H^2 \gamma_w \dot{\epsilon}_v}{2(u_b - u_0)} \quad (3-3)$$

γ_w = peso específico da água;

$\dot{\epsilon}_v$ = velocidade de deformação vertical específica;

H = altura da amostra em função do tempo;

u_b = poro-pressão medida na base;

u_0 = contra-pressão.

As argilas de Champlain apresentam uma variação brusca de m_v (coeficiente de compressibilidade volumétrica) na região da tensão de sobreadensamento, que corresponde a

uma variação acentuada da curva σ'_v x v e nesta região, possibilitando a determinação direta da tensão de sobreadensamento. Entretanto, para velocidades de deformação mais altas, esta determinação fica mais imprecisa pois a curva σ'_v x v e na região da tensão de sobreadensamento, apresenta-se mais suave.

Portanto, para a determinação do tensão de sobreadensamento de cada ensaio utilizou-se a proposição de Butterfield (1979), em que se obtém os parâmetros \mathcal{C}_s e \mathcal{C}_c a partir da curva $\log v$ x $\log \sigma'_v$. O cálculo do m_v é dado por :

$$m_v = -\frac{d\varepsilon_v}{d\sigma'_v} = -\frac{1}{v} \frac{dv}{d\sigma'_v} = -\frac{d \ln v}{d\sigma'_v} = -\frac{d \ln v}{d\sigma'_v} \frac{1}{\sigma'_v} = -\frac{d \ln v}{d \ln \sigma'_v} \frac{1}{\sigma'_v} = -\frac{d \log v}{d \log \sigma'_v} \frac{1}{\sigma'_v}$$

Mas o termo $(-d \log v / d \log \sigma'_v)$ pode ser considerado constante na curva $\log v$ x $\log \sigma'_v$. Na Fig. 3-7 apresenta-se o esquema de cálculo destas constantes para os trechos sobreadensado e normalmente adensado.

No trecho sobreadensado : $m_v = \mathcal{C}_s / \sigma'_v$, onde $\mathcal{C}_s = \text{constante}$.

No trecho normalmente adensado : $m_v = \mathcal{C}_c / \sigma'_v$, onde $\mathcal{C}_c = \text{constante}$.

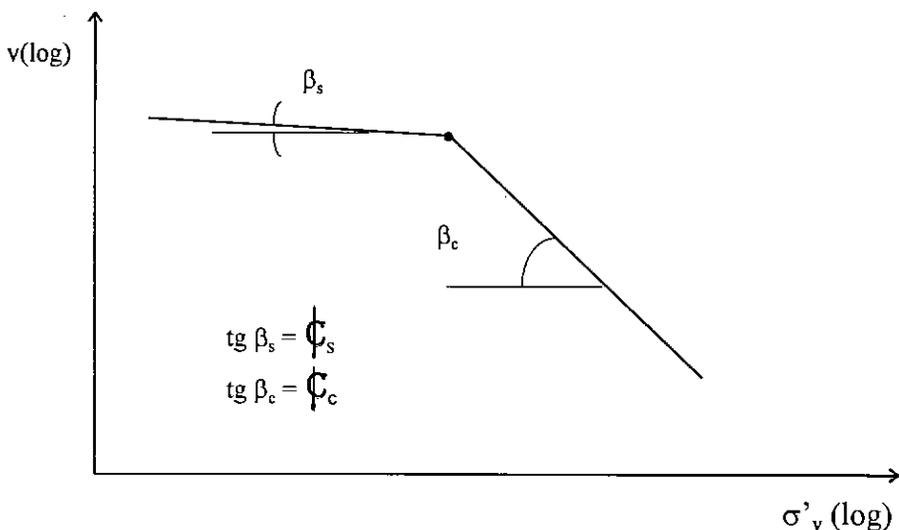


Fig. 3-7 - Esquema da curva de compressão edométrica. Martins & Lacerda (1994).

Portanto a curva m_v x σ'_v é uma hipérbole, para o trecho sobreadensado, em função do

parâmetro C_s da argila e para o trecho normalmente adensado, a curva $m_v \times \sigma'_v$ é uma hipérbole em função de C_c da argila, conforme representado esquematicamente na Fig. 3-8.

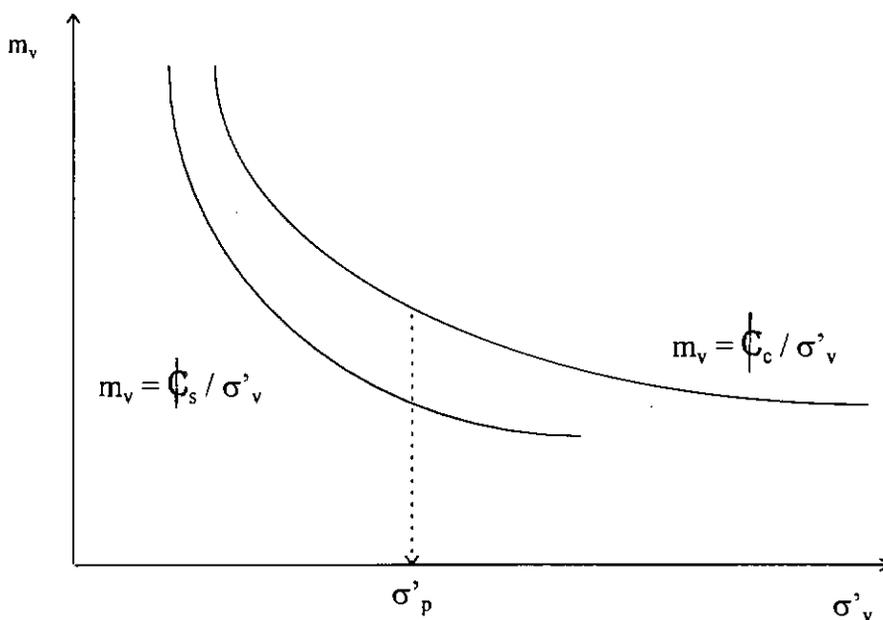


Fig. 3-8 - Relações hiperbólicas entre m_v e σ'_v . Butterfield (1979).

A tensão de sobreadensamento será a tensão para qual o valor de $\partial m_v / \partial \sigma'_v$ é máximo (Martins & Lacerda-1994). Para a argila de Saint Polycarpe, a transição destas hipérboles se faz de forma abrupta, com uma variação quase vertical do m_v , o que torna fácil a determinação das tensões de sobreadensamento. Ressalta-se que para as velocidades de deformação mais altas assim como para temperaturas mais baixas esta transição se torna mais suave.

Na Fig. 3-9, apresenta-se o esquema dos ensaios executados à temperatura variável, tomando-se como exemplo o ensaio CRSC12. A cada ciclo de temperatura deixou-se o corpo de prova pelo menos 12h a uma temperatura constante, antes e após o ciclo, para permitir a dissipação das poro-pressões geradas pelo ciclo anterior.

ENSAIO CRSC 12

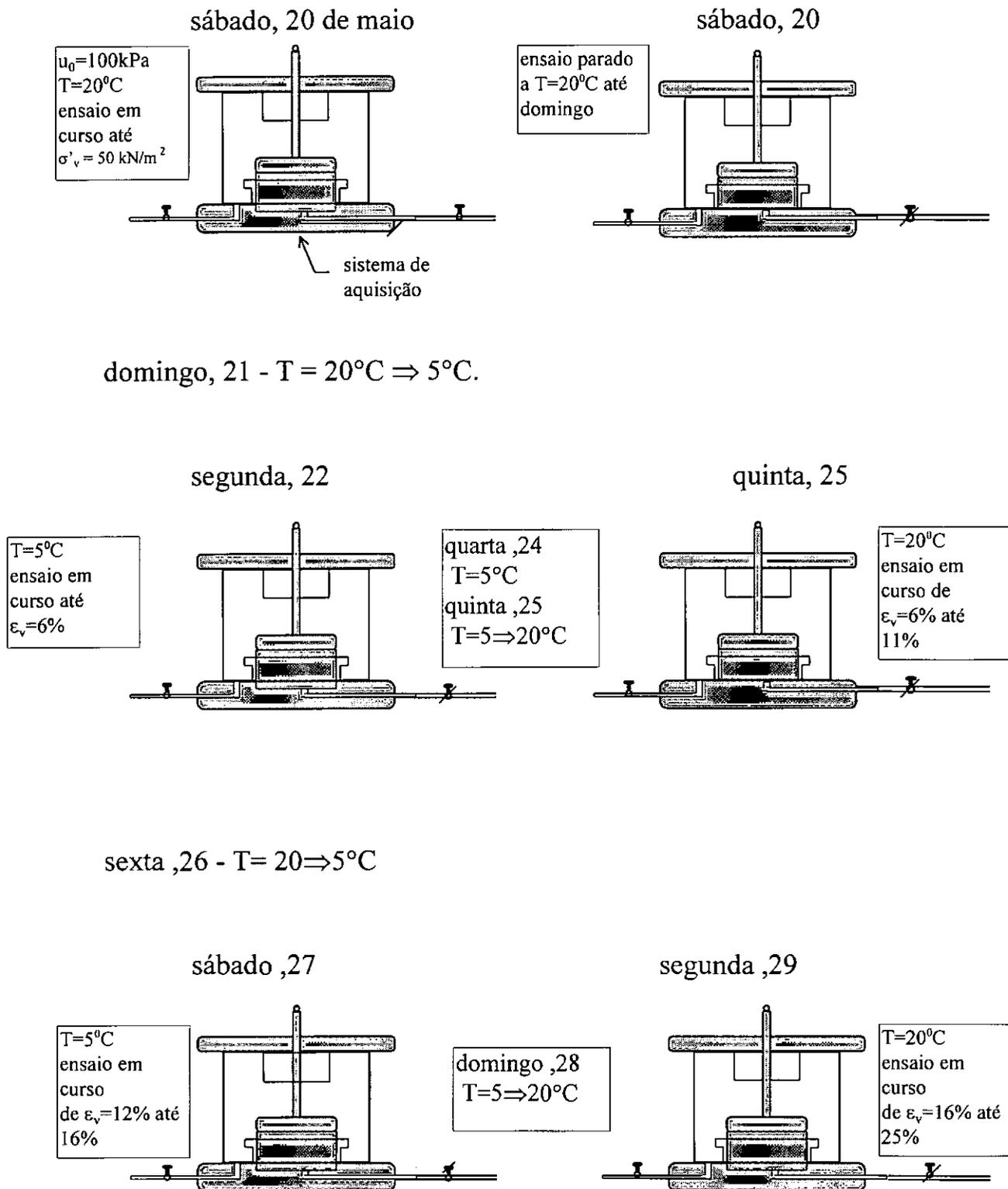


Fig. 3-9 - Esquema do ensaio à temperatura variável CRSC 12 - Argila Saint Polycarpe.

3.5 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EDOMÉTRICOS DE FLUÊNCIA

3.5.1 Equipamento

O equipamento utilizado nos ensaios de fluência consistiu de :

- a) Sistema de controle de pressão com tubos de mercúrio;
- b) Sistema de aquisição de dados e controle - Software Maximom Plus elaborado por Scimetric Instruments Inc., acoplado a transdutores de pressão e deslocamento;
- c) Deflectômetro Hoskin Scientificco (0.001”- acurácia do equipamento - LC8);
- d) Sistema de carregamento composto por braço de alavanca, pendural e pesos;
- e) Balança eletrônica;
- f) Célula (denominada 2) e anel biselado de 4.8 cm de altura e 15cm de diâmetro.

Apresenta-se na Fig. 3-10 o esquema do sistema de controle de temperatura utilizado nos ensaios de fluência e na Fig. 3-11 o detalhe da célula 2.

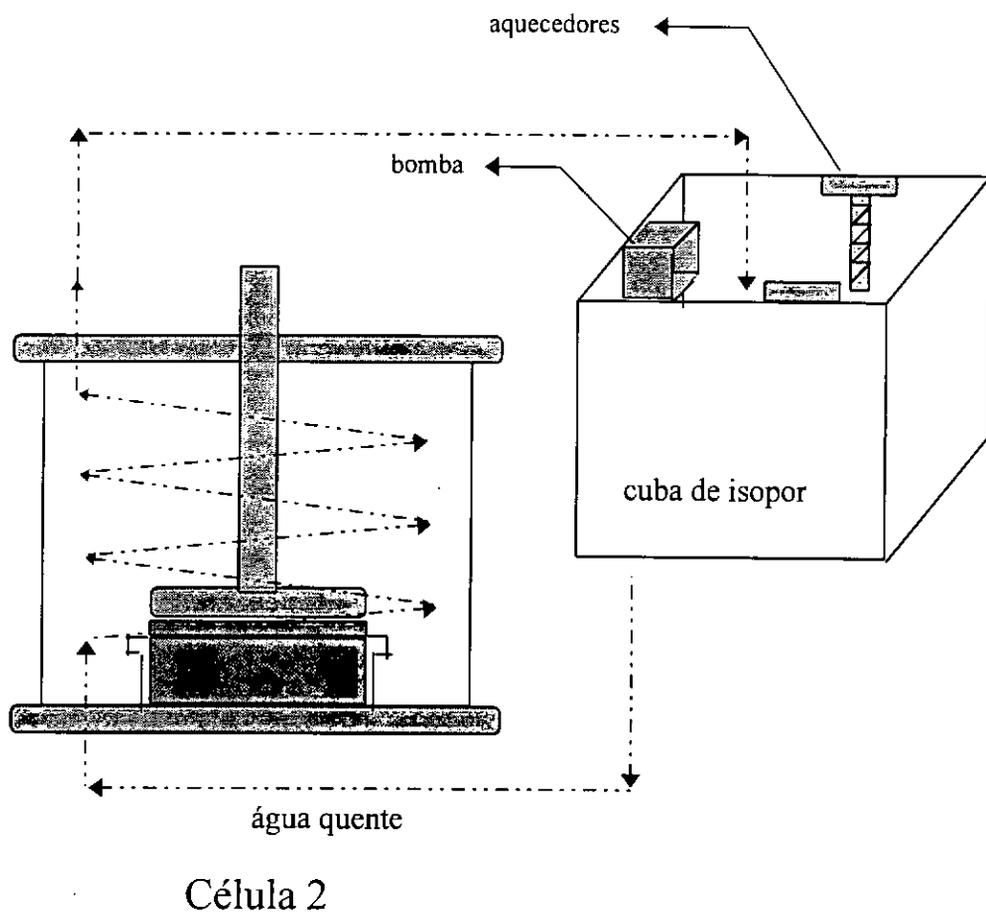


Fig. 3-10 - Esquema do Sistema de Controle de temperatura utilizado nos ensaios de fluência.

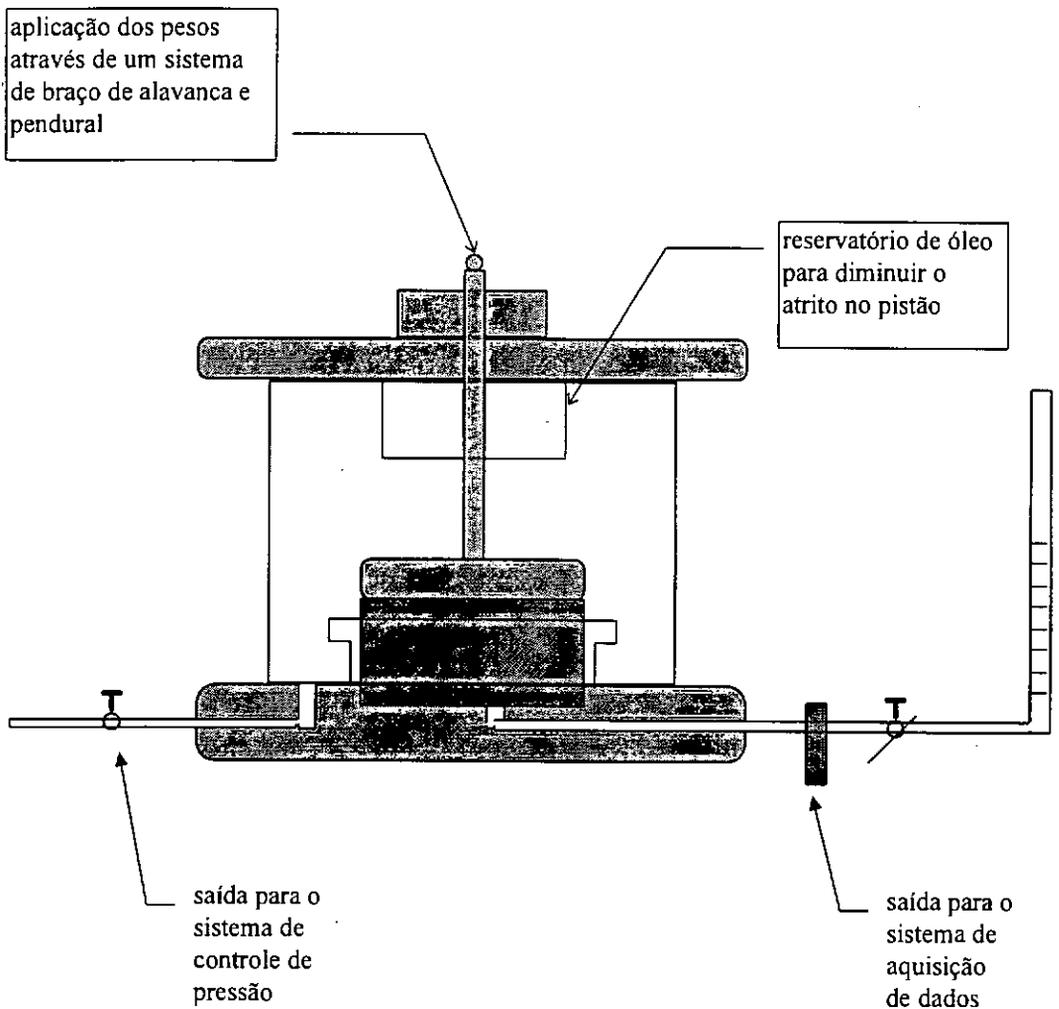


Fig. 3-11 - Detalhe da célula 2 utilizada nos ensaios de fluência.

A célula denominada 2, foi projetada de forma a permitir que se executassem os ensaios de adensamento à temperatura controlada com medida de poro-pressão na base. Dentro da célula há uma serpentina de cobre que conduz água quente de forma a manter a temperatura na célula constante. A água circula através da serpentina e retorna à uma cuba de isopor, onde estão instalados 2 aquecedores e uma pequena bomba. A temperatura da célula e os aquecedores são controlados durante o ensaio pelo termostato dos aquecedores.

3.5.2 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados no anel biselado de 15 cm de diâmetro com auxílio de um torno e fio de aço. Após a modelagem, o corpo de prova foi introduzido no anel

fixo da célula. O anel fixo foi preenchido com água para que não houvesse ar comprimido no sistema. Abriu-se a válvula de drenagem para saída da água e pressionando-se uma placa circular de acrílico no topo desceu-se lentamente o corpo de prova conforme apresentado na Fig. 3-12. A junção anel biselado/anel fixo foi usinada de forma a se diminuir o atrito.

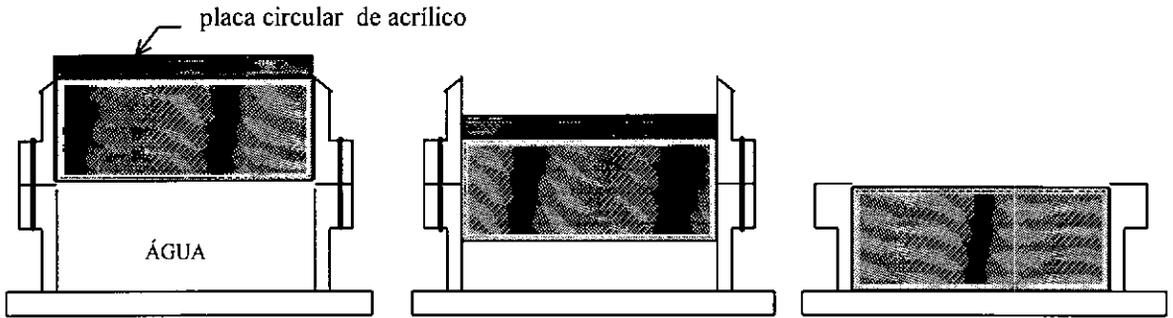


Fig. 3-12 - Desenho esquemático da preparação das amostras dos ensaios de fluência.

3.5.3 Descrição dos ensaios de fluência

Os ensaios foram executados às temperaturas de 20°C, 5°C e 50°C. O primeiro ensaio foi executado à temperatura ambiente controlada do laboratório (20°C), o segundo e terceiro ensaios foram executados dentro da câmara fria do Laboratório de Mecânica do Gelo (5°C) e o quarto e o quinto ensaios foram executados no Lab. de Geotecnia (50°C).

Em todos os ensaios os corpos de prova foram submetidos a carregamentos de 50, 80 e 160 kN/m², sendo que na última fase de carregamento manteve-se a tensão aplicada constante por cerca de um mês.

No primeiro ensaio preencheu-se a célula de água sem contra-pressão, com a válvula de drenagem fechada, somente com aplicação do peso do pistão. Após uma noite nestas condições, não observou-se vazamento ou qualquer anomalia. Aplicou-se uma contra-pressão de 100 kPa e o peso do braço e pendural ($\approx 50 \text{ kN/m}^2$), deixando-se nestas condições por 24h. Aplicou-se então o segundo carregamento de 80 kN/m² que foi mantido por 24 horas para então aplicar-se o carregamento de 160 kN/m². Este carregamento foi mantido por um mês até que se alcançasse a velocidade de deformação vertical específica de 10^{-9} s^{-1} . No primeiro

carregamento ocorreu vazamento em uma das válvulas, mas como o nível de tensão ainda era muito baixo não se observou deformação significativa devido a isto.

No segundo e no terceiro ensaio (OED.2 e 3), executou-se o primeiro carregamento a 20°C, para que se tivesse sempre uma mesma referência. Após 24h submetidos a carga de 50kN/m² variou-se a temperatura da câmara para 5°C e deixou-se nestas condições por 24h para que todo o sistema estivesse a 5°C, quando então aplicou-se a carga de 80kN/m². O ensaio OED.2 apresentou uma curva tensão-deformação muito semelhante a do ensaio OED.1 e portanto resolveu-se executar um novo ensaio a 5°C (OED.3). Cerca de uma semana antes da data prevista para a interrupção do OED.2, ocorreu um acidente com uma das válvulas e a contra-pressão caiu a quase zero no período da noite. Não se pode avaliar o que ocorreu neste período em termos de tensão efetiva, mas sabe-se que ela aumentou a valores próximos ao carregamento mais a contrapressão. Observou-se que o corpo de prova deformou de 9% a 11.3%. No dia do acidente, a velocidade de deformação vertical específica era de aproximadamente $5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$ e utilizou-se os resultados para comparação somente até esta data.

No ensaio OED.3 procedeu-se de forma similar ao ensaio OED.2 e deixou-se o carregamento de 160kN/m² por cerca de um mês até que se atingisse uma velocidade de deformação vertical específica de aproximadamente 10^{-9} s^{-1} , quando então se variou a temperatura para 20°C deixando-se nestas condições por mais duas semanas.

Foram executados dois ensaios a 50°C - OED 4 e 5. No ensaio OED. 4, em virtude da alta temperatura utilizada no ensaio, ocorreu vazamento de óleo do pistão, após 4 dias de ensaio, sob 50°C . Utilizou-se um óleo mais viscoso e refez-se o ensaio - OED. 5, que foi executado até a velocidade de 10^{-9} s^{-1} .

O cálculo da tensão média efetiva foi elaborado de forma análoga ao dos ensaios CRSC. Para o cálculo das velocidades de deformação vertical específica em cada ponto α , calculou-se a derivada por aproximação em cada ponto, dada por:

$$\dot{\varepsilon}_v(\varepsilon_\alpha) = \frac{(\varepsilon_{\alpha+1} - \varepsilon_\alpha)}{(t_{\alpha+1} - t_\alpha)} + \frac{(\varepsilon_\alpha - \varepsilon_{\alpha-1})}{(t_\alpha - t_{\alpha-1})} - \frac{(\varepsilon_{\alpha+1} - \varepsilon_{\alpha-1})}{(t_{\alpha+1} - t_{\alpha-1})} \quad (3-4)$$

Desta forma pode-se fazer a comparação dos resultados obtidos nos ensaios CRSC e de fluência de acordo com o modelo proposto por Leroueil et al.(1985), descrito na Revisão Bibliográfica. Na Fig. 3-13 apresenta-se o esquema do ensaio OED 3, executado a 5C.

OED 3

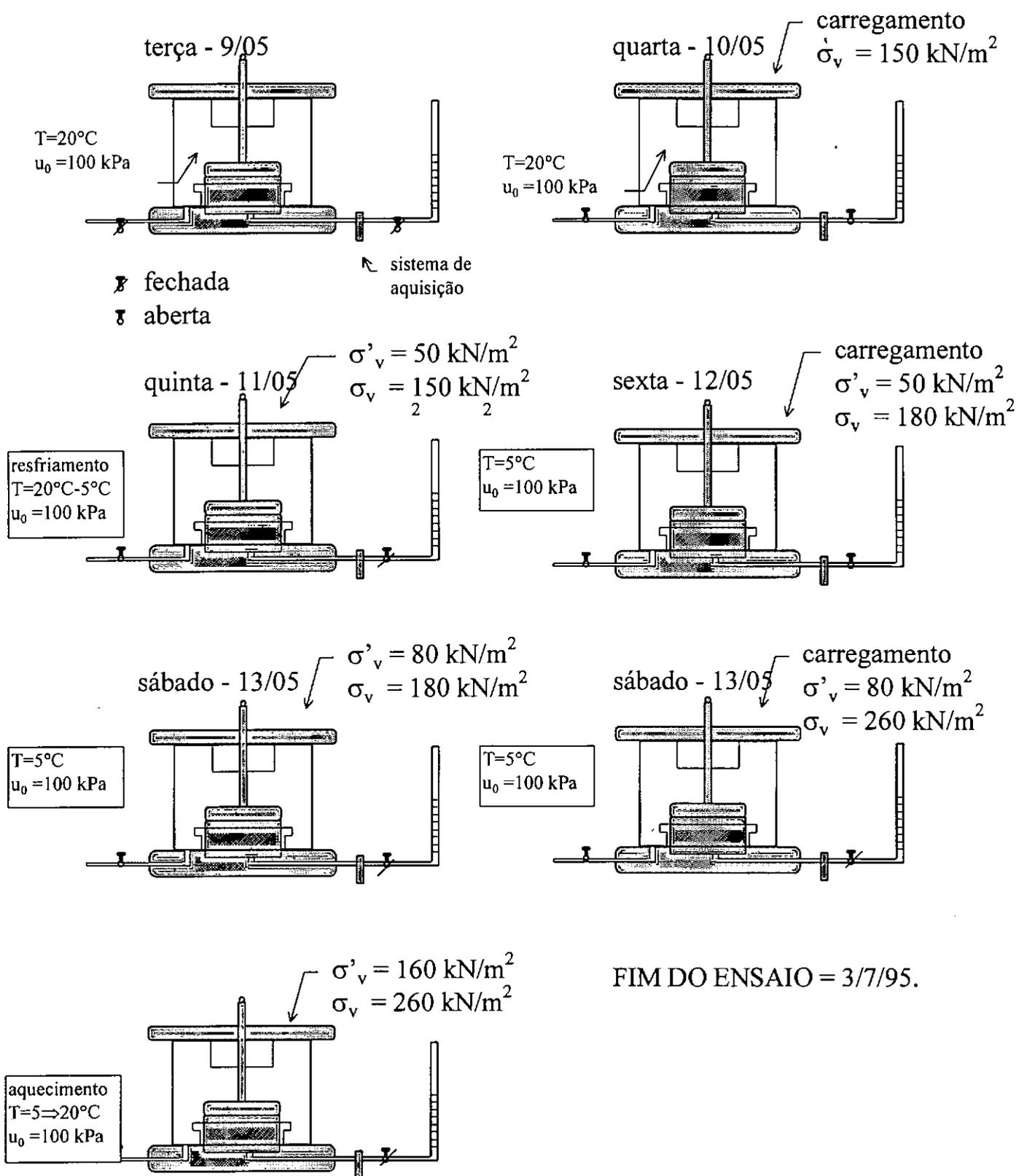


Fig. 3-13 - Esquema do ensaio de fluência OED 3.

3.6 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS EDMÉTRICOS CONVENCIONAIS

3.6.1 Descrição dos ensaios

Os ensaios de adensamento convencionais foram executados em células edométricas de 5cm de diâmetro e 2cm de altura, tipo Bishop conforme descrito por Head (1994). O carregamento foi executado com incrementos de tensão de $\Delta \sigma_v / \sigma_v = 0.5$.

Foram executados 3 ensaios convencionais cujos corpos de prova foram moldados a partir dos corpos de prova, ao fim dos ensaios de fluência.. Dando continuidade ao trabalho de pesquisa, prevê-se a execução de ensaios convencionais numa fase posterior com a utilização dos corpos de prova dos ensaios OED 4 e 5, bem como a execução de um convencional a temperatura ambiente de 20°C em argila natural.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Analisaram-se os resultados dos ensaios considerando-se apenas a influência da velocidade de deformação ou da temperatura separadamente. Com isto, os ensaios foram separados em grupos de ensaios de mesma temperatura, para velocidades de deformação variável (efeito de $\dot{\epsilon}_v$ - Leroueil et al.-1985) ou ensaios de mesma velocidade de deformação e temperatura variável (efeito de T - Boudali et al. -1994).

Na análise foram considerados os efeitos da variação de $\dot{\epsilon}_v$ ou T nos índices de vazios, tensão de sobreadensamento, compressibilidade volumétrica (m_v), poro-pressão e condutividade hidráulica. Para cada grupo de ensaios elaborou-se a curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}) \times e$, analisando-se cada ensaio individualmente.

Nos ensaios CRSC13, 14 e 16 executados nas argilas japonesas de Ariake e Osaka, e nos ensaios CRSC5 e CRSC12, executados na argila Saint Polycarpe, analisou-se somente o efeito da temperatura, uma vez que as velocidades destes ensaios foram de $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Nos ensaios de fluência, por tratarem-se de ensaios em que a velocidade de deformação não é controlada, procedeu-se a análise da influência da temperatura na deformação e tensão de sobreadensamento. Elaborou-se a curva $\log \dot{\epsilon}_v \times e$, onde se analisa a evolução da velocidade de deformação à medida que o solo se deforma. Com isto pode-se comparar os resultados dos ensaios de fluência e dos ensaios CRSC.

Finalmente, elaborou-se a curva normalizada considerando-se o efeito da velocidade de deformação e da temperatura em todos os ensaios, CRSC e de fluência para a argila de Saint Polycarpe. Para as argilas japonesas não se dispõe no momento de ensaios em número suficiente, porém serão objeto de estudo posterior.

Apresenta-se na Tabela 4-1 o quadro resumo dos resultados dos ensaios realizados, contendo a descrição dos ensaios e resumo de resultados obtidos nos ensaios CRSC realizados na argila de Saint Polycarpe.

ARGILA DE SAINT POLYCARPE

| ENSAIO | PROF. (m) | UMIDADE (%) | INDICE DE VAZIOS INICIAL | VEL. DE DEF. (s ⁻¹) | TEMP. (°C) | β _s (°) | β _c (°) | C _s | C _c | σ' _p (kN/m ²) mét. direto | σ' _p (kN/m ²) Butterfield |
|---------------------|--------------|----------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------|-----------------------|-----------------------|----------------|----------------|--|--|
| ENSAIOS CRSC | | | | | | | | | | | |
| CRSC1 | 7.58 | 60.46 | 1.707 | 2 x 10 ⁻⁶ | 20 | 0.8 | 7.9 | 0.0145 | 0.1391 | 128 | 129 |
| CRSC2 | 7.58 | 60.71 | 1.700 | 1.7 x 10 ⁻⁷ | 20 | 0.5 | 10.3 | 0.0087 | 0.1816 | 118 | 119 |
| CRSC3 | 7.79 | 60.59 | 1.719 | 1.7 x 10 ⁻⁵ | 20 | 0.5 | 8.6 | 0.0083 | 0.1507 | 146 | 147 |
| CRSC4 | 7.79 | 59.68 | 1.709 | 2 x 10 ⁻⁶ | 50 | 0.4 | 7.4 | 0.0077 | 0.1296 | 118 | 115 |
| CRSC7 | 8.21 | 57.68 | 1.641 | 1.7 x 10 ⁻⁷ | 5 | 0.4 | 7.9 | 0.0070 | 0.1380 | 146 | 143 |
| CRSC9 | 8.38 | 57.05 | 1.608 | 2 x 10 ⁻⁶ | 5 | 0.5 | 7.7 | 0.0094 | 0.1358 | 156 | 157 |
| CRSC17 | 8.45 | 54.14 | 1.551 | 1.7 x 10 ⁻⁵ | 5 | 0.3 | 8.2 | 0.0052 | 0.1436 | 169 | 173 |
| CRSC18 | 7.79 | 58.22 | 1.674 | 1.7 x 10 ⁻⁵ | 50 | 0.7 | 8.1 | 0.0121 | 0.1415 | 124 | 123 |
| CRSC19 | 8.45 | 54.3 | 1.560 | 2 x 10 ⁻⁶ | 20 | 0.4 | 7.3 | 0.0069 | 0.1290 | 132 | 133 |
| CRSC20 | 8.45 | 54.71 | 1.569 | 1.7 x 10 ⁻⁷ | 50 | 0.4 | 6.7 | 0.0064 | 0.1174 | 107 | 108 |

Tabela 4.1 - Quadro resumo dos resultados dos ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe.

4.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO NO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

Na Fig. 4-1 estão apresentadas as curvas tensão-deformação vertical específica obtida nos três ensaios CRSC executados a 20°C. É usual no Canadá e Suécia a apresentação dos resultados de ensaios edométricos em argilas sensíveis em gráficos $\sigma'_v \times e$ e ao invés de $\log \sigma'_v \times e$. Para os ensaios descritos nesta dissertação utilizou-se também esta forma de apresentação.

Ao analisar-se o conjunto de dados dos ensaios programados, observou-se algumas discrepâncias entre os resultados obtidos nos ensaios CRSC. Algumas curvas tensão-deformação vertical específica apresentaram valores de deformações maiores que o esperado, valores que aumentavam à medida que a umidade das amostras ensaiadas aumentava. Para verificar esta hipótese refez-se o ensaio executado a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; 20°C em uma amostra com umidade natural diferente - ensaio CRSC 19.

Obteve-se, no ensaio CRSC 19, uma curva tensão-deformação diferente do primeiro ensaio executado a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; 20°C - CRSC 1. Ao se comparar os resultados destes dois ensaios com o CRSC12 à mesma velocidade e temperatura, observa-se a existência de três séries de resultados, uma para amostras com umidade natural em torno de 55%, outra com umidade em torno de 58% e outra com umidade em torno de 60%, ou seja, índices de vazios iniciais significativamente diferentes.

Para possibilitar uma visão global do efeito temperatura e velocidade de deformação vertical específica e considerar esta variação natural das amostras, os resultados foram analisados em função do índice de vazios e não da deformação vertical específica, uma vez que segundo o modelo proposto por Leroueil et al.(1985) pode-se descrever o comportamento de uma argila por duas curvas em função do índice de vazios e velocidade de variação do índice de vazios ou em função da deformação vertical específica e da velocidade de deformação vertical específica: $\sigma'_p(\dot{e}) \times e$; $\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{e}) \times e$ ou $\sigma'_p(\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v$; $\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon}_v) \times \epsilon_v$.

CRSC 1,12 E 19 - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

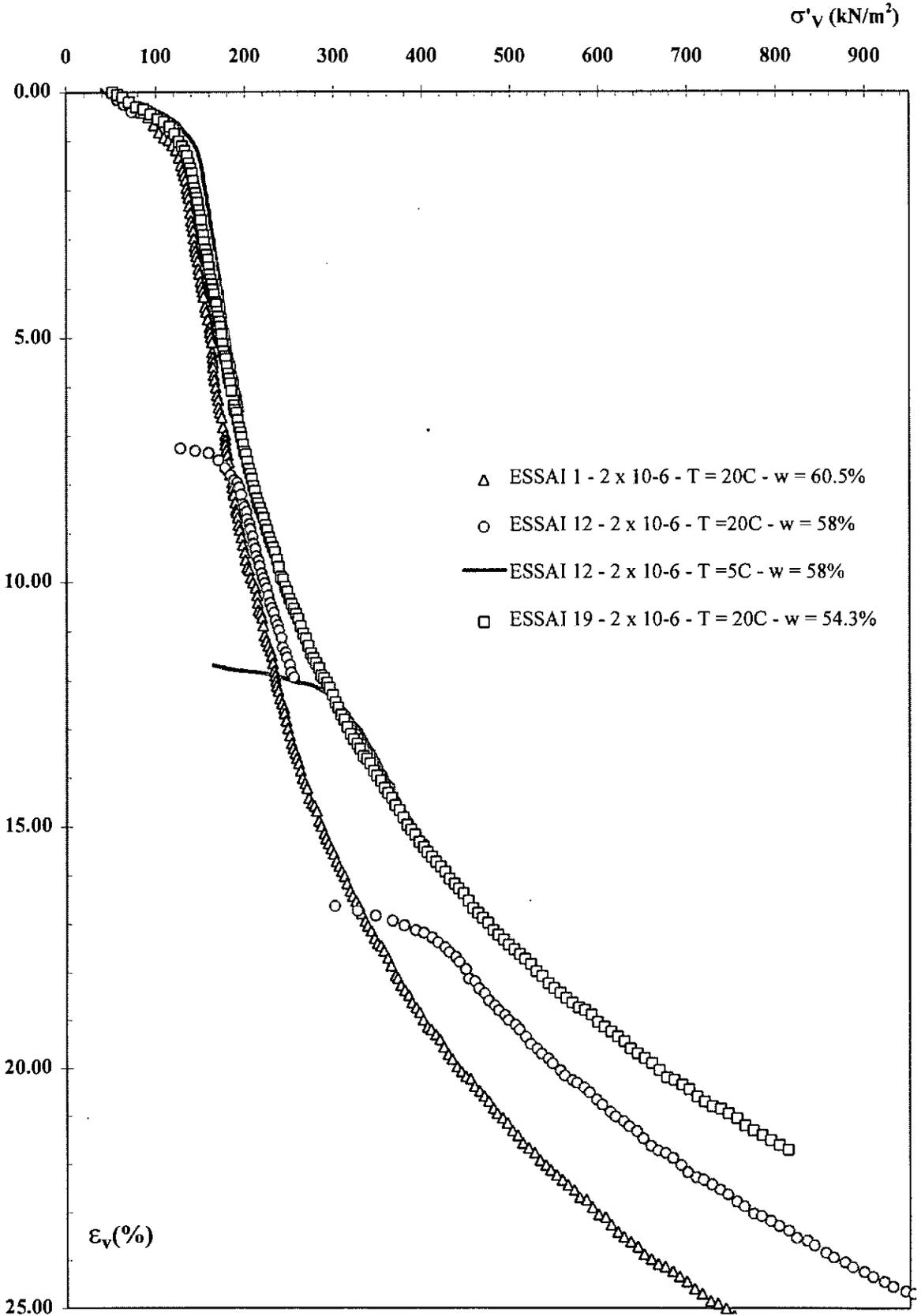


Fig. 4-1 - Tensão efetiva média x deformação vertical efetiva - ensaios CRSC a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20°C. Argila de Saint Polycarpe.

Entretanto a velocidade de variação do índice de vazios é obtida a partir da velocidade de deformação vertical específica do corpo de prova e do índice de vazios inicial da amostra, dado por:

$$\varepsilon_v = - e / (1+e_0)$$

$$\dot{e} = - \frac{\delta \varepsilon_v}{\delta t} (1 + e_0)$$

Para os ensaios realizados sob mesma velocidade de deformação vertical específica, CRSC 1,19 e 12, por exemplo, as velocidades de variação dos índices de vazios destes ensaios seriam $5.40 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $5.29 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e $5.11 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Considerou-se, portanto que uma velocidade de deformação vertical específica corresponde a uma mesma velocidade de variação de índice de vazios e a análise dos resultados foi elaborada em termos de índice de vazios e velocidade de deformação vertical específica.

Quando se faz referência à velocidade de deformação vertical, está se considerando como velocidade de deformação vertical específica o valor da velocidade da prensa ou velocidade de variação da altura do corpo de prova, isto é $\partial H / \partial t$, quando na realidade a velocidade de deformação específica é dada por:

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{1}{H(t)} \times \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4-1)$$

Para valores pequenos de deformação utilizar-se a altura do corpo de prova como constante ao longo do tempo é razoável. Entretanto para grandes valores de deformação esta consideração é inadequada. Por exemplo para uma velocidade da prensa de 0.0024 mm/min, para uma altura de amostra de 20 mm tem-se uma velocidade de deformação de $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, entretanto após uma deformação de 20% esta velocidade será de $2,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Para deformações de 50%, que ocorrem por exemplo para a argila de Sarapuí quando submetida a carregamentos de cerca de 400kPa (Feijó - 1991), a velocidade seria de $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, ou seja o dobro do valor. Na realidade tratam-se de ensaios CRD ou seja Constant Rate of Deformation.

Portanto quando se faz referência a ensaios de adensamento CRSC, deve-se levar em consideração, para a análise de grandes deformações a variação da velocidade de deformação específica com a variação da altura do corpo de prova. Nesta série de ensaios, a deformação vertical específica máxima da maioria dos ensaios é de 25%, e portanto este efeito foi desprezado.

4.2.1 Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva

Apresenta-se da Fig. 4-2 a Fig. 4-7 comparação dos resultados obtidos para os ensaios CRSC considerando-se apenas o efeito da variação da deformação vertical específica no adensamento unidimensional da argila de Saint Polycarpe. Para se efetuar a análise dos resultados considerando-se somente a variação da velocidade, comparam-se os resultados de ensaios realizados à mesma temperatura.

Sob $T = 5^{\circ}\text{C}$, a curva σ'_v x e do ensaio realizado a $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ não só intercepta a curva de $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ como apresenta aumento de resistência à medida que o ensaio prossegue. Os ensaios executados sob $T = 5^{\circ}\text{C}$ apresentam poro-pressões dentro do previsto, aumentando numa proporção de 10 quando a razão da velocidade dos ensaios que estão sendo comparados é de 10.

Para $T = 20^{\circ}\text{C}$, o ensaio CRSC 19 apresenta um índice de vazios inicial bem inferior ao dos demais ensaios, entretanto sua curva σ'_v x e é quase coincidente com a do ensaio CRSC 1. É possível que ao se calcular o índice de vazios do ensaio CRSC 1, não tenha sido considerado o fato do anel não estar bem apoiado no fundo da célula, explicando portanto a pequena diferença observada nas duas curvas. Isto foi observado para o primeiro ensaio e corrigido para os demais, ao se pressionar o anel no fundo da célula com uma placa de acrílico.

As curvas σ'_v x e dos ensaios executados a velocidades $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (CRSC1) e $1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ (CRSC2), estão coincidentes. As amostras utilizadas nestes ensaios apresentam índices de vazios inicial próximos e em relação aos valores de poro-pressão medidos, obtiveram-se valores razoáveis.

O ensaio CRSC 2 foi executado até uma ε_v de cerca de 18% portanto não se consegue saber se a curva σ'_v x ε_v se mantém coincidente com a do ensaio CRSC1 para índices de vazios menores. Aparentemente estes resultados não se devem a problemas com medidas de poro-pressão pois tanto os dados de poro-pressão quanto os de permeabilidade estão satisfatórios.

Para $T = 50^\circ\text{C}$, os ensaios apresentam curvas σ'_v x ε_v e praticamente coincidentes. Isto indica uma preponderância do efeito da temperatura sobre o efeito da velocidade de deformação.

De uma forma geral para as temperaturas ensaiadas as curvas σ'_v x ε_v são coincidentes para as velocidades mais baixas,. Em ensaios executados em argilas da região de Champlain, Leroueil et al. (1985) observaram também este fenômeno, prevendo a possibilidade de uma estruturação do solo para baixas velocidades. Atualmente pesquisas nesta linha estão em curso na Universidade Laval (Perret-1995), entretanto o fenômeno está ainda sendo objeto de discussão.

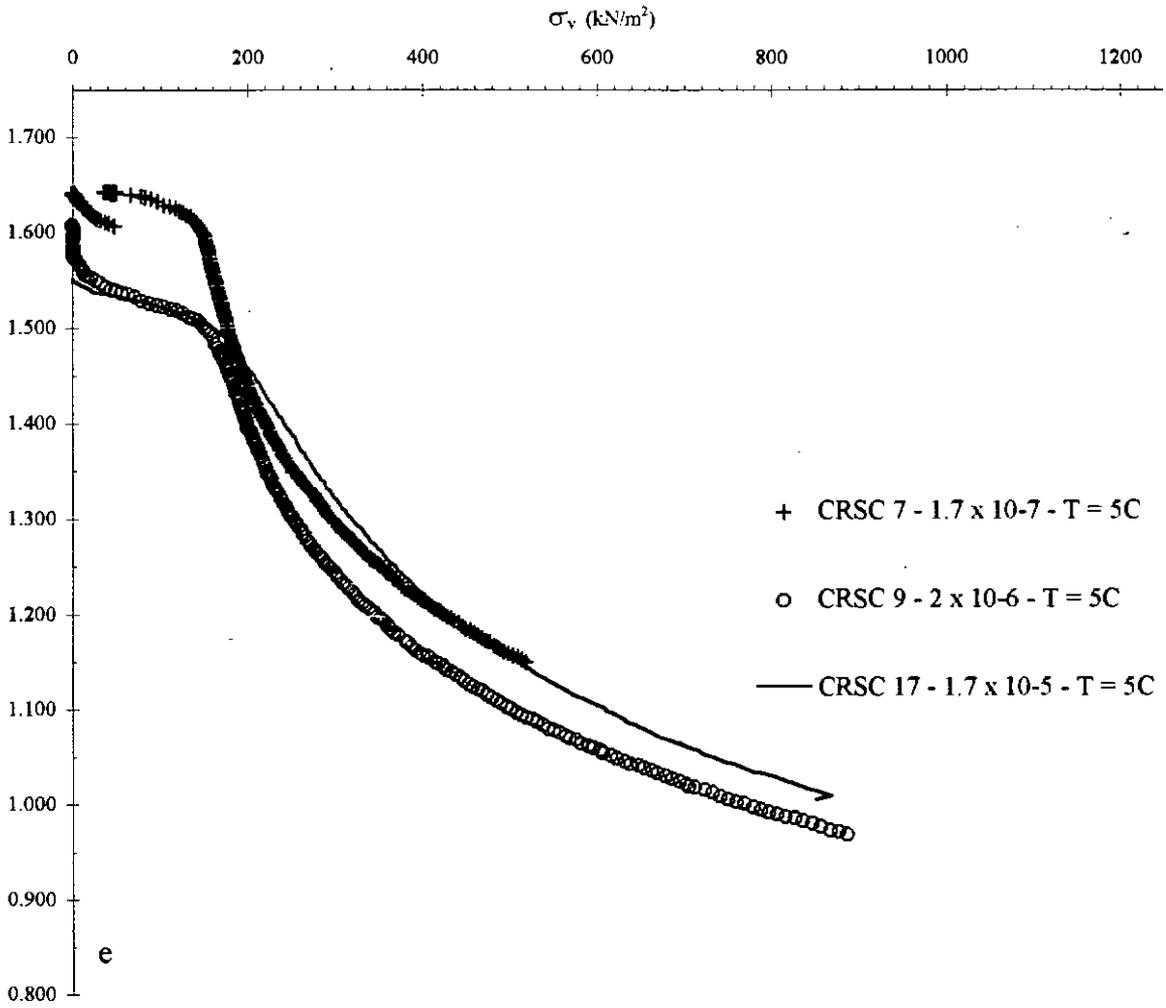


Fig.4-2 $-\sigma'_v$ x e - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; $T = 5^\circ\text{C}$ - ensaios CRS. Argila de Saint Polycarpe.

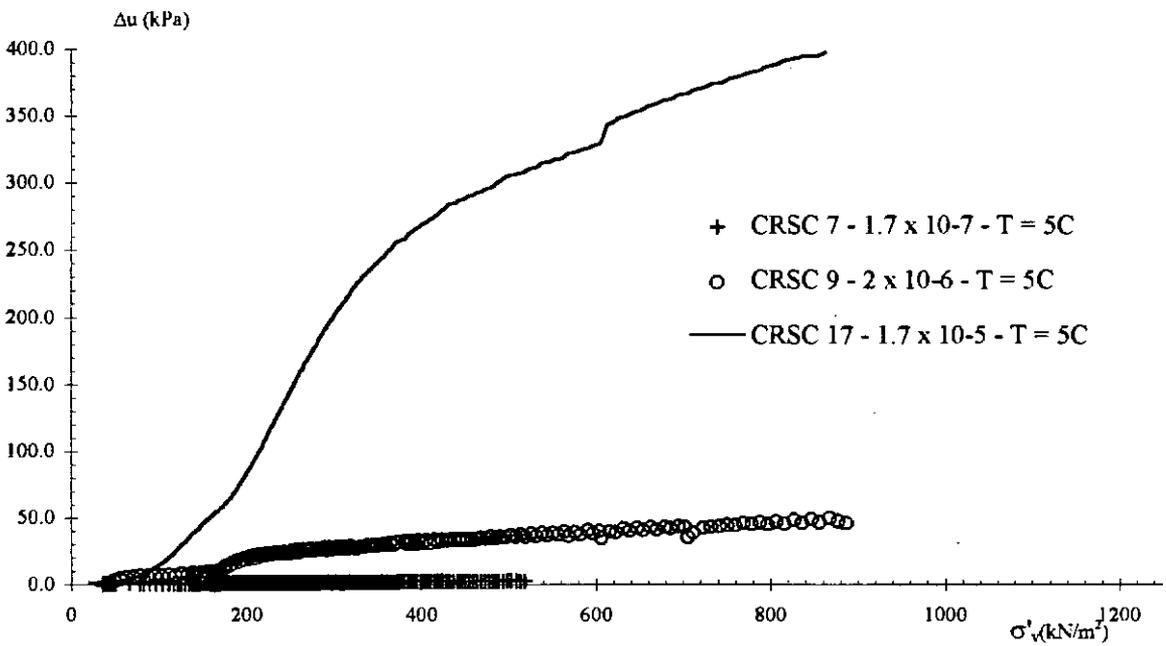


Fig.4-3 - σ'_v x Δu_b - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; $T = 5^\circ\text{C}$ - ensaios CRS. Argila de Saint Polycarpe.

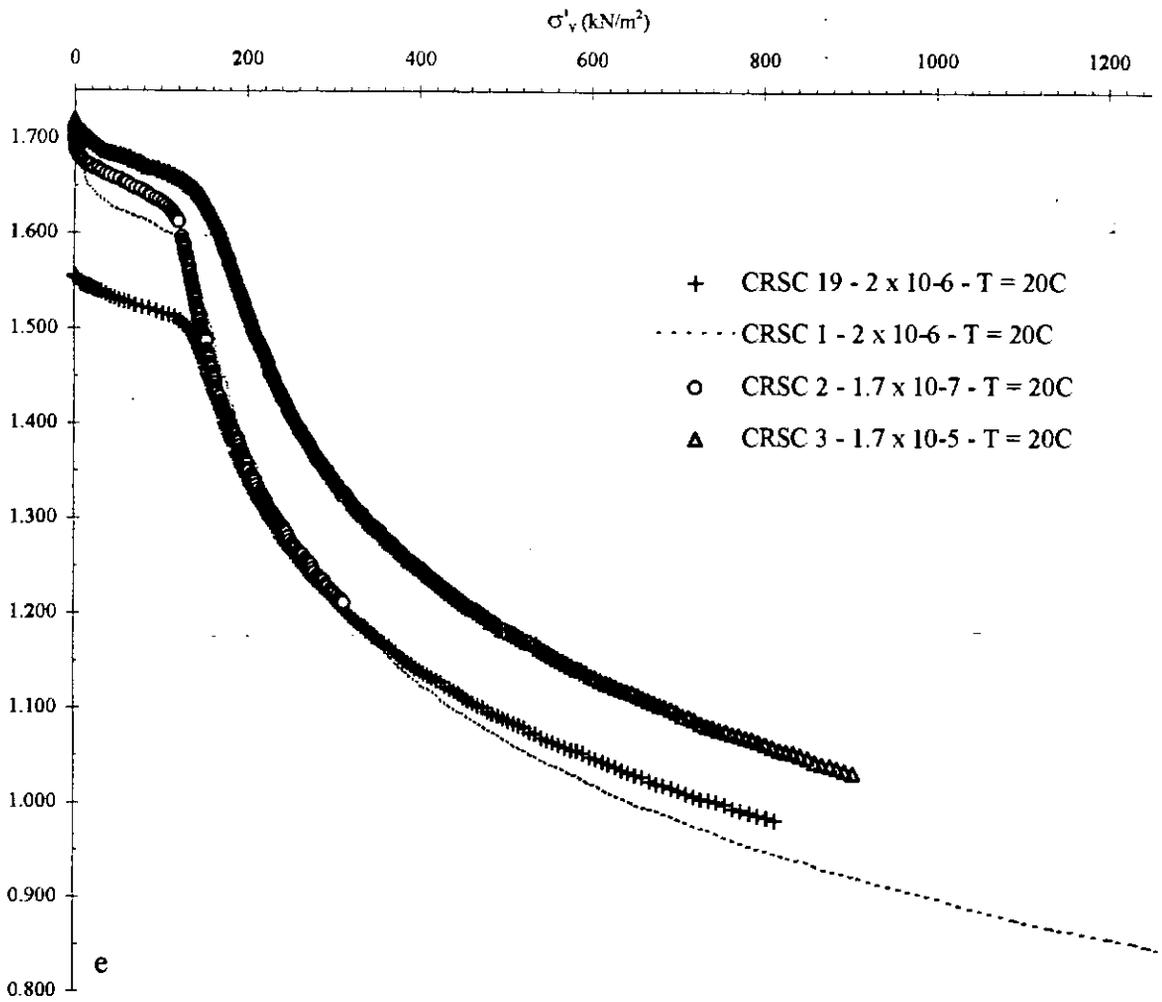


Fig.4-4 - $\sigma'_v \times e$ - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; T = 20° C - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

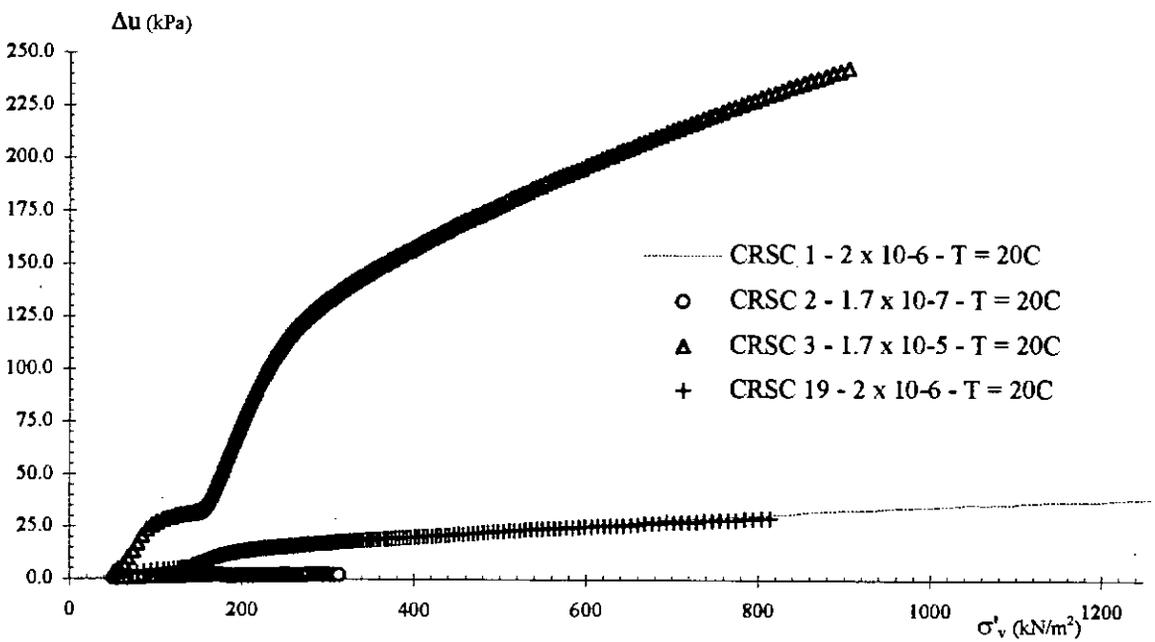


Fig.4-5 - $\sigma'_v \times \Delta u_b$ - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; T = 20° C - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

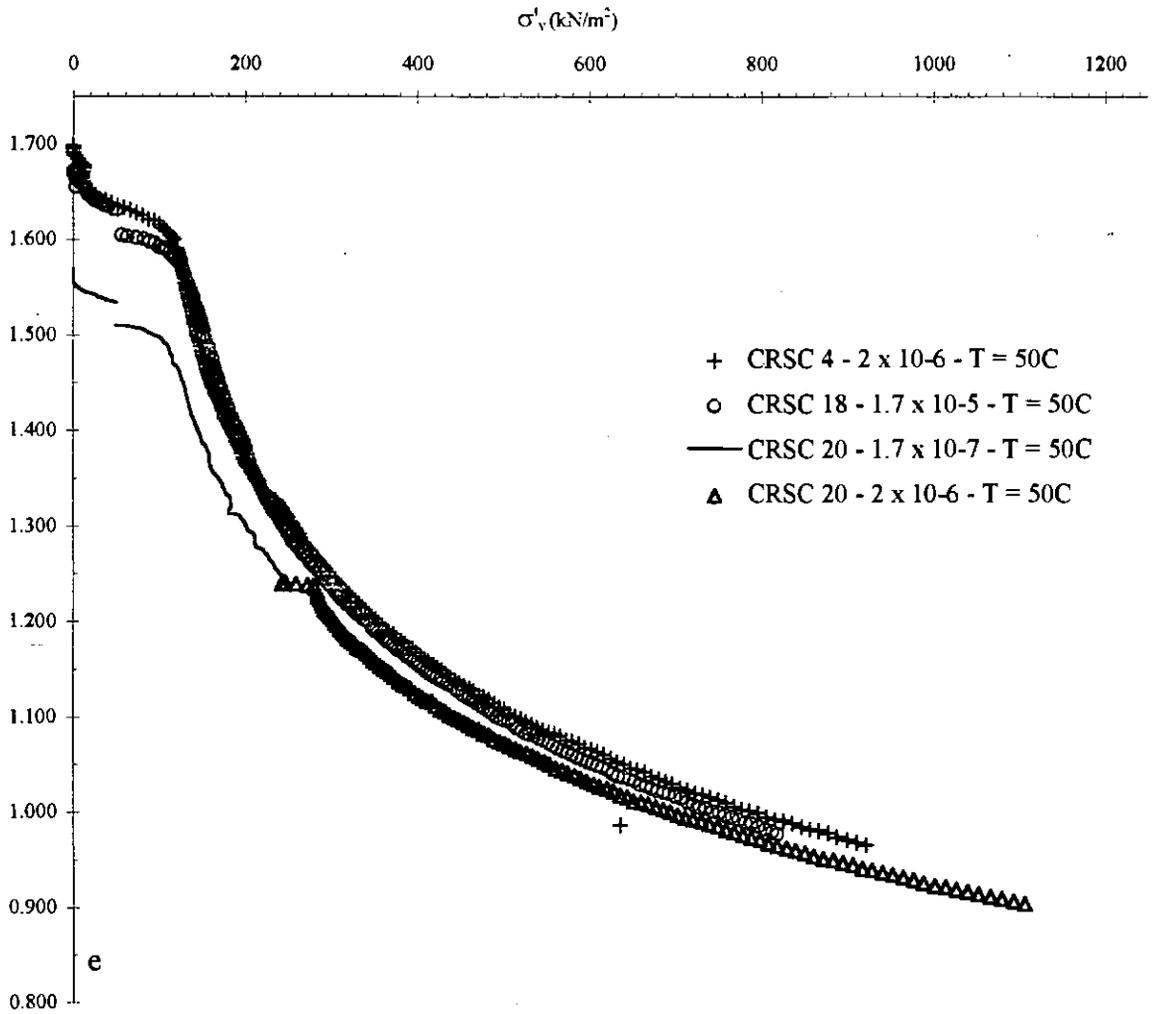


Fig.4-6 - $\sigma'_v \times e$ - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; $T = 50^\circ\text{C}$ - ensaios CRS. Argila de Saint Polycarpe.

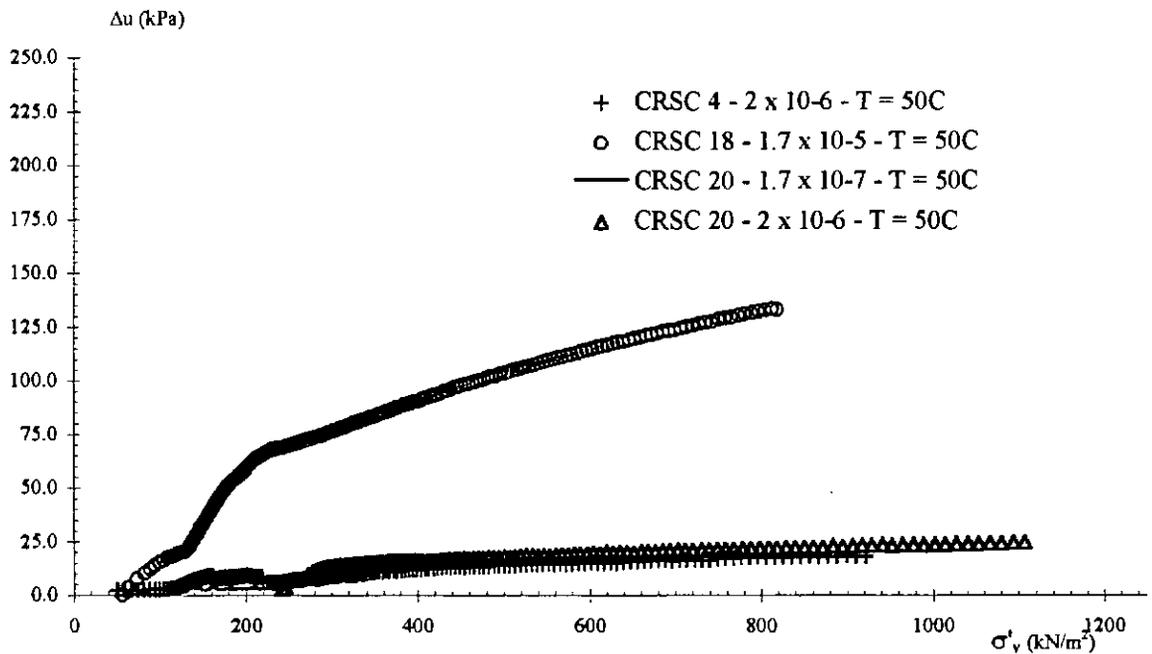


Fig.4-7 - $\sigma'_v \times \Delta u_b$ - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável}$; $T = 50^\circ\text{C}$ - ensaios CRS. Argila de Saint Polycarpe.

4.2.2 Tensão de sobreadensamento

Nas Fig. 4-8 e Fig. 4-9 apresenta-se a variação do m_v com a velocidade de deformação. Para velocidades de deformação maiores a passagem do trecho sobreadensado para o trecho normalmente adensado da curva $m_v \times \sigma'_v$ apresenta-se mais suave, e indicando valores de tensão de sobreadensamento maiores.

As tensões de sobreadensamento destes ensaios foram calculadas com base nos resultados destas curvas, de acordo com o proposto por Butterfield (1979). No ponto de inflexão da curva $m_v \times \sigma'_v$, a tensão vertical efetiva corresponde à tensão de sobreadensamento do solo à temperatura e velocidade utilizada no ensaio.

Os ensaios de adensamento convencionais têm sido os que fornecem valores de tensão de sobreadensamento mais próximos dos obtidos em ensaios de campo, pois são ensaios em que a velocidade de deformação é mais baixa, mais compatíveis com as velocidades de deformação encontradas em campo. Leroueil et al.(1983) ao executarem vários ensaios de campo e laboratório nas argilas de Champlain, propoem uma correlação para as σ'_p in situ e de laboratório, para diversos tipos de ensaios de adensamento, a 20°C, a partir de um coeficiente empírico que as correlaciona, dado por :

$$\sigma'_{pconv} = \sigma'_{plab}/\alpha_2 \quad (4-2)$$

σ'_{pconv} = tensão de sobreadensamento obtida em ensaios oedométricos convencionais;

σ'_{plab} = tensão de sobreadensamento obtida a partir de ensaios especiais de adensamento;

O coeficiente α_2 para os ensaios CRSC variam em função da velocidade de deformação vertical específica, conforme Fig. 4-10. Na Tabela 4-2 correlacionam-se as tensões de sobreadensamento obtidas dos ensaios CRSC com o coeficiente α_2 para obter-se um valor empírico da tensão de sobreadensamento de um ensaio convencional.

Estes resultados indicam uma boa concordância entre os valores da tensão de sobreadensamento obtidos para a argila de Saint Polycarpe, a partir dos ensaios realizados a várias velocidades e temperatura de ensaio de 20°C.

É interessante observar que para a argila brasileira de Sarapuí, embora não se possua um estudo para determinação do valor de α , Carvalho(1989) observou concordância entre os valores de tensão de sobreadensamento obtidos em ensaios CRSC e ensaios convencionais.

A tensão de sobreadensamento obtida em um ensaio de adensamento unidimensional CRSC depende da velocidade e da temperatura do ensaio. De modo análogo, a resistência do solo obtida em ensaios de resistência depende da velocidade de deformação vertical específica e da temperatura do ensaio.

Ao se comparar os resultados obtidos, apresentados na Fig. 4-11, para a tensão de sobreadensamento nas velocidades e temperaturas utilizadas, observa-se que o formato das curvas $\sigma'_p(T) \times \log \dot{\epsilon}_v$ é semelhante para as temperaturas utilizadas nos ensaios, e que a tensão de sobreadensamento da argila de Saint Polycarpe decresce com a velocidade de deformação.

CRSC 1, 2 e 3 - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = 20^\circ\text{C}$

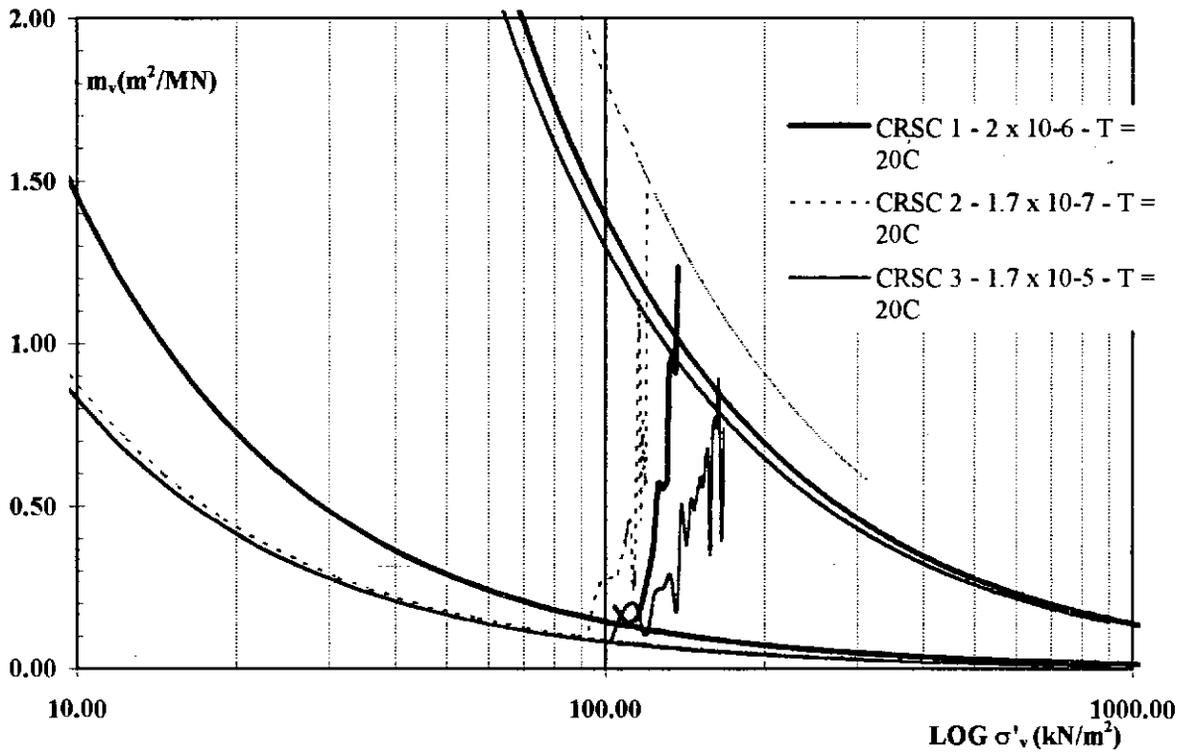


Fig 4-8 - $\text{Log } \sigma'_v \times m_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = 20^\circ\text{C}$ - Argila de Saint Polycarpe

CRSC 7, 9 e 17 - $\dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = 5^\circ\text{C}$

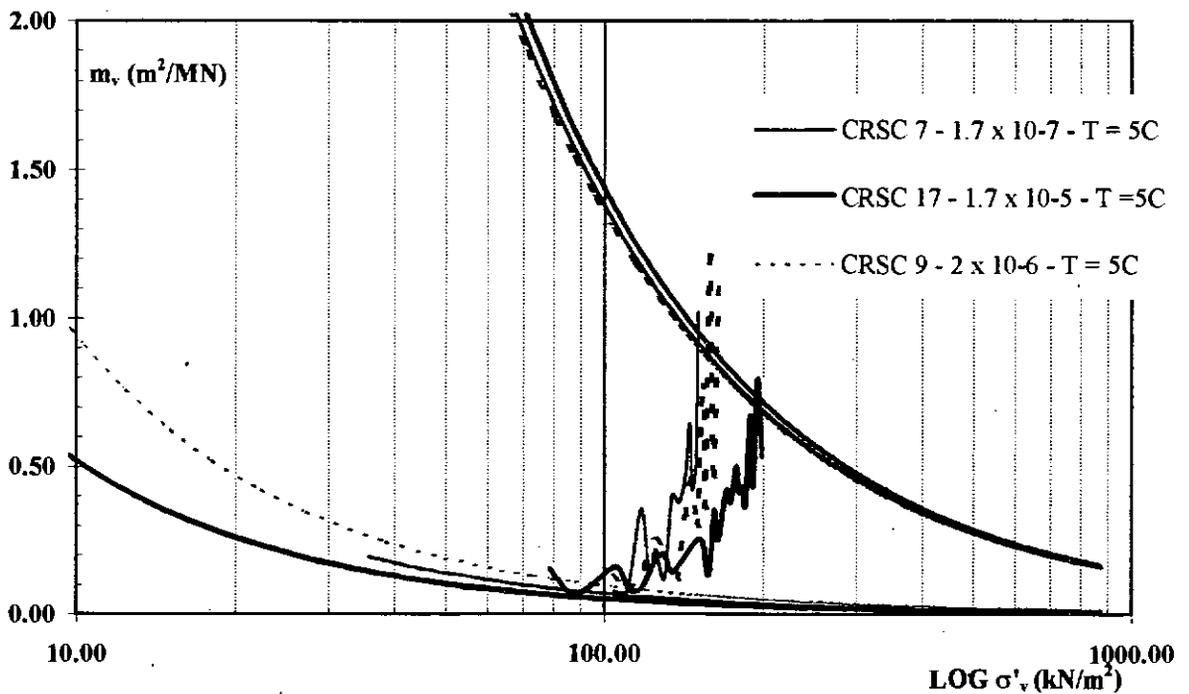


Fig 4-9 - $\text{Log } \sigma'_v \times m_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = 5^\circ\text{C}$ - Argila de Saint Polycarpe

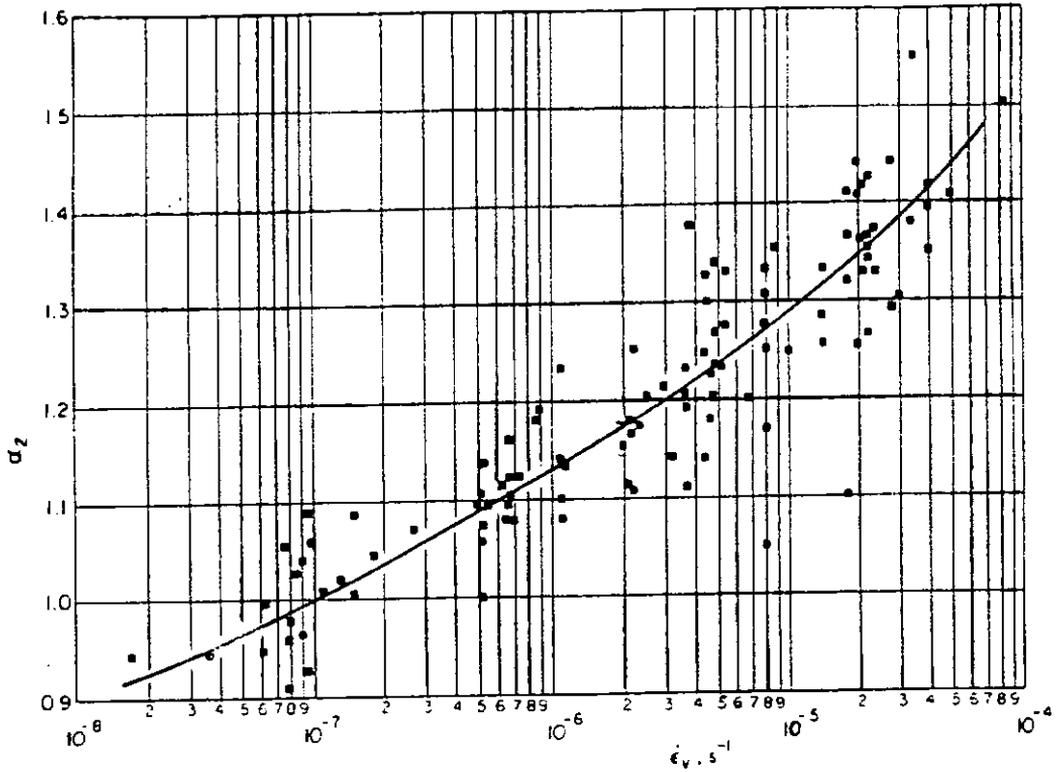


Fig. 4-10 - Variação do coeficiente α_2 com a velocidade de deformação vertical específica, para as argilas da região de Champlain. Leroueil et al.(1983).

No gráfico $\log \sigma'_p(T)$ x $\log \dot{\epsilon}_v$, apresentado na Fig. 4-12 observa-se uma relação retilínea entre o log da tensão de sobreadensamento e o log da velocidade de deformação.

Tabela 4-2 - Tensão de sobreadensamento: ensaios especiais / ensaios convencionais- Argila de Saint Polycarpe.

| Ensaio | $\dot{\epsilon}_v$ (s ⁻¹) | α_2 (obtida da Fig. 4-10) | σ'_p (kN/m ²) | $\sigma'_{pconv.}$ (kN/m ²) |
|--------|--|--|-------------------------------------|--|
| CRSC1 | 2×10^{-6} | 1.17 | 129 | 110 |
| CRSC2 | 1.7×10^{-7} | 1.03 | 115 | 111 |
| CRSC3 | 1.7×10^{-5} | 1.34 | 147 | 110 |

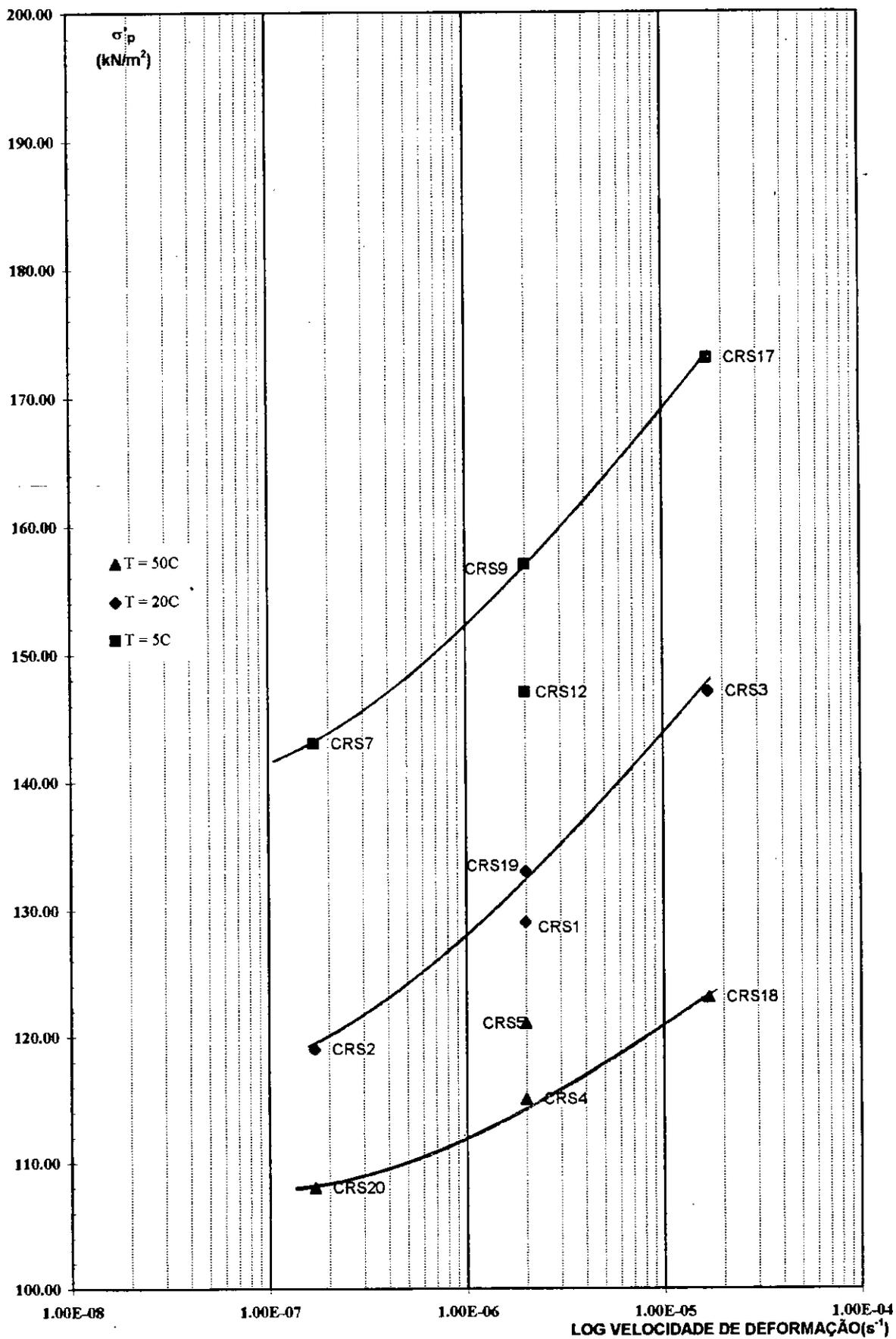


Fig. 4-11- σ'_p ($\dot{\epsilon}_v, T$) x $\log \dot{\epsilon}_v$ -Ensaio CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

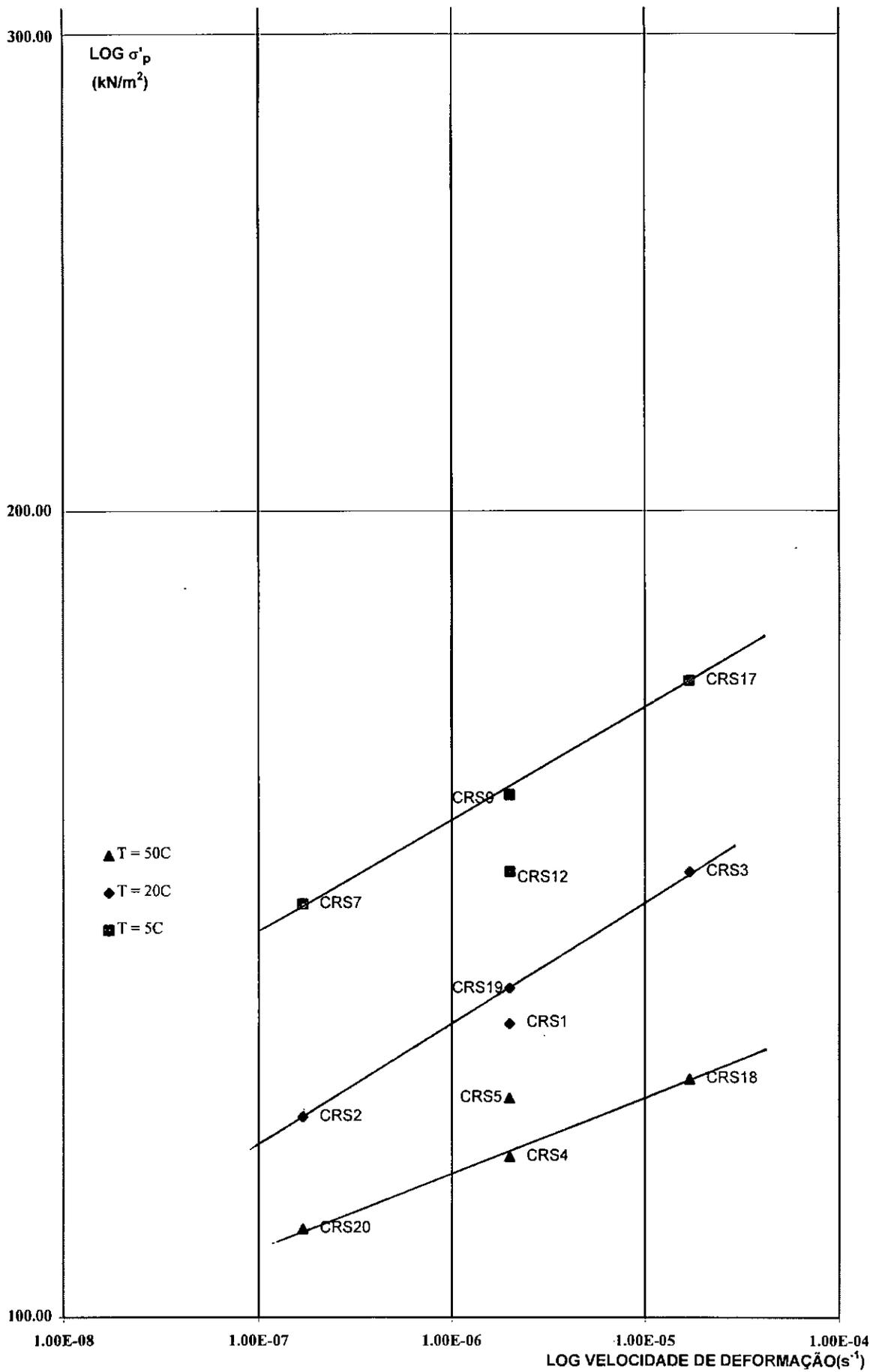


Fig. 4-12- $\log \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times \log \dot{\epsilon}_v$ - Ensaio CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

4.2.3 Normalização dos resultados

Demars & Charles (1982) observaram em ensaios oedométricos, apresentados na Fig. 4-13, que cada solo tem um único valor de variação de índice de vazios em função da variação da temperatura, isto é, a forma das curvas tensão-deformação é a mesma, porém defasadas de um valor constante de Δe . Comparando-se os resultados dos ensaios em Saint Polycarpe, para uma mesma velocidade de deformação vertical específica e temperaturas diferentes, observa-se que após a tensão de sobreadensamento, a relação entre as curvas tensão-deformação também é constante e portanto pode-se normalizá-las.

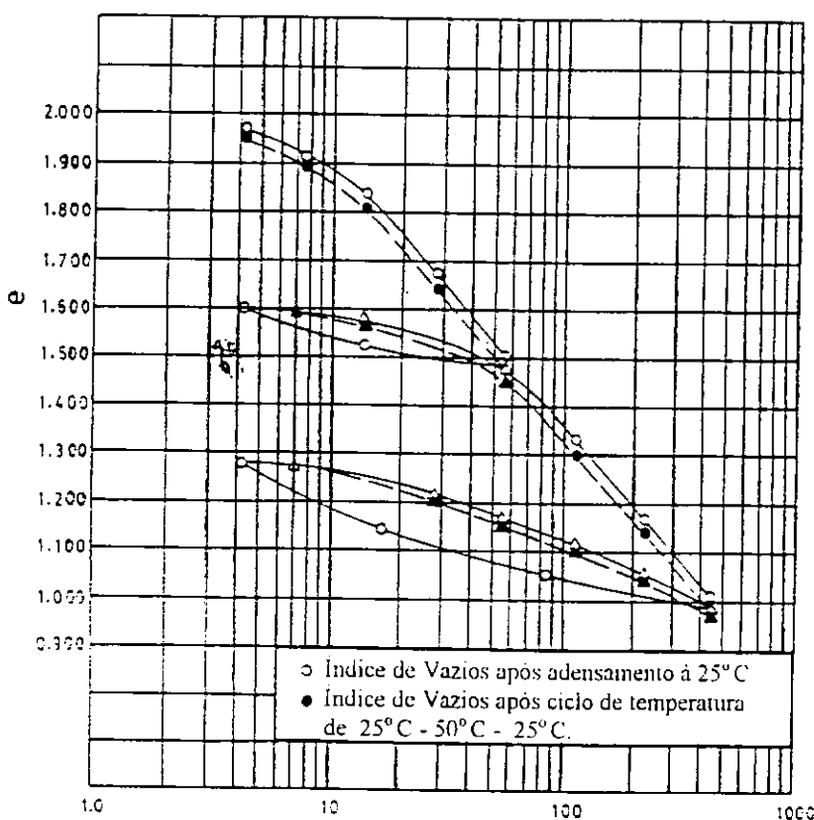


Fig. 4-13- Índice de Vazios x tensão efetiva para ciclos de temperatura de 50°C. Demars & Charles (1982).

Para a comparação destes resultados e verificação da normalização proposta por Leroueil et al.(1985), procedeu-se a normalização das curvas em função da variação da velocidade de deformação Fig. 4-14 à Fig. 4-16.

ENSAIOS CRSC

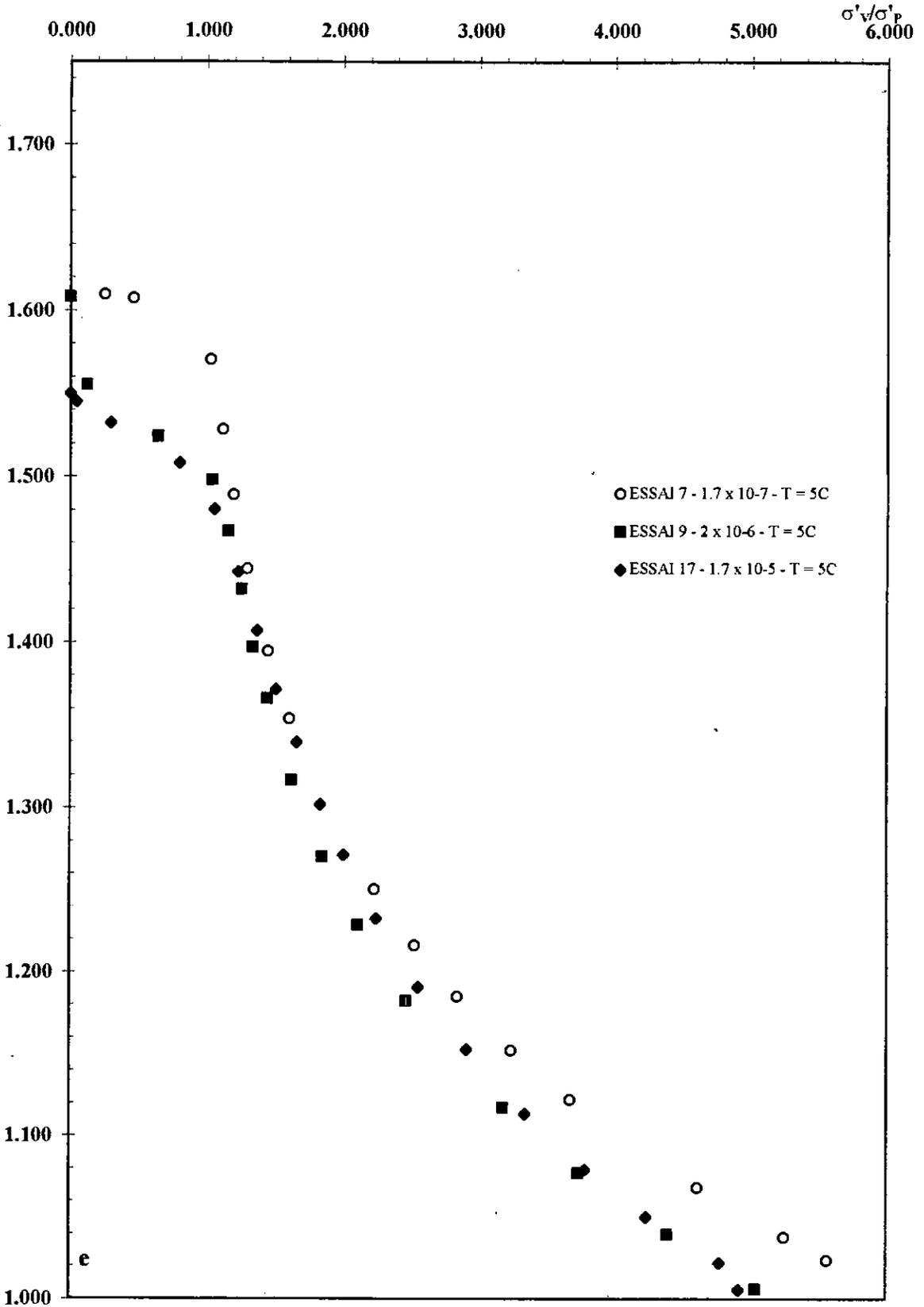


Fig. 4-14- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - T = 5°C - $\dot{\epsilon}_v$ = variável. Argila de Saint Polycarpe.

ENSAIOS CRSC

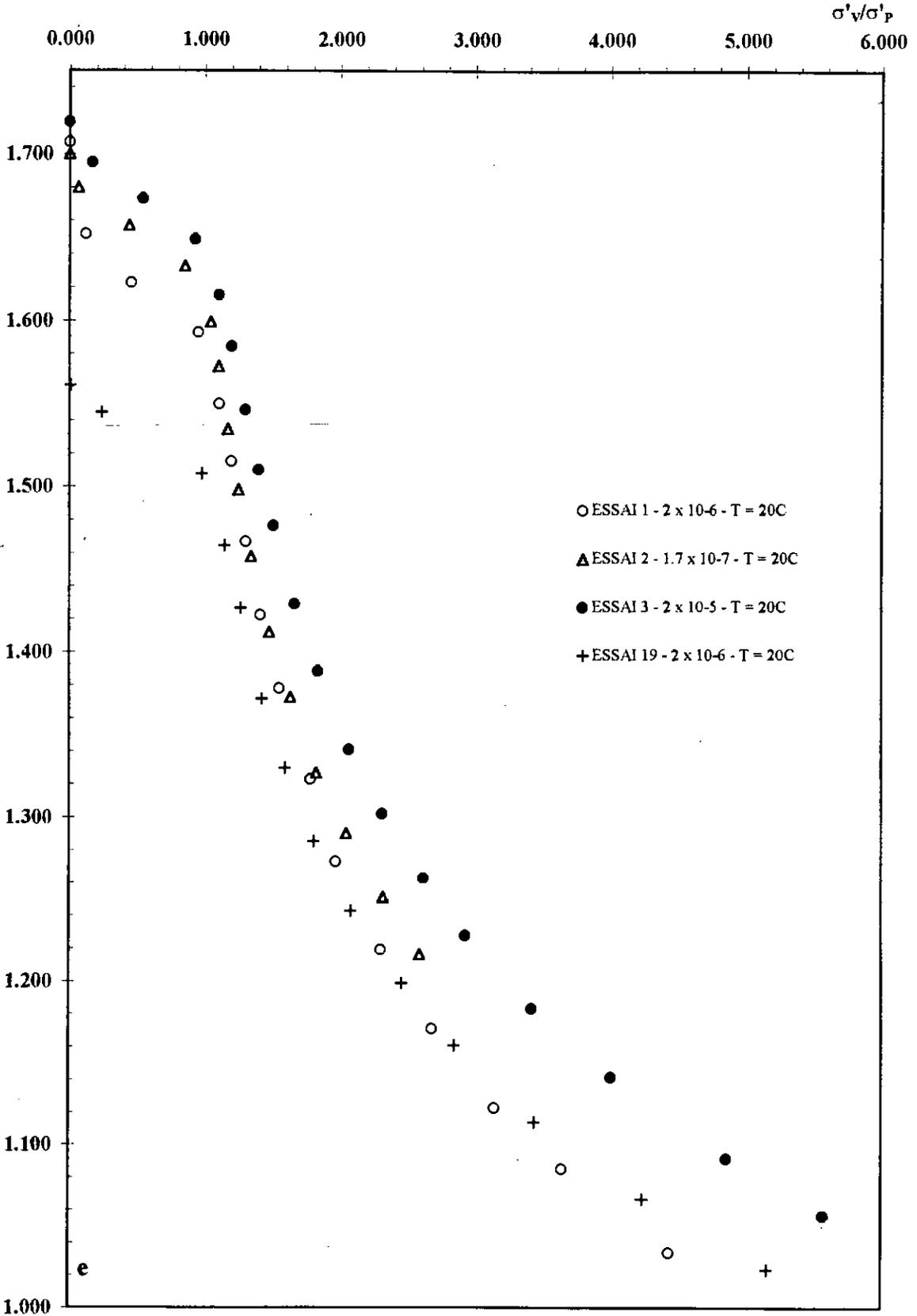


Fig. 4-15- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - $T = 20^\circ\text{C}$ - $\dot{\epsilon}_v$ = variável. Argila de Saint Polycarpe.

ENSAIOS CRSC

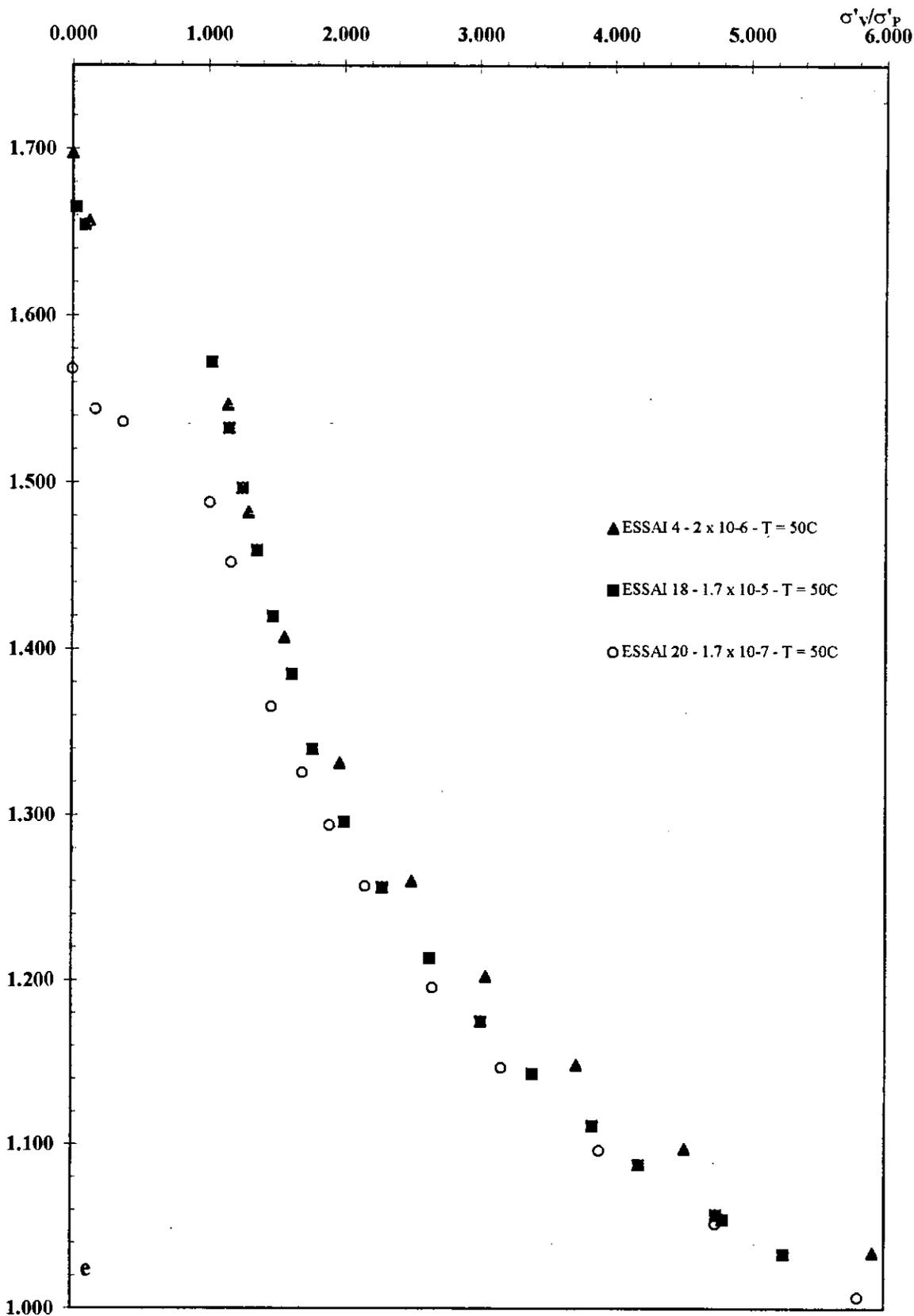


Fig. 4-16- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - $T = 50^\circ C$ - $\dot{\epsilon}_v =$ variável. Argila de Saint Polycarpe.

Na curva normalizada para os ensaios executados à $T = 5^{\circ}\text{C}$, observa-se que o ensaio CRSC 7 apresenta-se um pouco fora da curva normalizada para índices de vazios menores que 1.3. Isto também foi observado por Leroueil et al.(1985) para ensaios executados a baixas velocidades de deformação. Este resultado poderia ser explicado pelo fenômeno da estruturação.

O fenômeno da estruturação seria uma ligação entre as partículas que ocorreria progressivamente, em função da velocidade em que o carregamento é executado. Leonards & Altschaeffl (1964) evidenciaram que durante a compressão secundária argilas moldadas podem desenvolver um aumento de resistência e um aumento da tensão de sobreadensamento, acima do valor esperado relativo à diminuição do índice de vazios.

Leroueil (1995) cita ensaios de adensamento unidimensional executados por Perret (1995) em argilas naturais de Saguenay, com mineralogia similar, mas com uma diferença na quantidade de matéria orgânica (OM). Conclui-se que a presença de matéria inibiria o fenômeno, conforme indica os resultados dos ensaios executados com diferentes valores de OM, apresentados na Fig. 4-17.

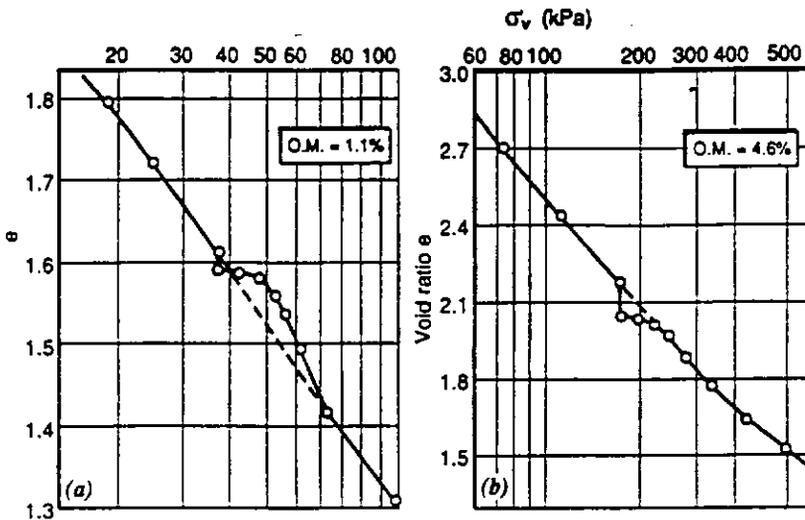


Fig. 4-17 - Influência da compressão secundária na estruturação de sedimentos do Fiorde de Saguenay após 82 dias de carregamento. Perret (1995).

Na curva normalizada da Fig. 4-15 para $T = 20^{\circ}\text{C}$, observa-se que o ensaio CRSC 3, apresenta valores altos de tensão efetiva para mesmo índice de vazios quando comparado com os outros ensaios. Este fato também foi observado por Leroueil et al.(1985) para altas velocidades.

É possível que a consideração do $\alpha = 2/3$ na equação (3.2) da tensão efetiva média seja inadequada. O valor de α varia até um máximo de 1. Como para altas velocidades não há

tempo suficiente para a poro-pressão se dissipar a isócrona de poro-pressão poderia ser da forma da curva tracejada indicada na Fig. 4-18. Com isto os valores de tensão vertical seriam na realidade menores que os calculados.

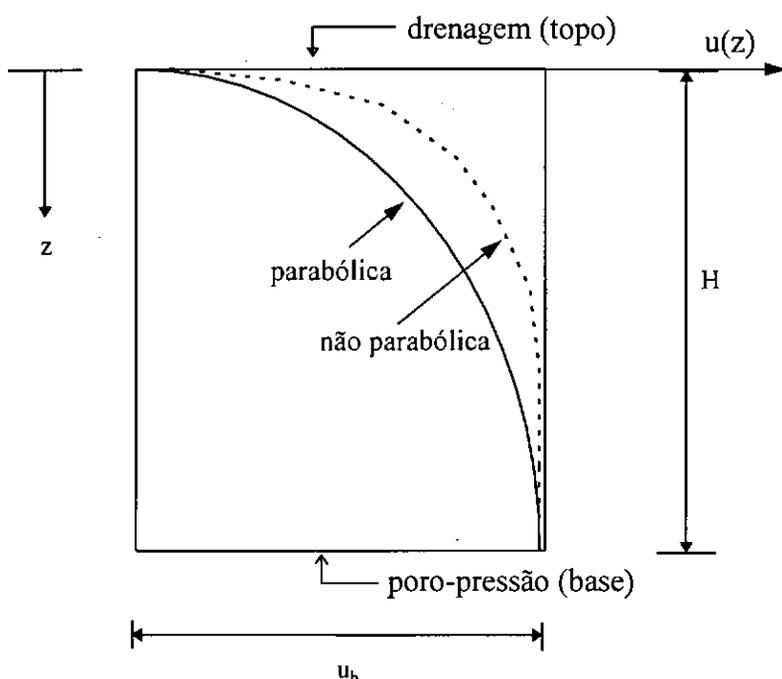


Fig. 4-18 - Esquema da isócrona de poro-pressão para um valor maior de α .

4.2.4 Poro-pressão e condutividade hidráulica

Observa-se em ensaios de adensamento unidimensional CRSC, que o valor da poro-pressão medida na base do corpo de prova aumenta com o aumento da velocidade de deformação vertical específica, para uma temperatura pré-fixada. Todos os ensaios apresentaram resultados compatíveis com os resultados obtidos em argilas da região, submetidas a variação de velocidade (Leroueil - 1985).

A condutividade hidráulica é diretamente proporcional à relação entre a velocidade de deformação vertical específica e a poro-pressão gerada. Para as argilas de Champlain não se observa aumento do seu valor com a velocidade em ensaios CRSC pois a poro-pressão gerada aumenta numa proporção de 10 com o aumento da velocidade nesta mesma proporção, compensando a velocidade (Tavenas et al.-1983), ou seja $\dot{\epsilon}_v / \Delta u_b = \text{constante}$. Portanto é de se esperar que as curvas $\log k \times e$, para temperatura constante, sejam concordantes.

Da Fig. 4-19 a Fig. 4-21 apresentam-se as curvas $\log k \times e$ obtidas para Saint Polycarpe ao se variar a velocidade de deformação. Observou-se que após o trecho

sobreadensado a relação $\log k$ x e é retilínea em função de uma constante ($C = \Delta e / \Delta \log k$). Esta constante varia pouco em função da velocidade e da temperatura para um mesmo solo. A Tabela 4-3 apresenta os valores de C obtidos para os ensaios CRSC a velocidade e temperatura controlada.

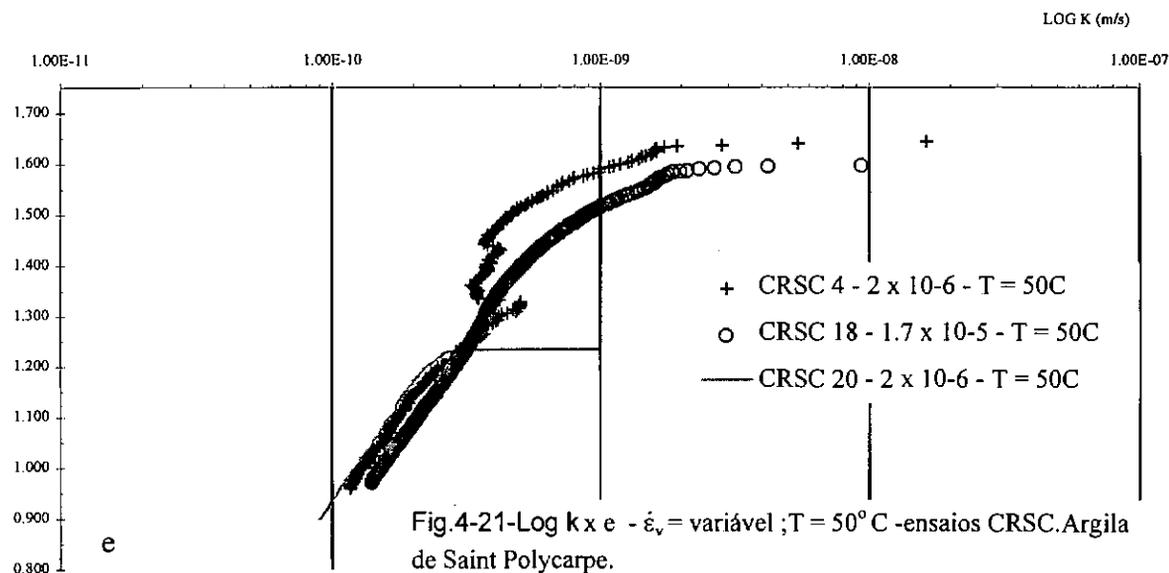
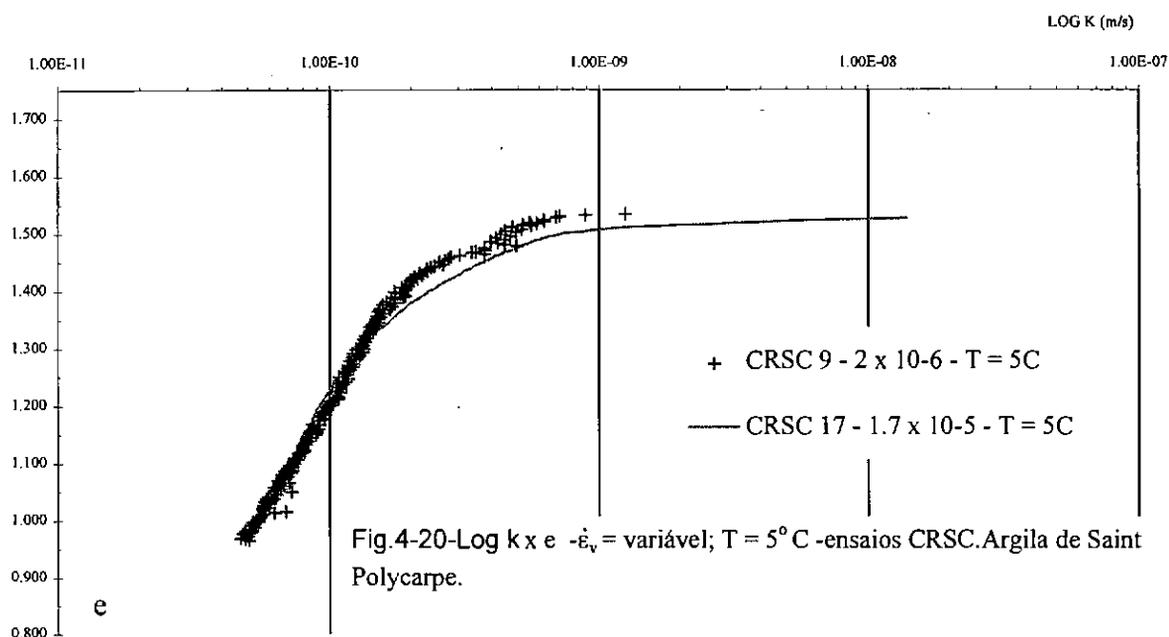
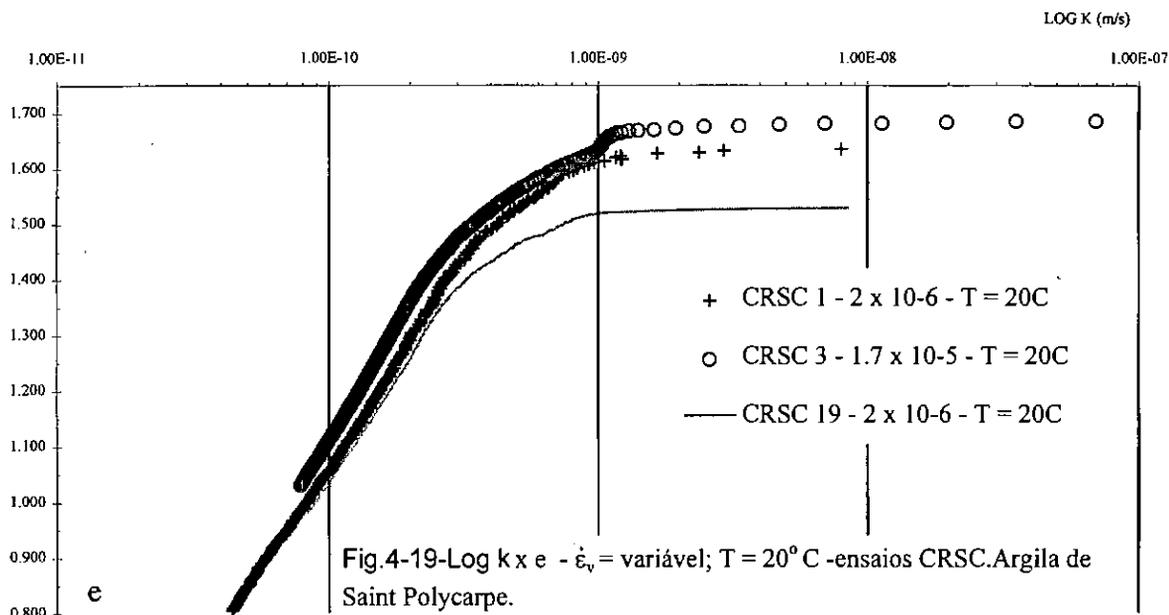
Tabela 4-3 - Valores de C para ensaios CRSC sob temperatura controlada. Argila de Saint Polycarpe.

| ENSAIO CRSC | C | ENSAIO CRSC | C |
|-------------|-------|-------------|-------|
| CRSC 1 | 0.744 | CRSC 17 | 0.821 |
| CRSC 3 | 0.780 | CRSC 18 | 0.764 |
| CRSC4 | 0.774 | CRSC 19 | 0.747 |
| CRSC 9 | 0.770 | | |

Para ensaios executados com velocidades de deformação vertical específica pequenas, por exemplo 10^{-7} s^{-1} , não se consegue obter boas medidas de poro-pressão. Como o carregamento é mais lento, há mais tempo para a dissipação das poro-pressões geradas. Assim a poro-pressão é tão pequena que as tensões aplicada e efetiva são quase as mesmas. Para estes ensaios não se calculou a condutividade hidráulica.

Tavenas et al. (1983) discutem a validade de se calcular a condutividade hidráulica indiretamente em ensaios CRSC. Comparando os resultados obtidos em ensaios CRSC em relação a ensaios de medida direta OEDK (oedométrico com medida de permeabilidade), concluem que a condutividade obtida nestes ensaios é duas vezes maior nas proximidades da tensão de sobreadensamento e de 20 a 40% menor, para índices de vazios menores.

Entretanto, nos ensaios CRSC à temperatura e velocidades controladas, o objetivo ao se determinar a condutividade hidráulica era de se obter uma estimativa que permitisse a comparação da evolução da condutividade frente a uma variação de velocidade e temperatura e também utilizar os resultados de condutividade hidráulica para aferir os demais resultados obtidos.



4.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL

4.3.1 Variação do índice de vazios com a tensão vertical efetiva

Apresenta-se da Fig. 4-22 a Fig. 4-27 a comparação dos resultados obtidos para os ensaios CRSC considerando-se apenas o efeito da variação da temperatura no adensamento unidimensional da argila de Saint Polycarpe. Para a análise dos resultados considerando-se somente a variação da temperatura, comparam-se os resultados de ensaios realizados a mesma velocidade de deformação vertical específica.

Nos ensaios executados a $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ o efeito da temperatura apresenta-se bem caracterizado na curva $\sigma'_v \times e$, já com relação às medidas de poro-pressão, o efeito é menos perceptível em virtude da dificuldade de se medir poro-pressões a esta velocidade. Nos ensaios executados a $\dot{\epsilon}_v = 2.0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ não se observa o efeito da temperatura nas curvas $\sigma'_v \times e$, pois estas se apresentam coincidentes.

No ensaio executado a $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e 5°C (CRSC17) a curva $\sigma'_v \times e$ apresenta-se com valores de índices de vazios muito baixos em comparação com a curva $\sigma'_v \times e$ e do ensaio CRSC3, executado a 20°C . Isto deve-se provavelmente à grande diferença de índice de vazios inicial das duas amostras.

Na Fig. 4-23 observa-se variação brusca da poro-pressão para a temperatura de 50°C . É possível que esta variação seja devida a variação de $\pm 1^\circ\text{C}$ a que o sistema está sujeito.

4.3.2 Tensão de sobreadensamento

Nas Fig. 4-28 e Fig. 4-29 apresenta-se a variação do m_v com a temperatura. Para temperaturas menores a passagem do trecho sobreadensado para o trecho normalmente adensado da curva $m_v \times \sigma'_v$ apresenta-se mais suave, e indicando valores de tensão de sobreadensamento maiores. Observou-se um comportamento análogo às curvas $m_v \times \sigma'_v$ obtidas para maiores velocidades.

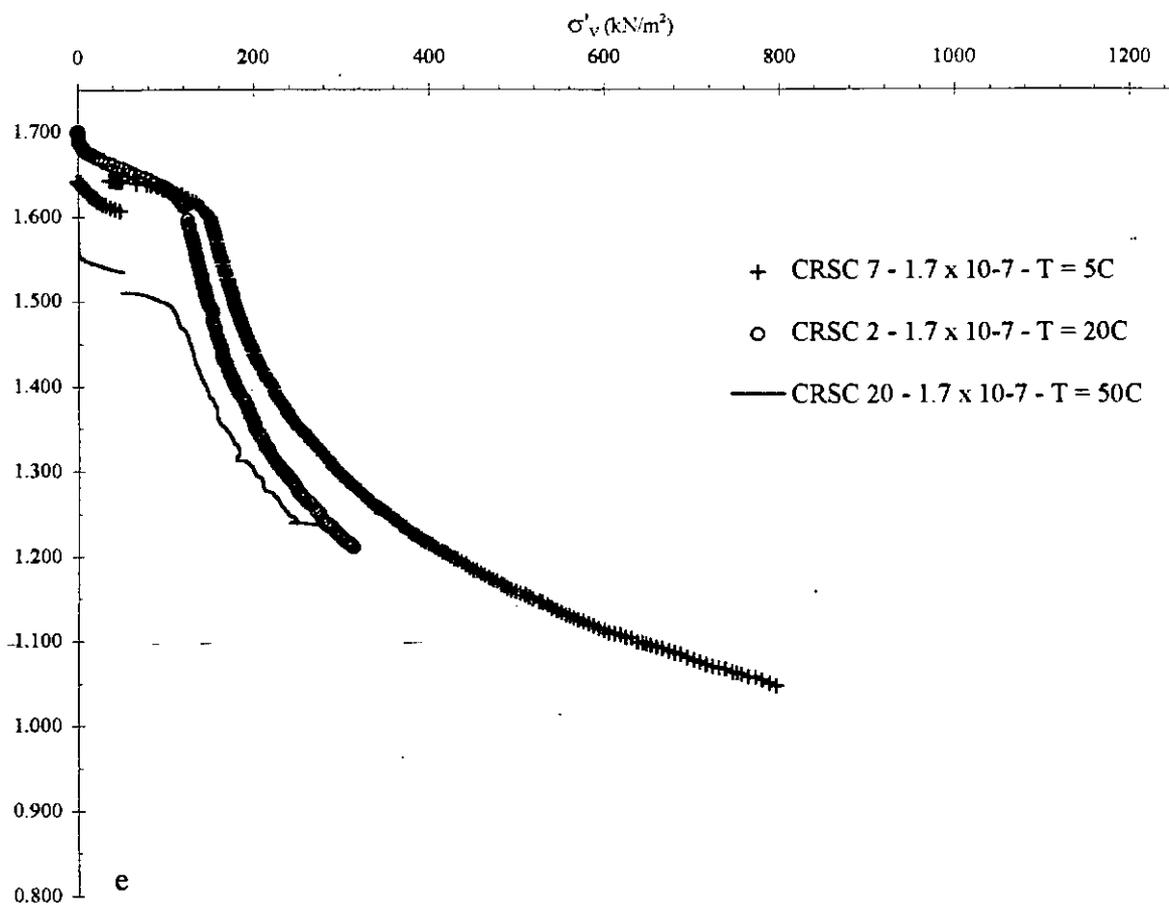


Fig. 4-22 - $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; T = variável - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

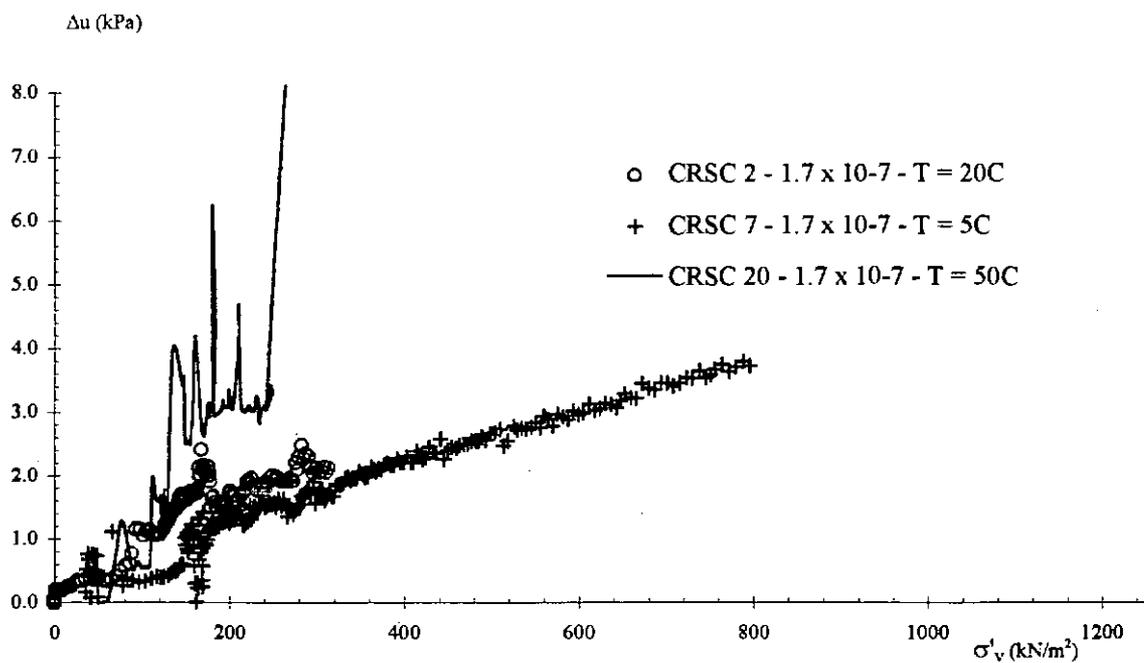


Fig.4-23 - $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; T = variável - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

σ'_v (kN/m²)

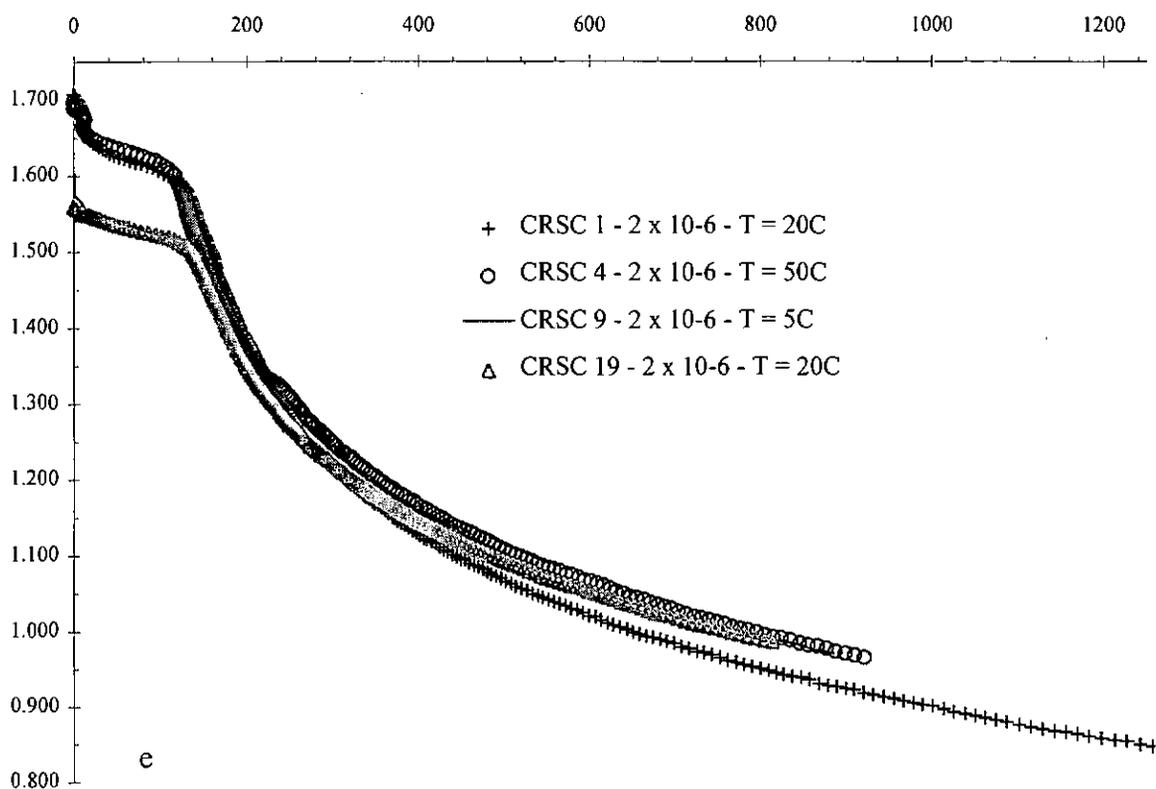


Fig. 4-24- $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} s^{-1}$; $T = \text{variável}$ - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

Δu (kPa)

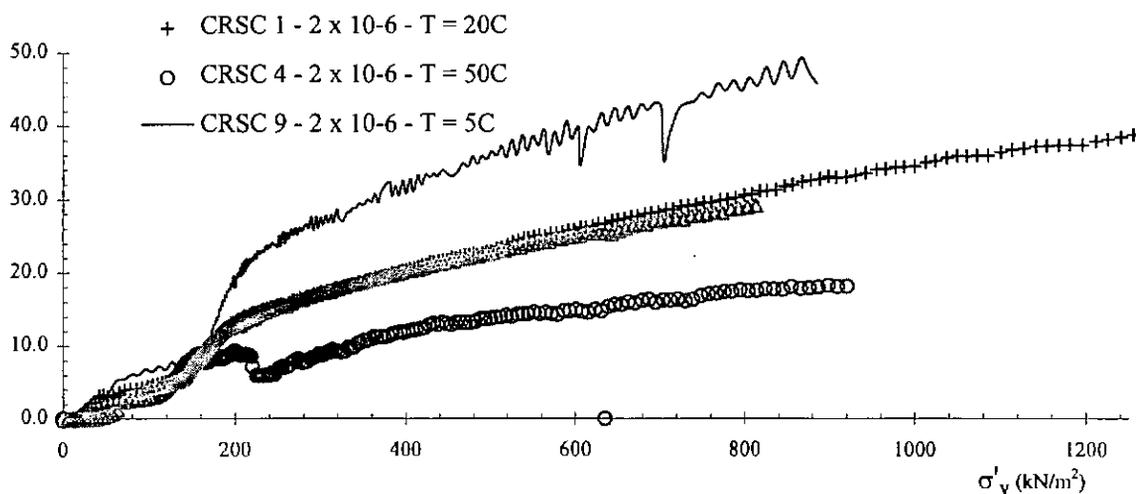


Fig. 4-25- $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} s^{-1}$; $T = \text{variável}$ - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

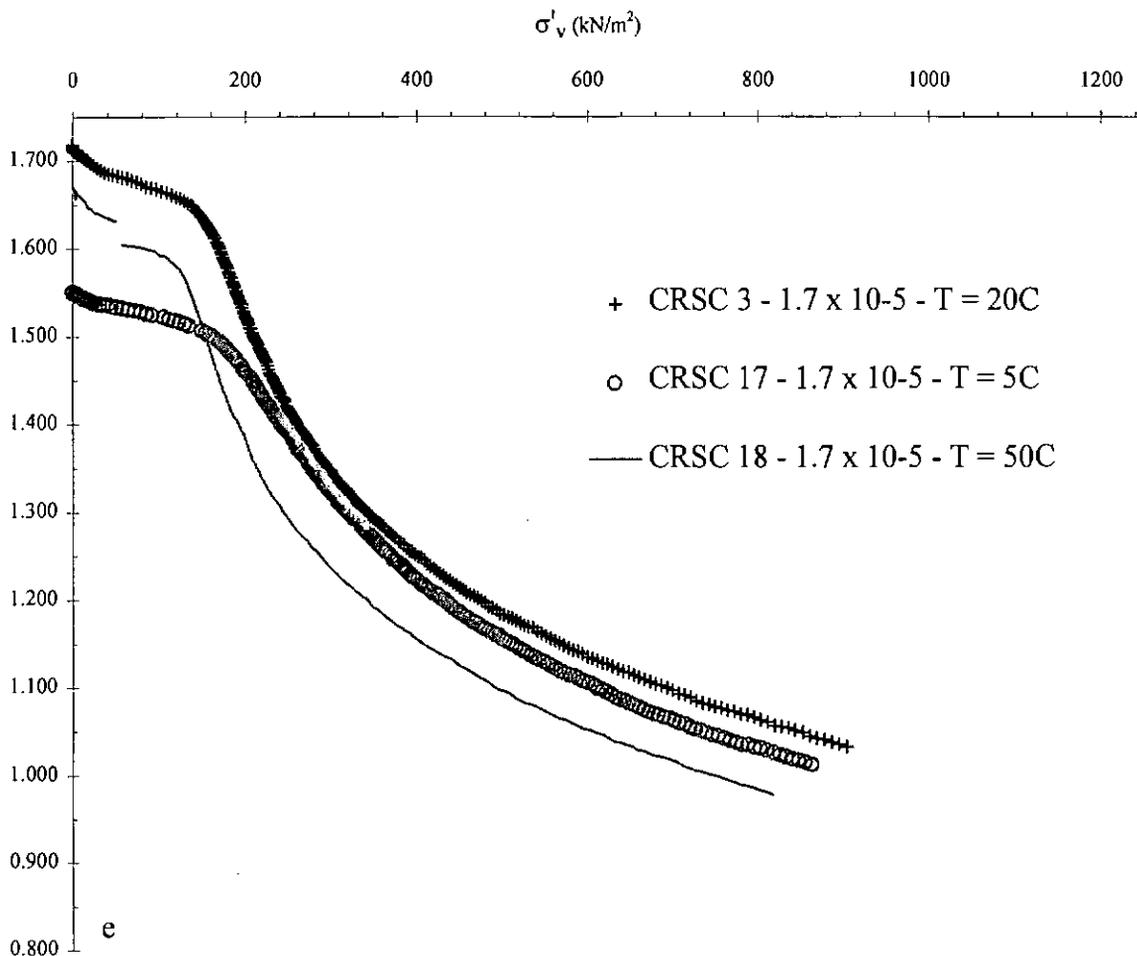


Fig.4-26 - $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; T = variável - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

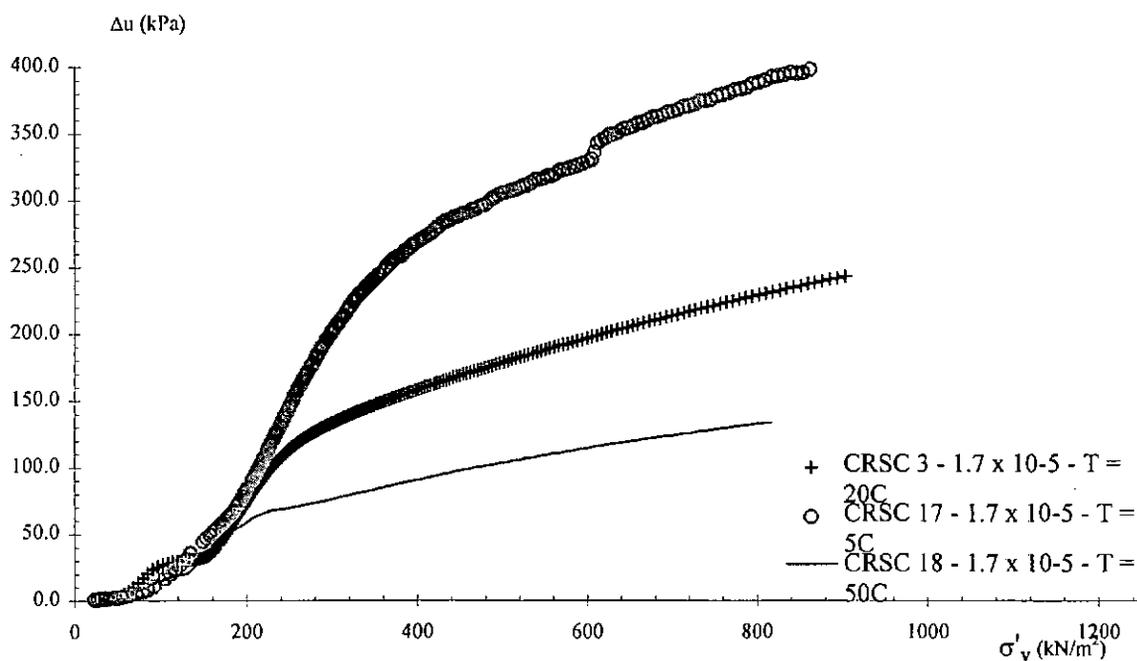


Fig.4-27 - $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; T = variável - ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

CRSC 3, 17 e 18 - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5}$ - T = variável

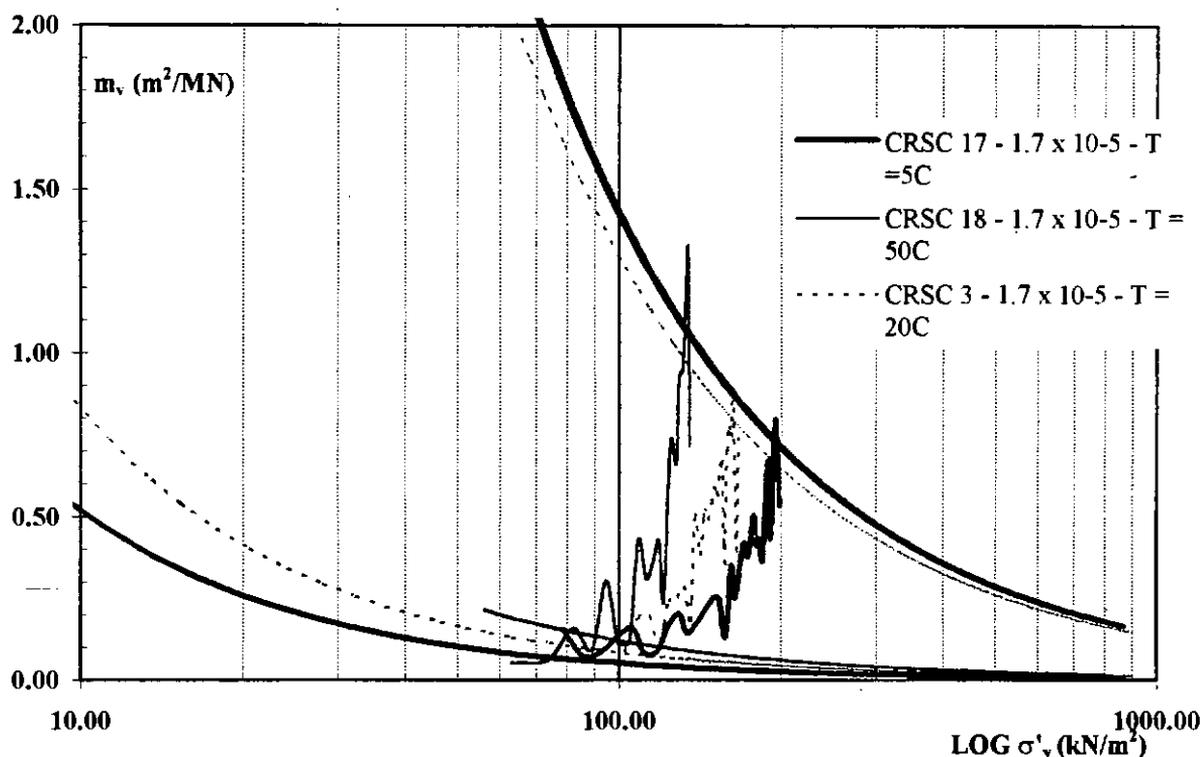


Fig 4-28 - $\text{Log } \sigma'_v \times m_v - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Argila de Saint Polycarpe

CRSC 2, 7 e 20 - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável

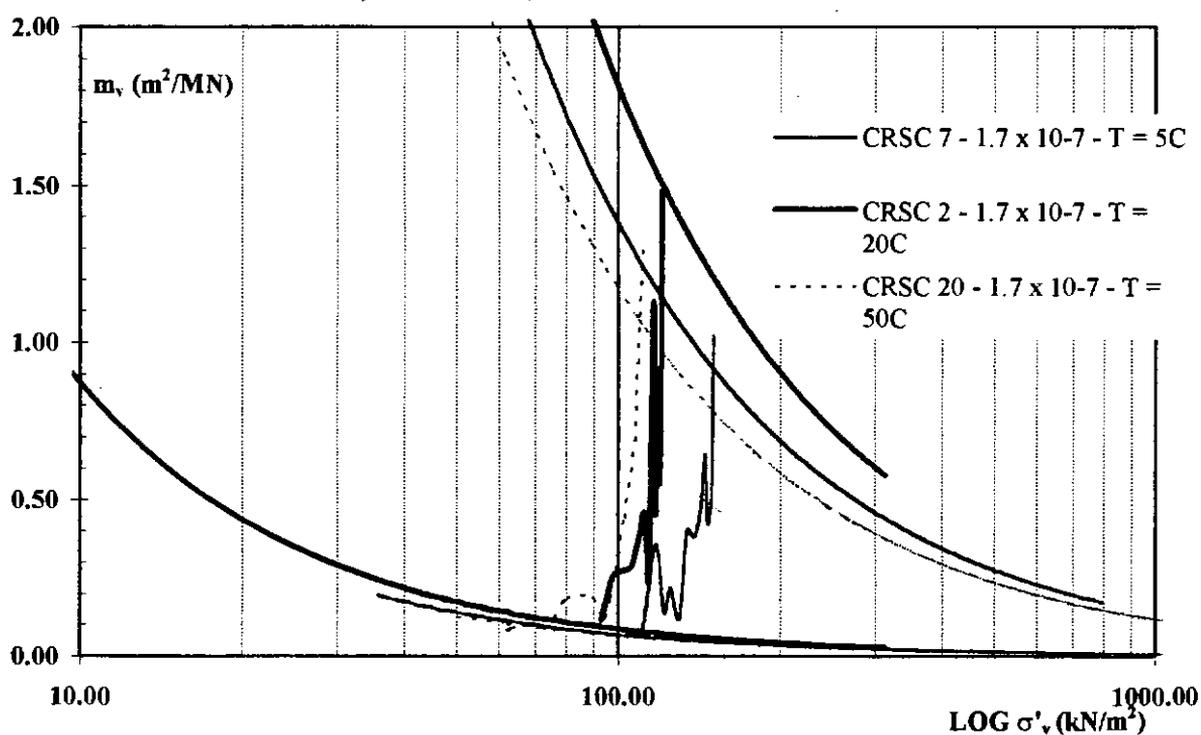


Fig 4-29- $\text{Log } \sigma'_v \times m_v - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - T = variável - Argila de Saint Polycarpe

Moritz (1995) executou ensaios de adensamento CRSC em argilas suecas e propõe uma relação para a tensão de sobreadensamento dada por:

$$\sigma'_{pT} = \sigma'_{pT_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.15} \quad (4-3)$$

σ'_{pT} = tensão de sobreadensamento, que varia com a temperatura do ensaio;

σ'_{pT_0} = tensão de sobreadensamento a temperatura ambiente;

T_0 = temperatura ambiente do laboratório;

T = temperatura do ensaio.

Moritz utilizou dados de ensaios obtidos por Tidfors & Sällfors (1989) e Eriksson (1989) e obteve boa concordância de resultados temperaturas de até 7°C.

Comparando-se os resultados obtidos, na Fig. 4-30 para a argila de Saint Polycarpe, com os propostos por Moritz obteve-se uma concordância razoável, exceto para $T = 50^\circ\text{C}$. Ao se correlacionar o log da tensão de sobreadensamento com o log da temperatura, observa-se uma equação de reta com coeficiente angular de aproximadamente 0.15 (equação 4-3).

Akagi & Komiya (1995) em ensaios CRSC realizados em argilas marinhas japonesas também observaram que para altas temperaturas (em ensaios com velocidades de deformação vertical específica variando de $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ a $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) o efeito da velocidade é desprezível, quando comparado com o da temperatura, isto é, as curvas tensão-deformação são coincidentes, indicando também uma tendência à convergência das curvas para altas temperaturas e das tensões de sobreadensamento obtidas nestes ensaios serem as mesmas.

A tensão de sobreadensamento de Saint Polycarpe, para uma mesma velocidade, tende a convergir para um valor a medida que a temperatura aumenta. Portanto as curvas obtidas por Moritz (1995) deveriam convergir para altas temperaturas. Entretanto para a faixa de variação de temperatura estudada por Moritz (1995) a equação parece razoável. Esta diferença na consideração da variação da tensão de sobreadensamento para altas temperaturas pode explicar a não concordância observada entre as curvas obtidas através da equação proposta por Moritz e os resultados de Saint Polycarpe para temperatura de 50°C .

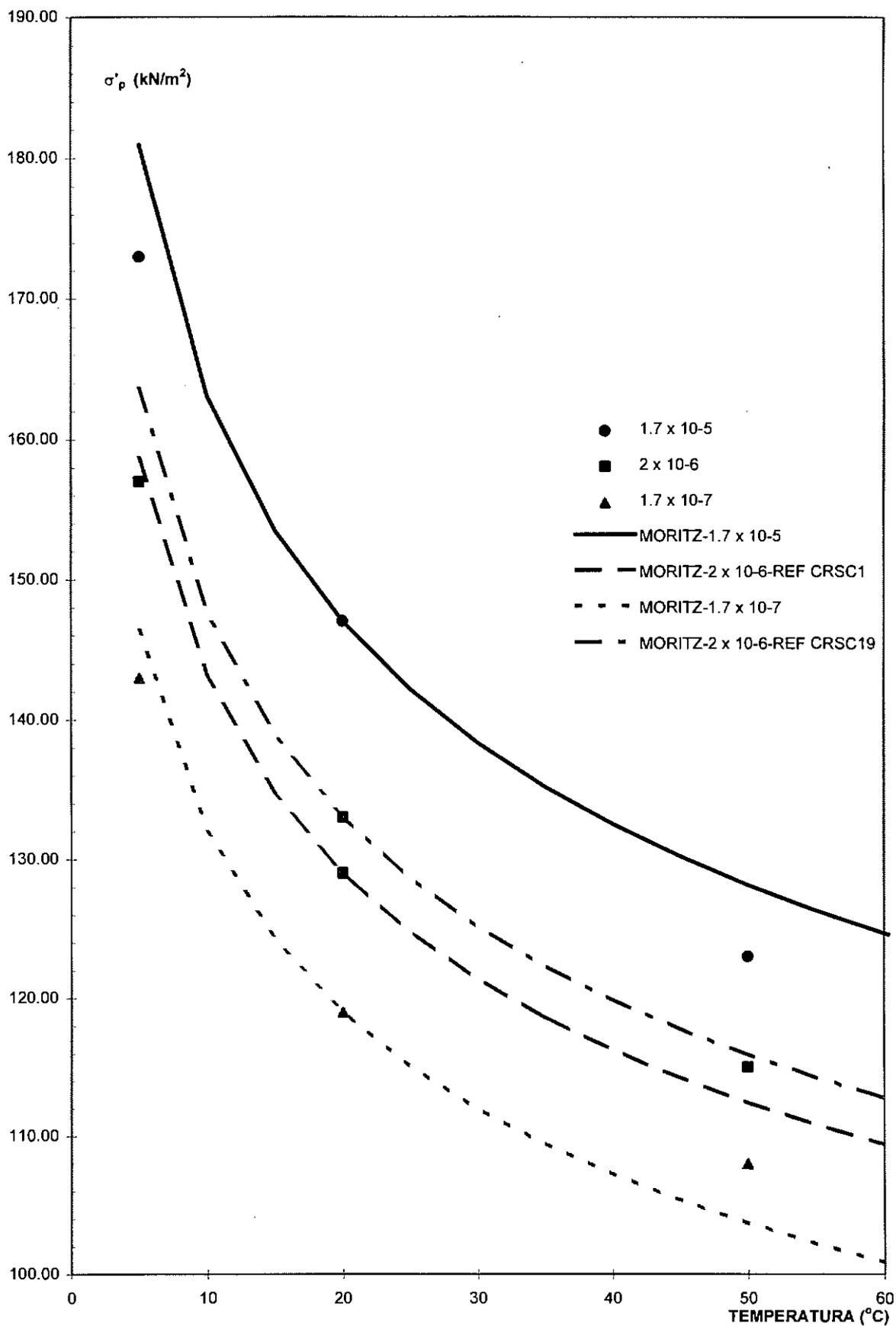


Fig. 4-30- $\sigma'_p(T) \times T$ - Ensaïos CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

4.3.3 Normalização dos resultados

As curvas $\sigma'_p \times \log \dot{\epsilon}_v$ e $\sigma'_p \times T$ tendem a um valor constante de tensão de sobreadensamento a medida que a velocidade de deformação vertical específica diminui ou a medida que a temperatura aumenta.

Martins (1992) propõe um modelo para comportamento de solos argilosos em que para uma argila saturada, submetida a uma tensão cisalhante haveria uma resistência interna composta de uma parcela de atrito e uma parcela de viscosidade. De acordo com este modelo seria válido o Princípio das Tensões Efetivas Modificado que diz:

1 - “Em qualquer plano de um elemento de solo saturado no qual estejam atuando a tensão normal σ a tensão cisalhante τ , estarão atuando internamente: como reação a σ a soma $(\sigma' + u)$, sendo σ' a tensão normal efetiva e u a poro-pressão, e como reação a τ a soma das resistências por atrito e por viscosidade.”

2 - “Toda a vez que houver variação da parcela de atrito ocorrerão deformações cisalhantes e, reciprocamente toda a vez que ocorrerem deformações cisalhantes haverá variação da parcela de atrito mobilizado (casos não drenados)”

O modelo prevê que a resistência é função de:

$$\frac{T}{A} = f \sum_1^n \lambda_i \frac{P_i}{A} + \bar{\mu} \frac{d\epsilon_s}{dt} \sum_1^m \frac{A_{vi}}{A} \quad (4-4)$$

A_{vi} = área de contato da água adsorvida muito viscosa indicada na Fig. 4-31;

A = área de contato total;

P_i = força normal;

$\bar{\mu}$ = viscosidade média na região de adsorção, apresentado na Fig. 4-32;

$\frac{d\epsilon_s}{dt}$ = velocidade com que são distorcidos os elementos de água muito viscosa

da região de adsorção, considerada constante ao longo de toda a seção.

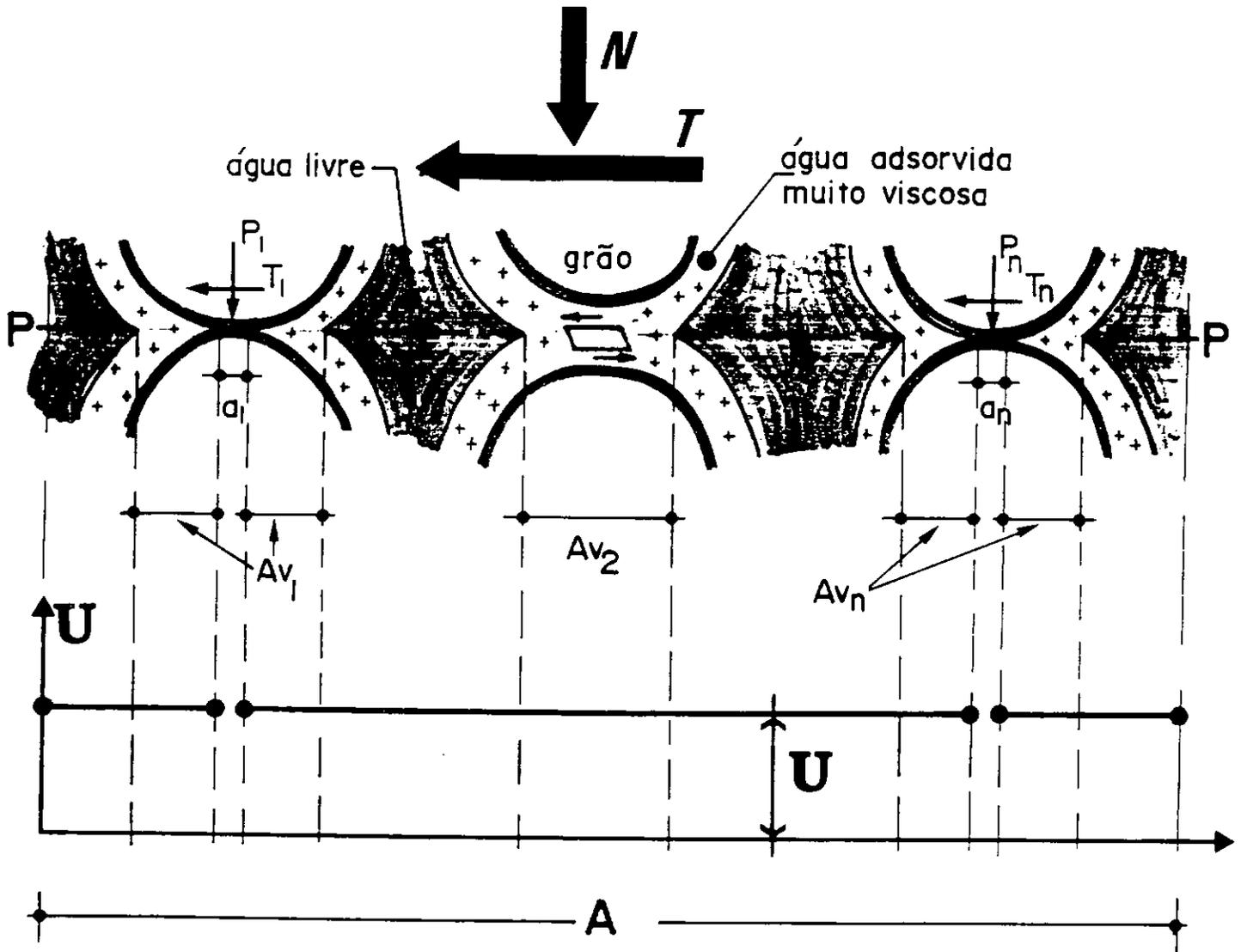


Fig. 4-31 - Equilíbrio de forças numa região de área A . Martins (1992).

A Fig. 4-31 apresenta o esquema do equilíbrio de forças numa região de área A . Segundo o modelo proposto por Martins (1992) existe uma região próxima ao grão de solo, em que a água, denominada água adsorvida muito viscosa, apresenta uma viscosidade muito alta. Em uma região mais afastada do grão de solo a água, denominada água livre, apresentaria uma viscosidade menor.

O aumento da temperatura, causaria uma diminuição da viscosidade média da região de adsorção, causando uma diminuição da parcela de resistência viscosa. Com o decréscimo de resistência as deformações seriam maiores. A viscosidade da água livre também sofreria um decréscimo, aumentando a condutividade hidráulica da amostra.

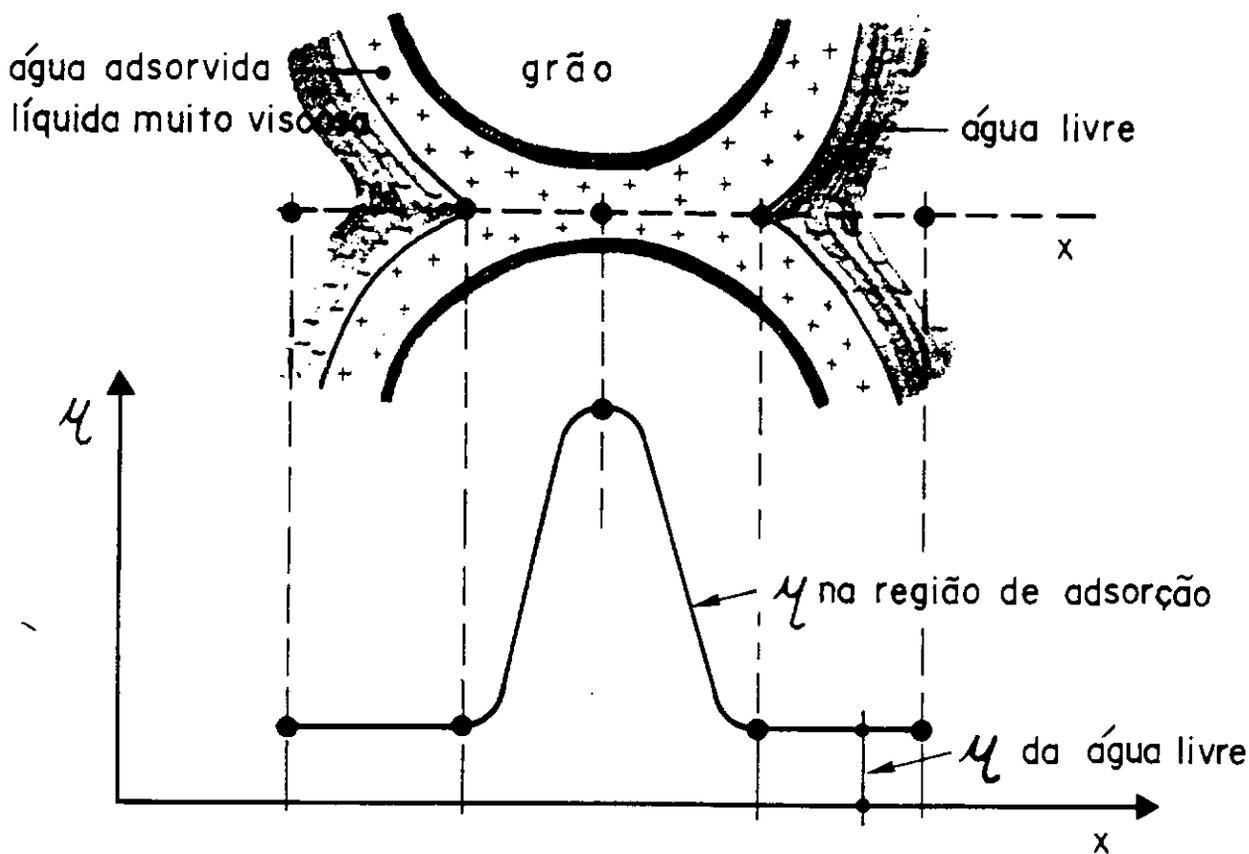


Fig. 4-32 - Possível variação de μ ao longo de um contato feito por água adsorvida líquida muito viscosa. Martins (1992).

O modelo prevê que a parcela de resistência viscosa também sofre influência da velocidade de deformação vertical específica imposta pelo ensaio e que a resistência aumenta com o aumento da velocidade de deformação vertical específica.

Da Fig. 4-33 à Fig. 4-35 apresentam-se os resultados normalizados obtidos para as curvas tensão-deformação dos ensaios CRSC, conforme modelo proposto por Boudali et al.(1994).

Analisando-se os resultados dos ensaios de Saint Polycarpe à luz do modelo proposto por Martins(1992), para a resistência constituída da parcela de atrito e da parcela de viscosidade, observou-se que para Saint Polycarpe os efeitos viscosos referentes à variação de velocidade são menores que os causados pela temperatura. É possível a existência de uma temperatura a partir da qual a variação da velocidade não causa um efeito mensurável e é possível que o limite superior da faixa de equilíbrio indiferente, descrita por Feijó(1991) passe a ser delimitada, para altas temperaturas, por uma velocidade de deformação diferente de zero, ou seja as curvas de isovelocidades para altas temperaturas, num gráfico e $x \sigma'_v$ são quase coincidentes com a de velocidade zero.

Ou seja, as curvas tensão deformação para altas temperaturas, em termos de deformações possíveis de serem medidas, são coincidentes. Isto estaria de acordo com o fato de que para altas temperaturas a curva $\sigma'_p \times T$ ser assintótica a um valor constante, independente da velocidade de ensaio que se utilize. Esta hipótese não está, entretanto, baseada em dados experimentais. Seria necessário proceder uma campanha de ensaios similares aos de Feijó(1991) para várias temperaturas, para se analisar o efeito de temperatura na determinação do limite da faixa de equilíbrio limite. Uma outra hipótese é a temperatura afetar o termo tangente do atrito mobilizado, afetando a resistência.

A tensão efetiva média atuante, calculada a partir do peso específico médio das amostras e a uma profundidade de 8.10 m, para a argila de Saint Polycarpe é de cerca 79 kPa o que forneceria um OCR variando de 1.4 a 2, para σ'_p variando de 107 à 169 kPa.

ENSAIOS CRSC

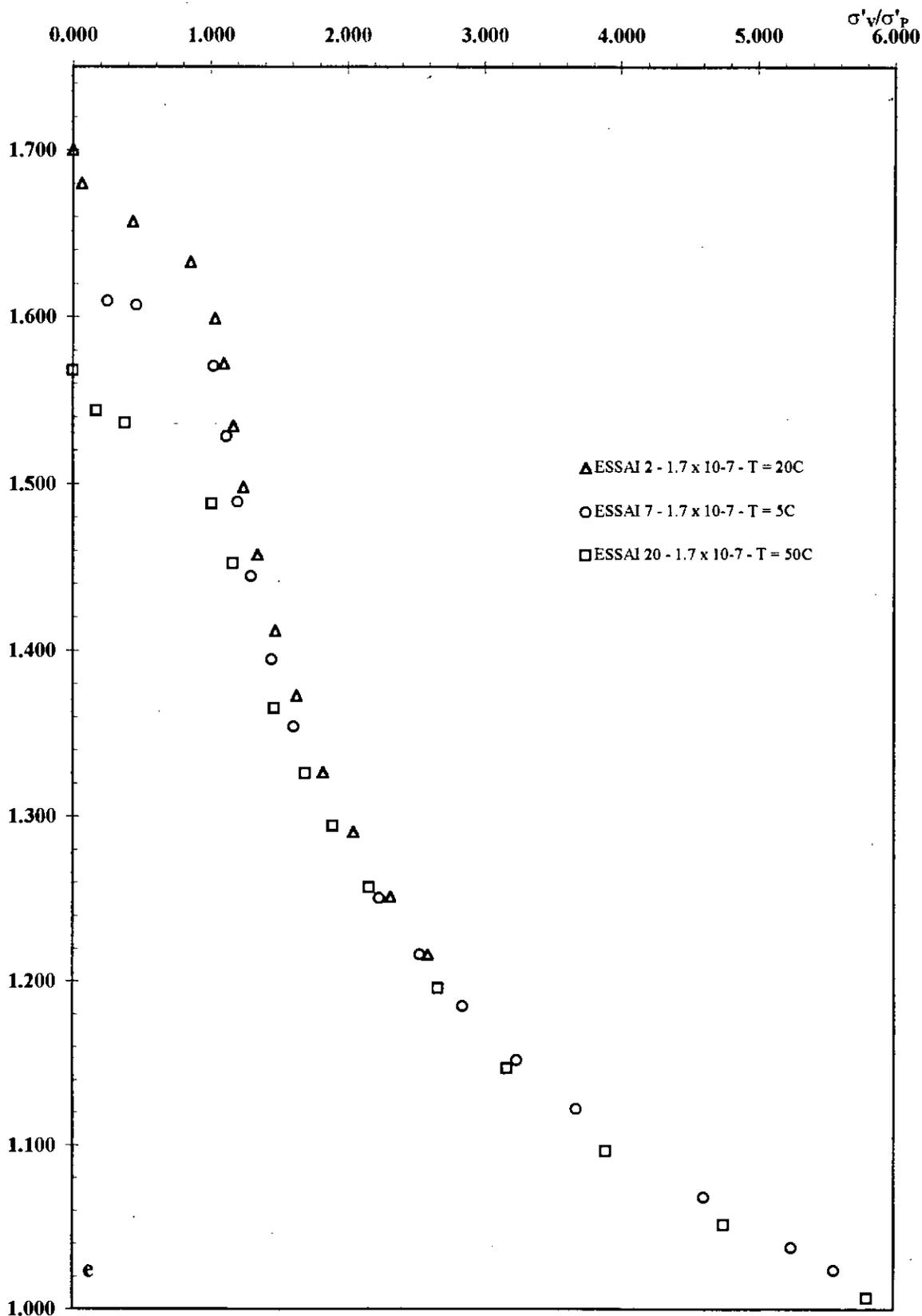


Fig. 4-33- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}'_v T) \times e$ - Ensaios CRSC - T = variável - $\dot{\epsilon}'_v = 1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Argila de Saint Polycarpe.

ENSAIOS CRSC

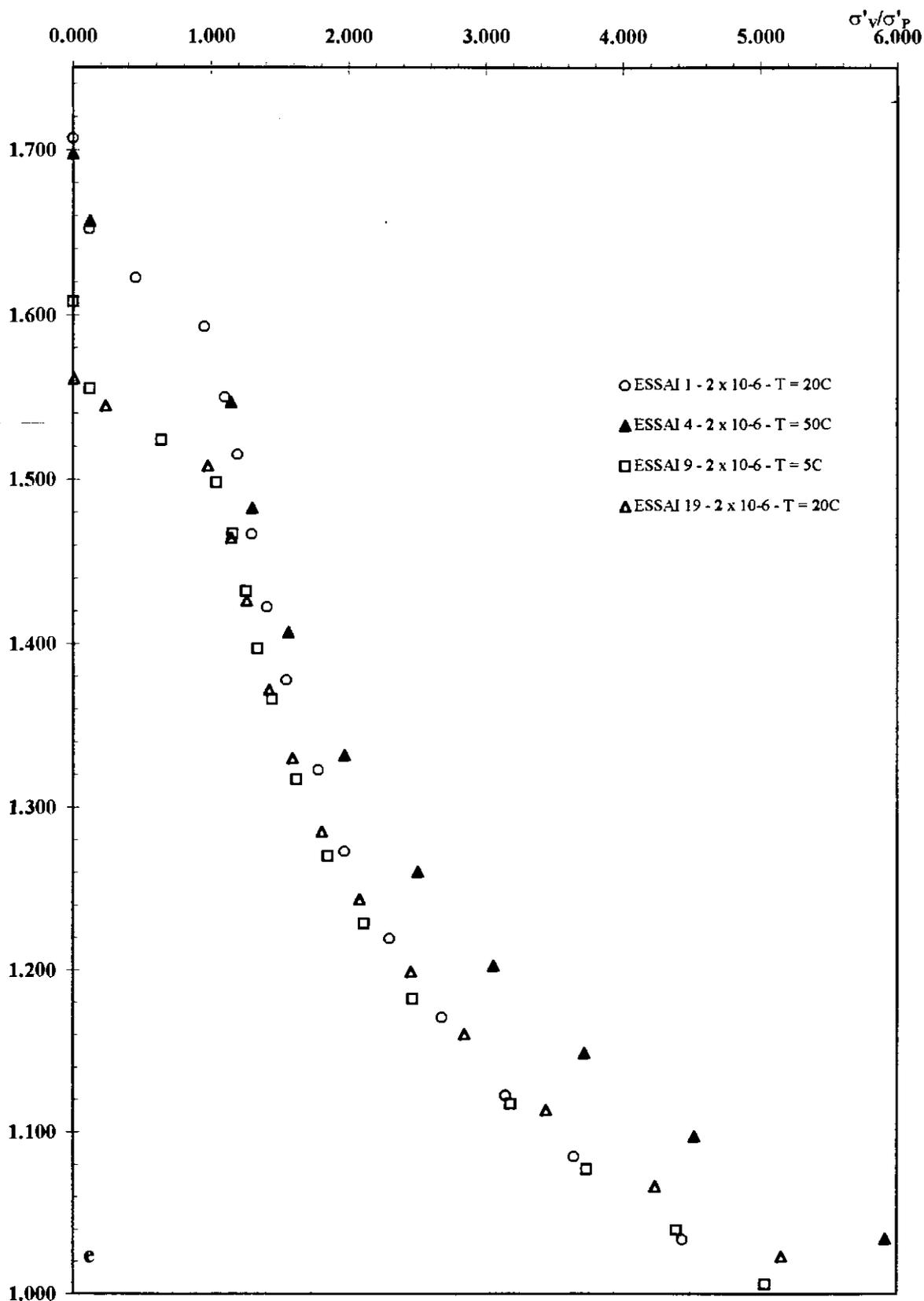


Fig. 4-34- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - T = variável - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Argila de Saint Polycarpe.

ENSAIOS CRSC

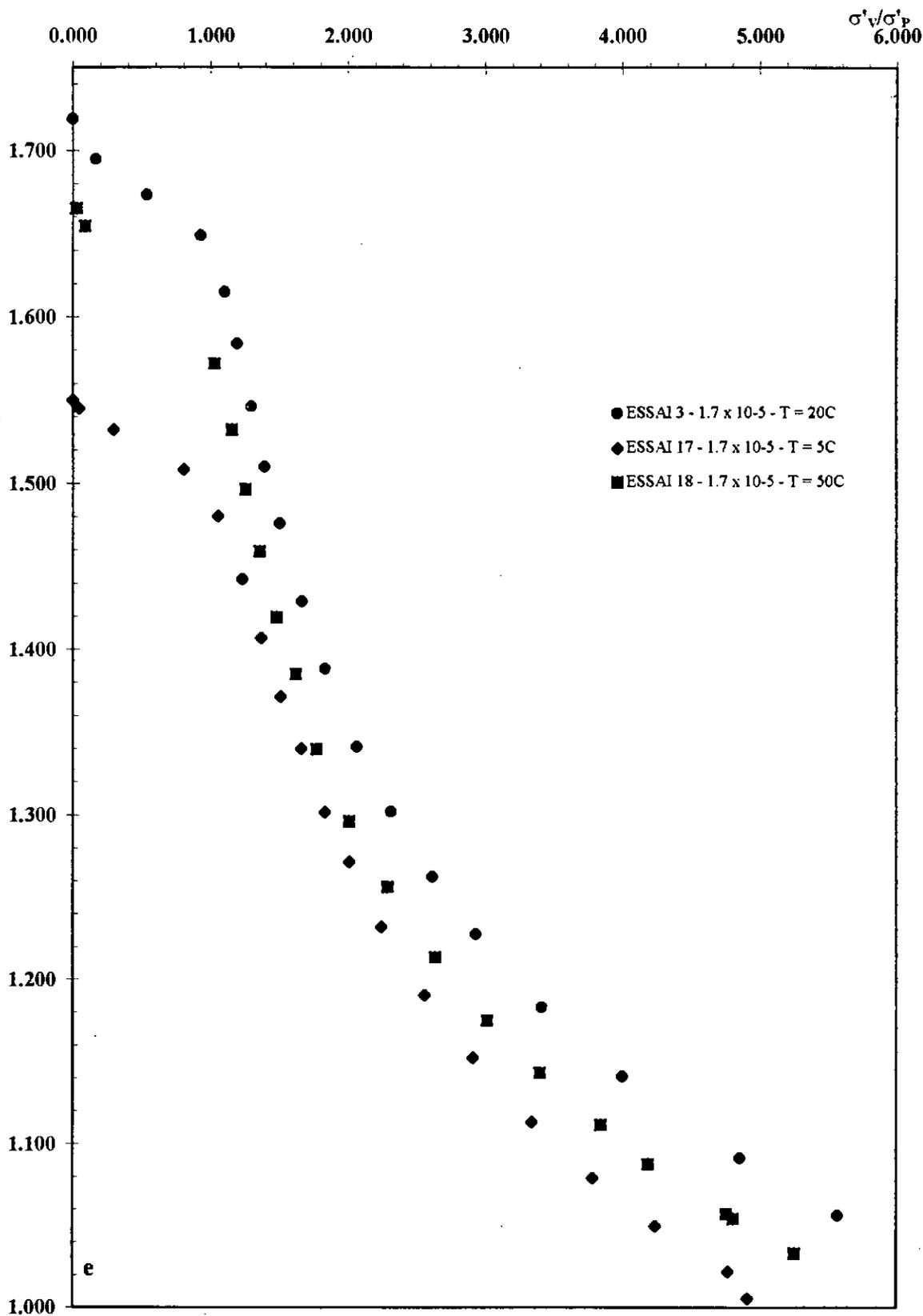


Fig. 4-35- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - $T =$ variável - $\dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} s^{-1}$. Argila de Saint Polycarpe.

4.3.4 Poro-pressão e condutividade hidráulica

Observa-se em ensaios de adensamento unidimensional CRSC, que o valor da poro-pressão medida na base do corpo de prova aumenta com o aumento da velocidade de deformação vertical específica, para uma temperatura pré-fixada e com a diminuição da temperatura, para uma velocidade de deformação vertical específica pré-fixada.

Todos os ensaios apresentaram resultados compatíveis com os resultados obtidos em argilas da região, submetidas a variação de velocidade e temperatura (Boudali et al.-1994).

Habibagahi (1973) analisando a influência da viscosidade com a temperatura propõe a comparação entre as permeabilidades absolutas ($K=k\mu/\gamma$) obtidas em ensaios executados a diferentes temperaturas:

$$\frac{k_1 \mu_1}{e_{01} \gamma_1} = \frac{k_2 \mu_2}{e_{02} \gamma_2} \quad (4-5)$$

μ = viscosidade da água em função da temperatura do ensaio;

γ = peso específico da água em função da temperatura;

e_0 = índice de vazios de água adsorvida - é o índice de vazios da amostra quando toda a água da amostra é adsorvida.

Tabela 4-4 - Variação da permeabilidade com a temperatura - Saint Polycarpe.

| ENSAIOS | TEMP. | $\dot{\epsilon}_v$ | ϵ_v | μ | γ | k | k/k _{20°C} | k/k _{20°C} |
|---------|-------|----------------------|--------------|--------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| CRSC | (°C) | | | (centipoise) | (tf/cm ³) | (m/s ²) | previsto | obtido |
| 1 | 20 | 2×10^{-6} | 15 | 1.00 | 0.998 | 1.64E-10 | | |
| 4 | 50 | 2×10^{-6} | 15 | 0.55 | 0.988 | 3.05E-10 | 1.8 | 1.9 |
| 9 | 5 | 2×10^{-6} | 15 | 1.53 | 1.000 | 9.00E-11 | 0.7 | 0.5 |
| 3 | 20 | 1.7×10^{-5} | 15 | 1.00 | 0.998 | 1.61E-10 | | |
| 18 | 50 | 1.7×10^{-5} | 15 | 0.55 | 0.988 | 3.20E-10 | 1.8 | 2.0 |
| 8 | 5 | 1.7×10^{-5} | 15 | 1.53 | 1.000 | 8.00E-10 | 0.7 | 0.5 |

A Tabela 4-4 apresenta as relações previstas e obtidas para a variação de temperatura e permeabilidade, supondo-se mesmo e_0 para todas as amostras. Para os ensaios executados a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e 1.7×10^{-5} obteve-se uma boa correlação entre a variação de k com a temperatura.

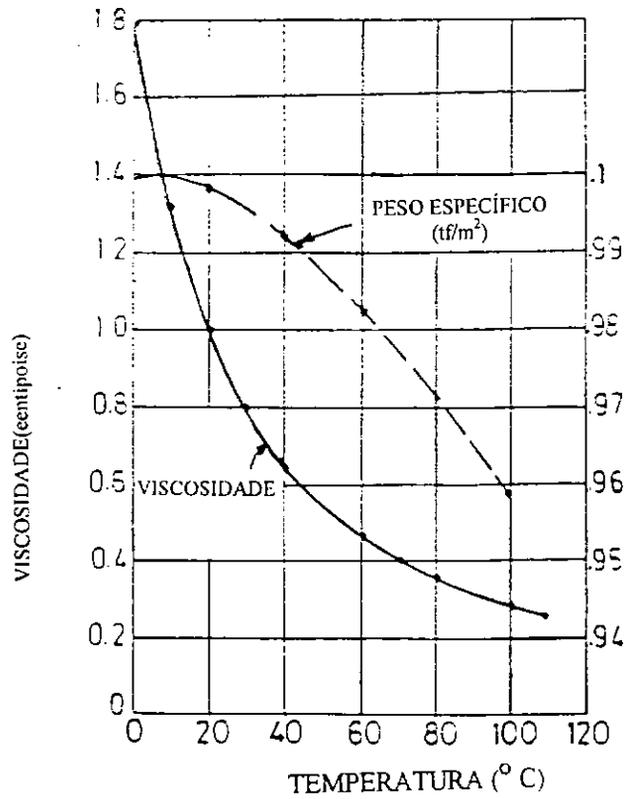


Fig. 4-36 - Viscosidade e peso específico da água a várias temperaturas a 1atm.

Habibagahi(1973).

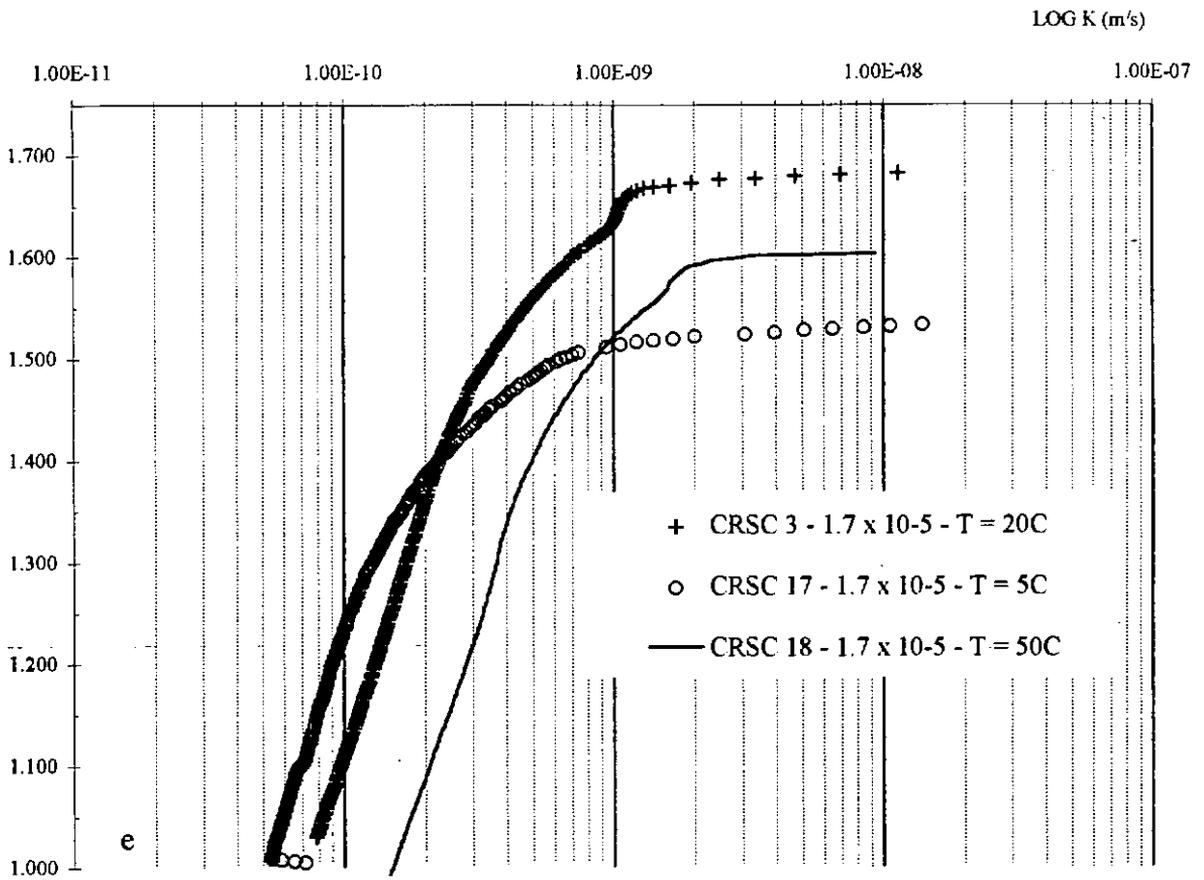


Fig. 4-37 $-\log k \times e - \dot{\epsilon}_v = 1.7 \times 10^{-5} s^{-1}$; T = var. -ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

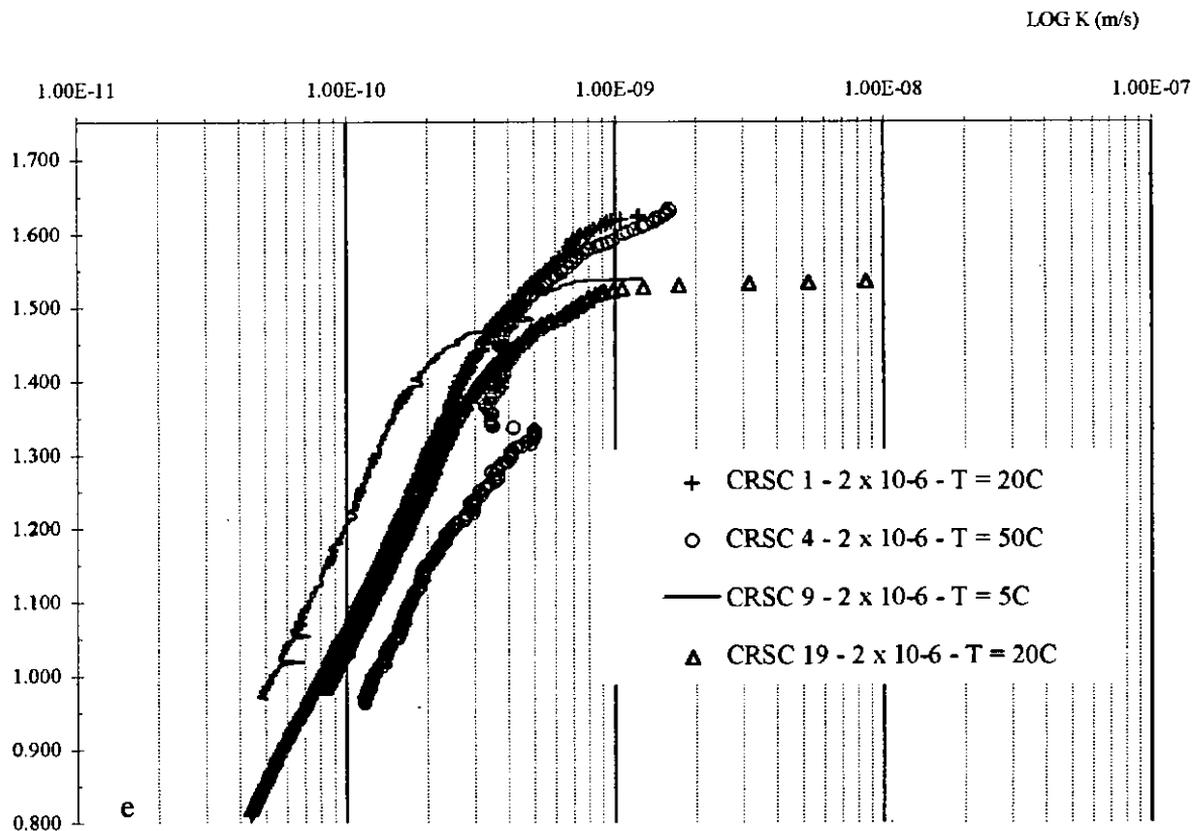


Fig. 4-38 $-\log k \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} s^{-1}$; T = var. -ensaios CRSC. Argila de Saint Polycarpe.

4.3.5 Ensaio CRSC realizados com variação de temperatura durante o ensaio.

Apresenta-se da Fig. 4-39 a Fig. 4-50 os resultados obtidos para os ensaios CRSC executados com variação de temperatura durante o ensaio, para as argilas de Saint Polycarpe, Ariake e Osaka.

Nos ensaios executados com ciclos de temperatura, a prensa é desligada durante a variação de temperatura. Ao se atingir a temperatura desejada deixa-se o corpo de prova sob esta temperatura para que a maior parte do excesso de poro-pressão induzido pela variação de temperatura fosse dissipado e houvesse estabilização da deformação, antes de se iniciar um novo ciclo de carga/temperatura. Isto é, deixou-se a temperatura constante por no mínimo 12h após os ciclos, variando-se a temperatura lentamente até o valor do ciclo posterior e mantendo-a constante por cerca de 24h, antes de se iniciar o movimento da prensa.

- Argila de Saint Polycarpe.

Na Fig. 4-39 observa-se que para Saint Polycarpe a variação de 20-5°C causou, para um determinado índice de vazios, um aumento de 15% da tensão efetiva e de 16% para a variação de 50-20°C. Portanto em ensaios realizados em laboratório, considerando-se somente o efeito da temperatura, há uma superestimativa das deformações referentes a uma determinada tensão vertical efetiva, quando se tem uma temperatura de campo de cerca de 5°C para uma de laboratório de 20°C.

As curvas σ'_v x e obtidas nestes ensaios são coincidentes nos trechos em que a temperatura do ensaio é a mesma. Observou-se também a concordância entre as curvas tensão-índice de vazios obtidas nestes ensaios e os demais executados, ao se incluir estes resultados na curva normalizada apresentada na Fig. 4-51, confirmando o modelo proposto.

A execução deste tipo de ensaio permite a análise dos resultados independente da variabilidade natural das amostras, uma vez que a variação da temperatura é realizada num mesmo ensaio, na mesma amostra, ficando evidente o efeito da temperatura na curva σ'_v x e e nas medidas de poro-pressão e condutividade hidráulica.

A curva $\log k$ x e obtida nestes ensaios apresenta-se concordante nos trechos em que os ensaios foram realizados à mesma velocidade ($T=20^\circ\text{C}$).

- Argila de Ariake.

Na argila de Ariake foram executados apenas dois ensaios, ambos a mesma velocidade, com variação de temperatura de 5-20°C e 50-20°C. A tensão de

sobreadensamento desta argila é bem inferior à de Saint Polycarpe e ela é bem menos homogênea.

O ensaio CRSC 13 apresentou resultado inesperado para a faixa de deformação vertical específica entre 10 e 11%, aparentando uma variação de temperatura que não ocorreu, pois durante o ensaio procedeu-se o controle de temperatura. Neste trecho isolado, a poro-pressão manteve-se baixa, enquanto a tensão efetiva aumentava. No restante do ensaio observou-se a influência da temperatura na curva tensão-deformação.

No ensaio CRSC 14 nos trechos executados a 50°C observa-se que as poro-pressões geradas são muito baixas em virtude da alta temperatura. Na faixa de 10% deformação vertical específica observou-se discrepância entre as curvas tensão-deformação dos ensaios CRSC 13 e 14, indicando que houve realmente um problema com o ensaio 13 nesta faixa.

Os ensaios foram executados com variações cíclicas de temperatura a cada 5% de deformação vertical específica, de forma que nos dois ensaios de 6 a 11% e 17 a 21% a temperatura fosse de 20°C, obtendo-se assim uma referência. Observou-se, entretanto, que as curvas tensão-deformação a 20°C obtidas nos dois ensaios, ao serem sobrepostas apresentaram diferença entre as tensões efetivas, para uma determinada deformação vertical específica, de cerca de 20%. A variabilidade natural das amostras japonesas é maior que Saint Polycarpe, pois trata-se de uma argila bastante heterogênea, que contém areia, enquanto Saint Polycarpe é uma argila mais homogênea, sem presença de areia, justificando a diferença.

Manteve-se a apresentação dos resultados em termos de deformação vertical específica, já que os ensaios foram realizados com ciclos de temperatura definidos em função de ϵ_v e a análise dos resultados foi feita para cada amostra individual.

Esta argila apresenta um aumento de 10% de sua tensão efetiva, para uma mesma deformação vertical específica, quando diminui-se a temperatura de 20-5°C e de 13% quando diminui-se a temperatura de 50-20°C.

- Argila de Osaka.

Em função do observado nos ensaios de Ariake, em que a variabilidade da amostra dificultou a manutenção de uma referência a 20°C, para a argila de Osaka programou-se em uma mesma amostra, um ensaio CRSC à temperatura variável de 20-5-50°C e velocidade de deformação vertical específica de $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Desta forma, pode-se observar o efeito da temperatura no comportamento desta argila sem preocupação com a variação natural da amostra. Como esta argila tem uma tensão de sobreadensamento e respectiva deformação vertical específica muito elevadas, a tensão de sobreadensamento não ficou bem definida, pois seu valor ficou entre dois ciclos de variação de temperatura.

Para uma variação de 20°C - 5°C observou-se um aumento de 10% na tensão vertical efetiva, para uma mesma deformação vertical específica e de 16 % para uma variação de 50°C - 20°C .

CRSC 5 E 12 - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

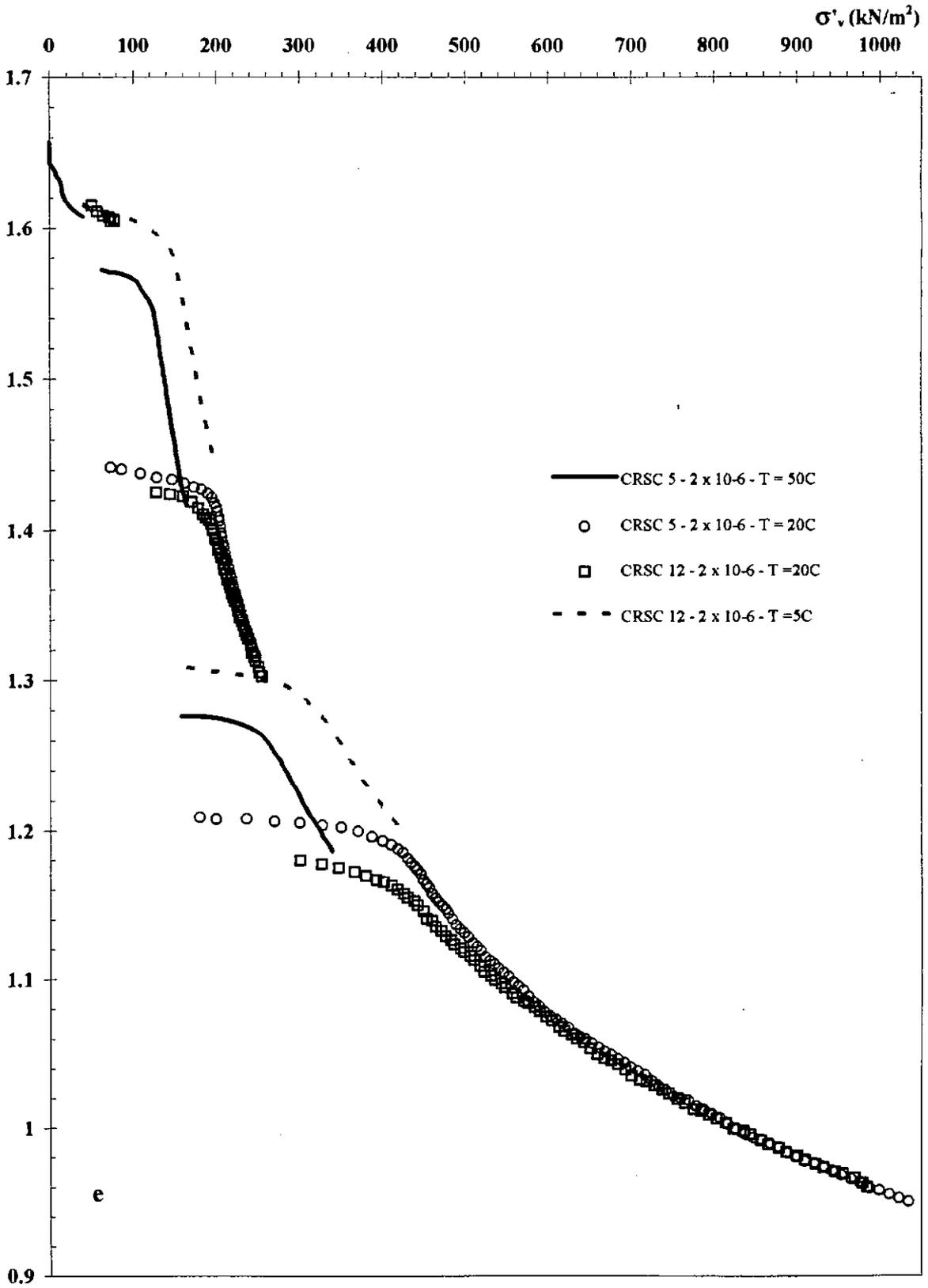


Fig 4-39 - $\sigma'_v \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - T = 5-20-50^\circ\text{C}$ - ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe.

CRSC 5 E 12 - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

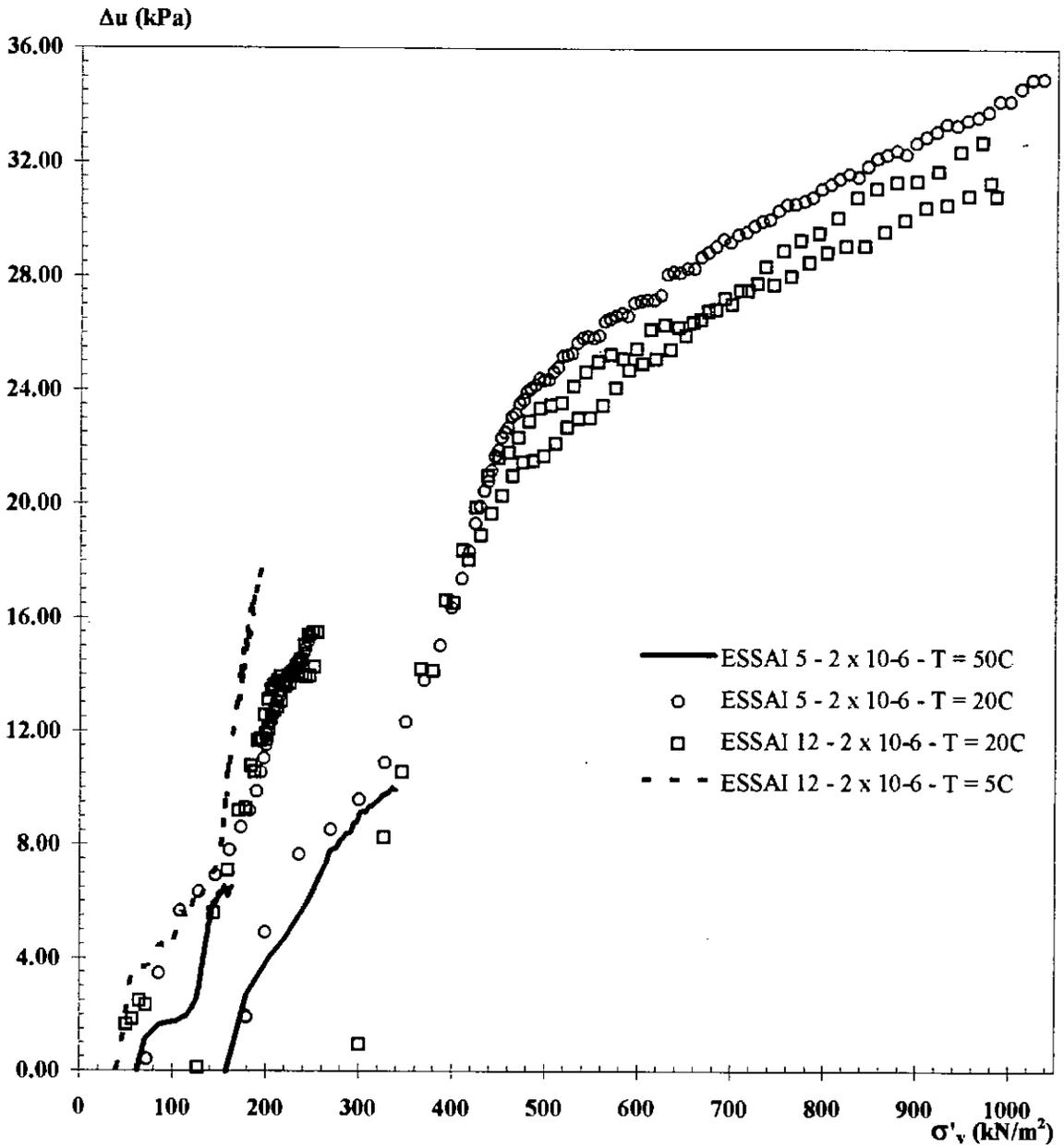


Fig.4-40 - $\Delta u_b \times \sigma'_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} - T = 5-20-50^\circ\text{C}$ - ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe.

$$\text{CRSC } 5 \text{ E } 12 - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

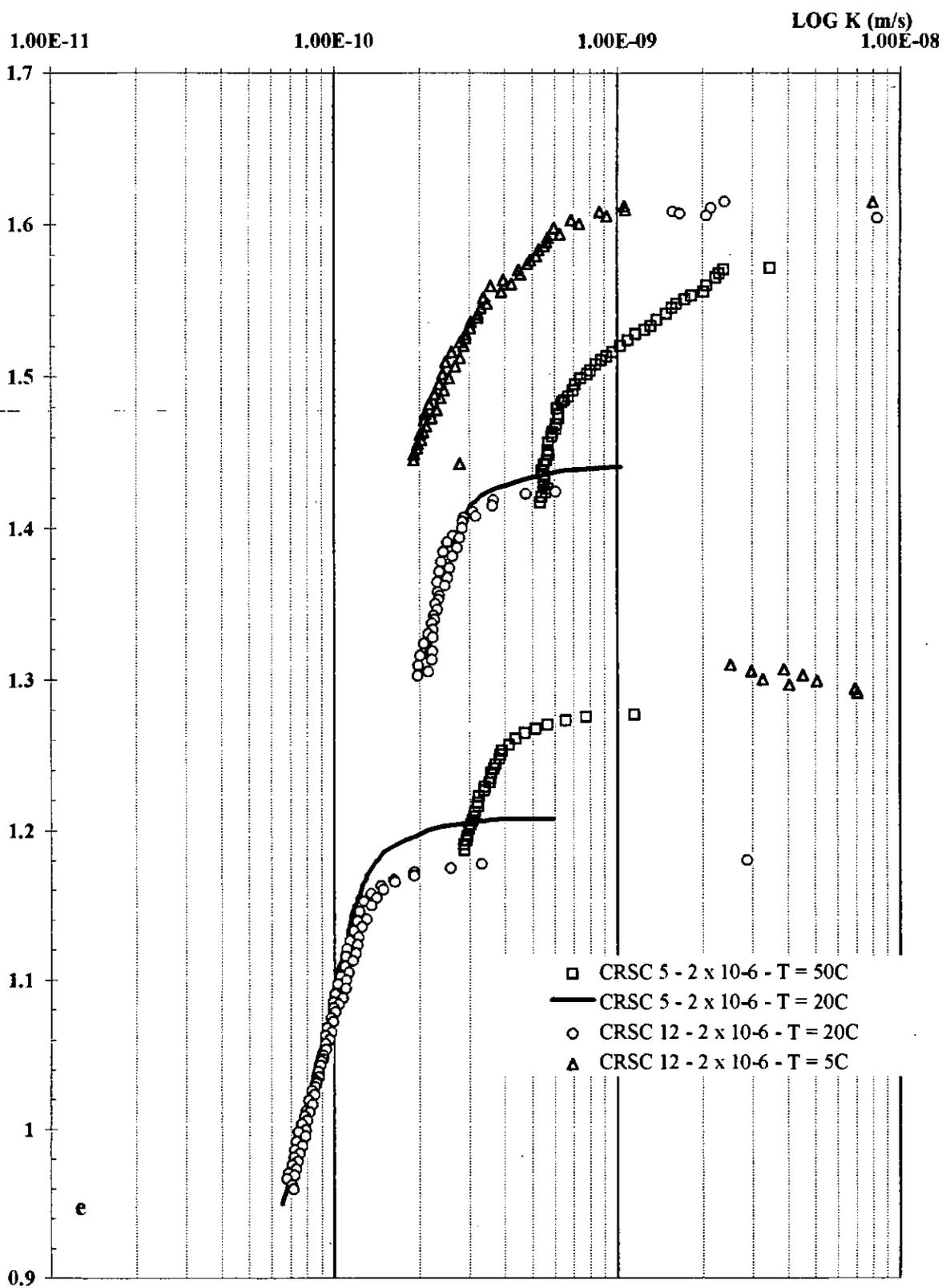


Fig.4-41 - $\log k \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ - T = 5-20-50°C - ensaios CRSC - Argila de Saint Polycarpe.

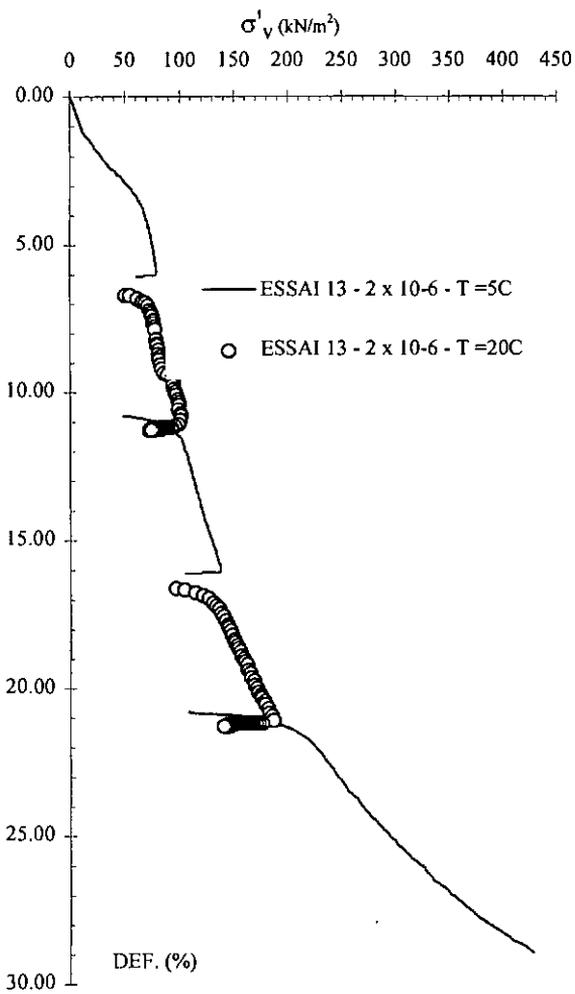


Fig.4-42 - $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 5-20^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

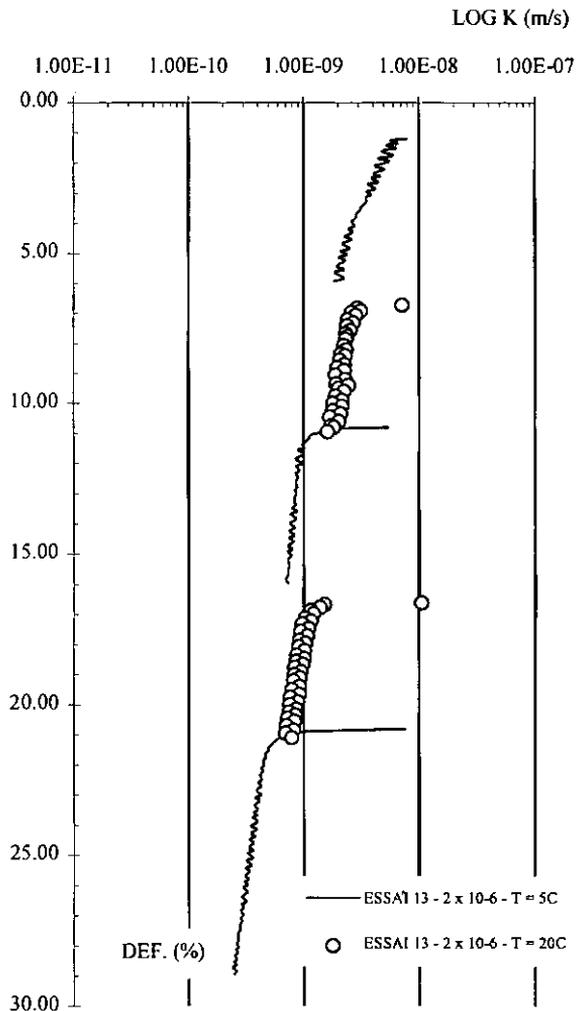


Fig.4-44 - $\text{Log } k \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 5-20^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

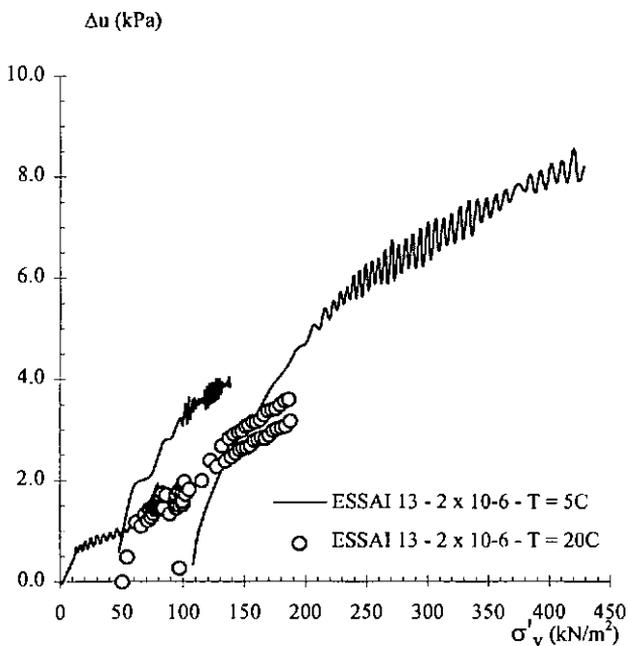


Fig.4-43 - $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 5-20^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

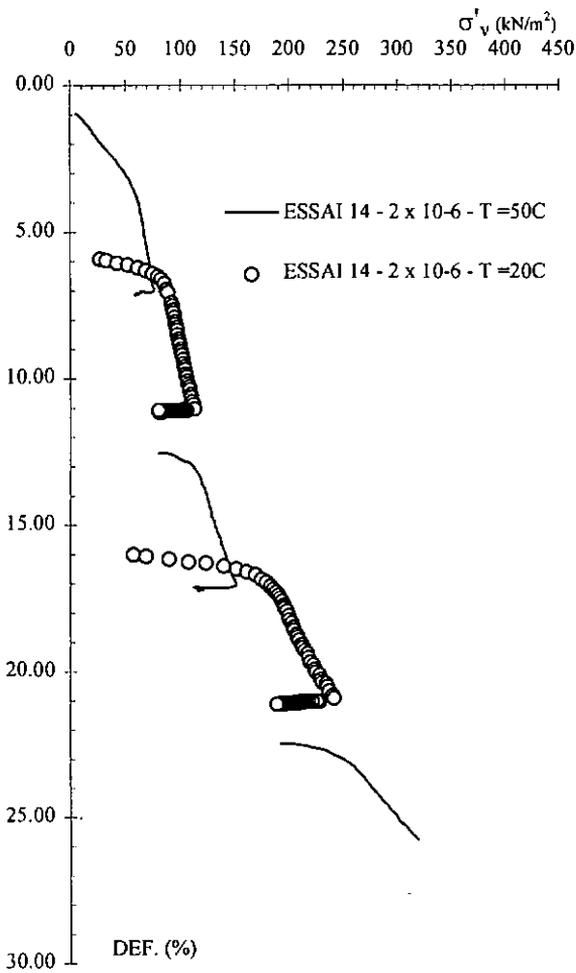


Fig. 4-45 - $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20-50°C - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

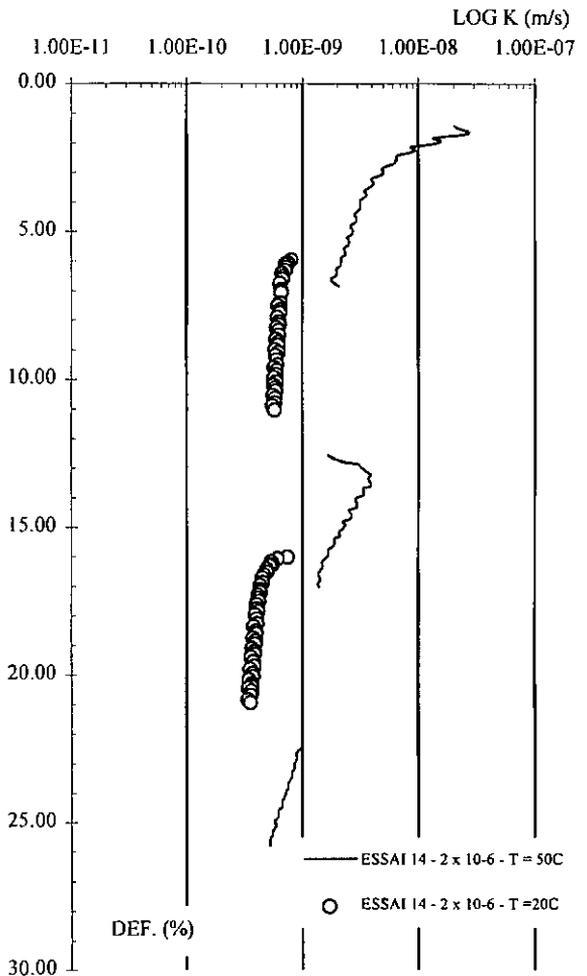


Fig. 4-47 - Log k x $\epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20-50°C - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

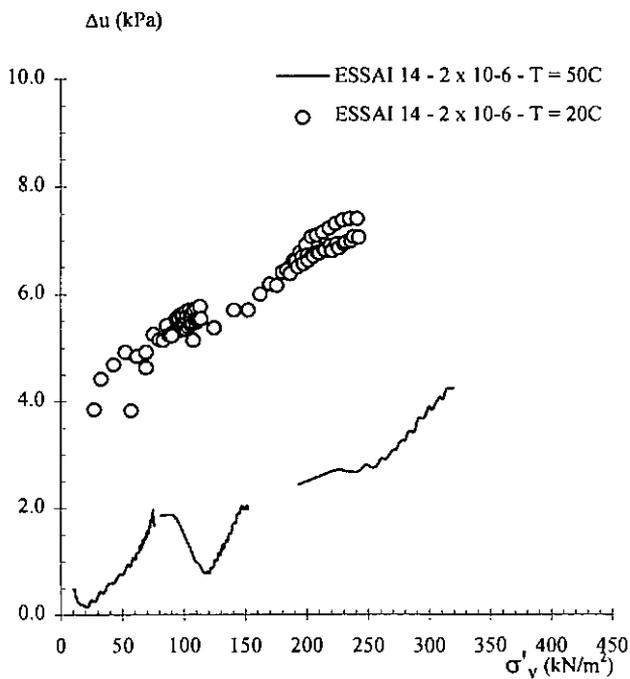


Fig. 4-46 - $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20-50°C - ensaio CRSC. Argila de Ariake.

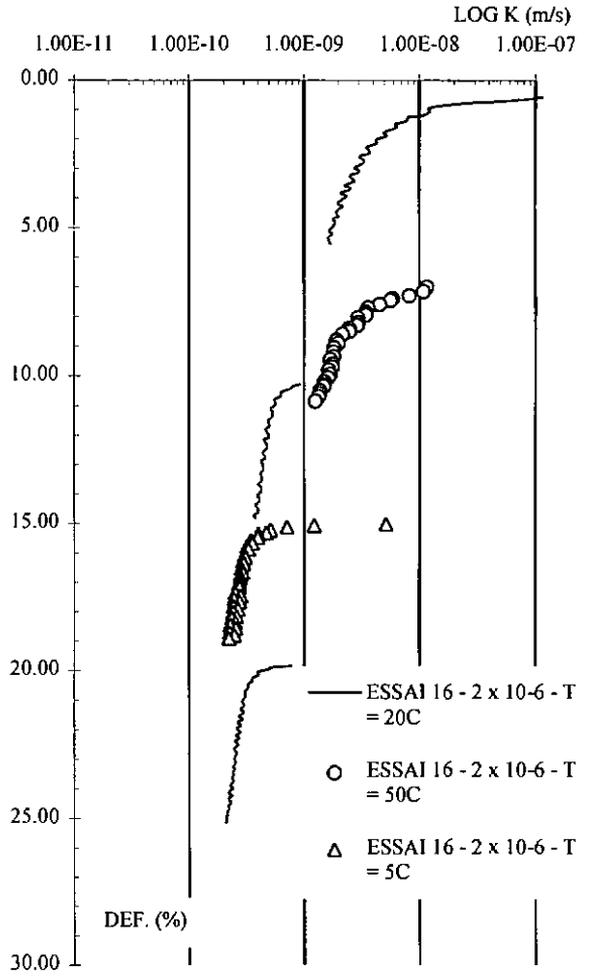
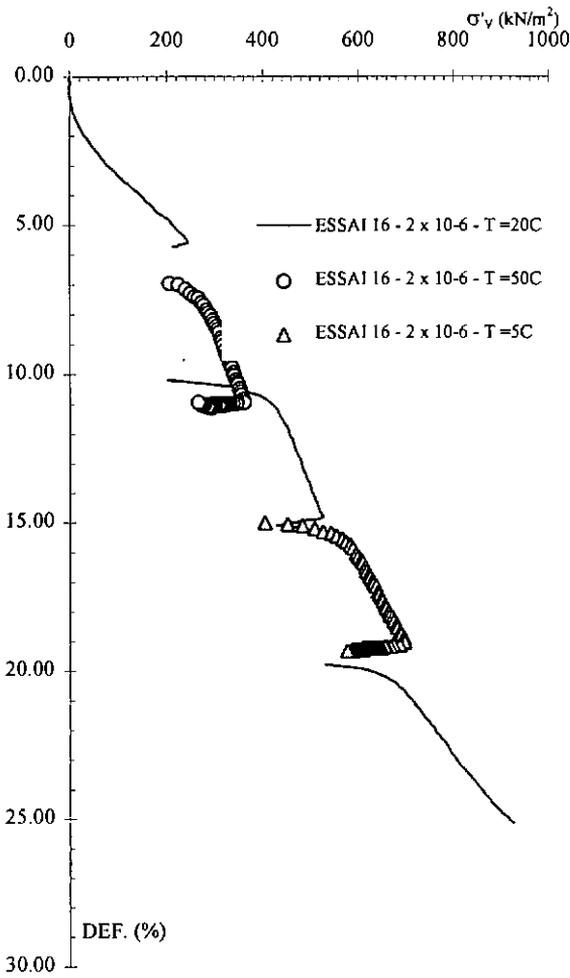


Fig.4-48 - $\sigma'_v \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 20-50-5^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Osaka.

Fig. 4-50 - $\text{Log } k \times \epsilon_v - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 20-50-5^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Osaka.

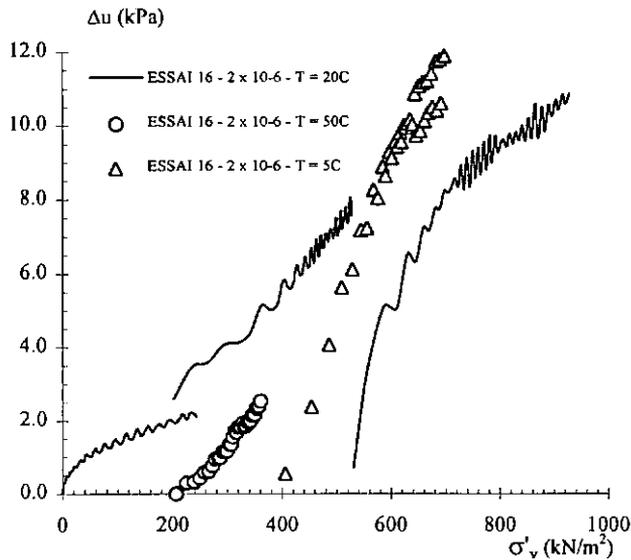


Fig.4-49 - $\sigma'_v \times \Delta u_b - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $T = 20-50-5^\circ\text{C}$ - ensaio CRSC. Argila de Osaka.

4.4 NORMALIZAÇÃO DOS RESULTADOS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO E DA TEMPERATURA

Apresenta-se na Fig. 4-51 a normalização das curvas tensão x índice de vazios em função da tensão de sobreadensamento para as temperaturas e velocidades ensaiadas. Nos ensaios CRSC12 e CRSC5, as tensões de sobreadensamento utilizadas na normalização para os trechos referentes aos ciclos de variação da temperatura, foram obtidas a partir da curva $\sigma'_p \times \epsilon_v$ para a velocidade $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, considerando-se a temperatura utilizada durante o ciclo.

Observa-se que a curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ apresenta uma dispersão para o trecho inicial. Isto se deve ao fato de as amostras terem índices de vazios iniciais diferentes.

Para eliminar este efeito, normalizou-se também o índice de vazios em função do índice de vazios inicial de cada amostra, conforme apresentado na Fig. 4-52. O ensaio CRS1 está fora da faixa normalizada. Isto pode ser, como já citado devido ao fato de não se ter apoiado bem a amostra no fundo da célula.

A variação da tensão de sobreadensamento com a temperatura e velocidade pode ser representada por uma superfície definida pelos eixos $\sigma'_p \times T \times \dot{\epsilon}_v$. Esta superfície seria única para cada solo e definiria a tensão de sobreadensamento para cada temperatura velocidade de ensaio utilizada. Os valores obtidos não dependem do tipo de ensaio executado, isto é, as tensões de sobreadensamento do ensaios de fluência poderiam ser incluídos nesta curva caso fossem calculados.

ENSAIOS CRSC

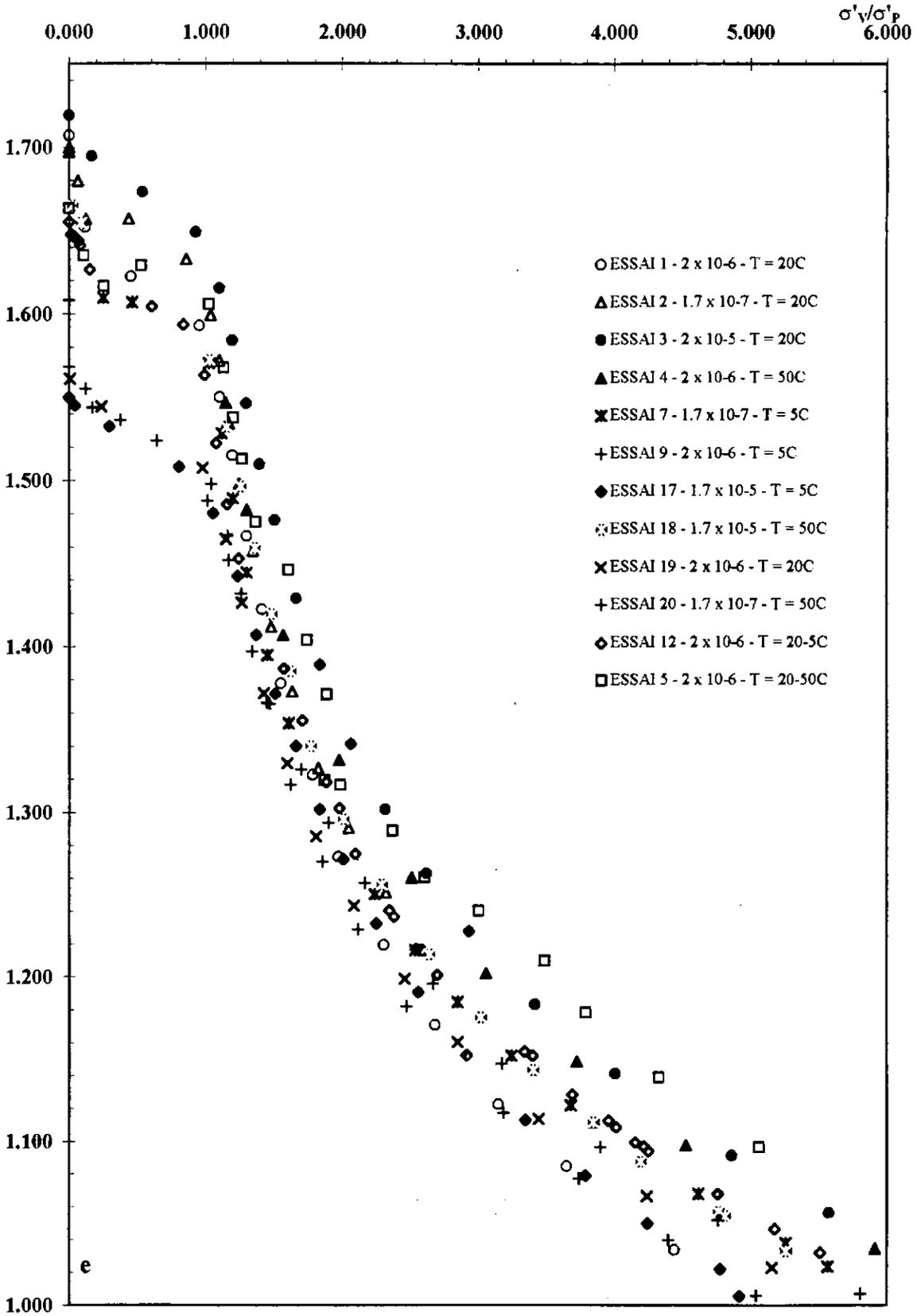


Fig. 4-51- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e$ - Ensaios CRSC - T = variável - $\dot{\epsilon}_v$ = variável. Argila de Saint Polycarpe.

ENSAIOS CRSC

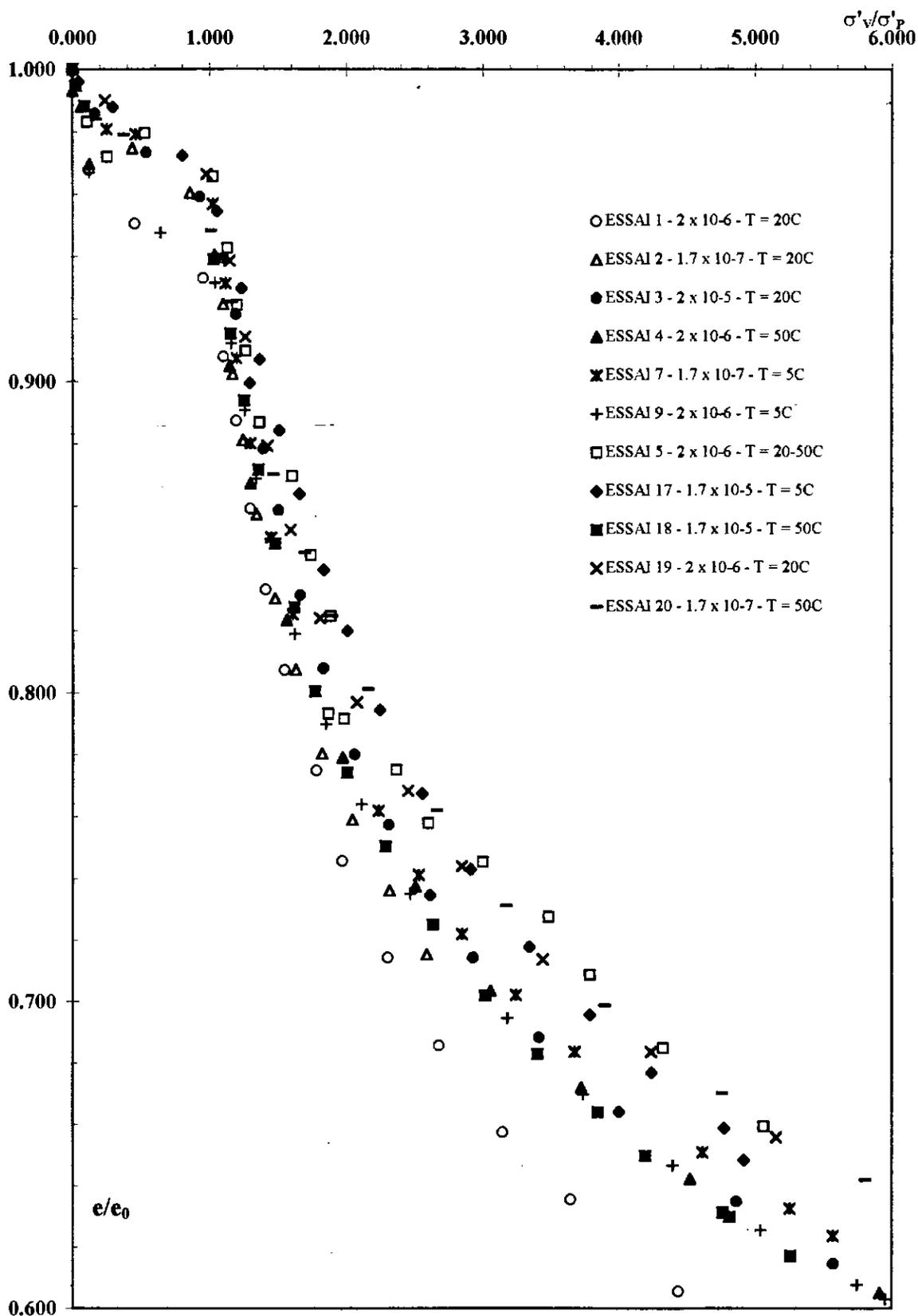


Fig. 4-52- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon}_v, T) \times e/e_0$ - Ensaios CRSC - T = variável - $\dot{\epsilon}_v =$ variável. Argila de Saint Polycarpe.

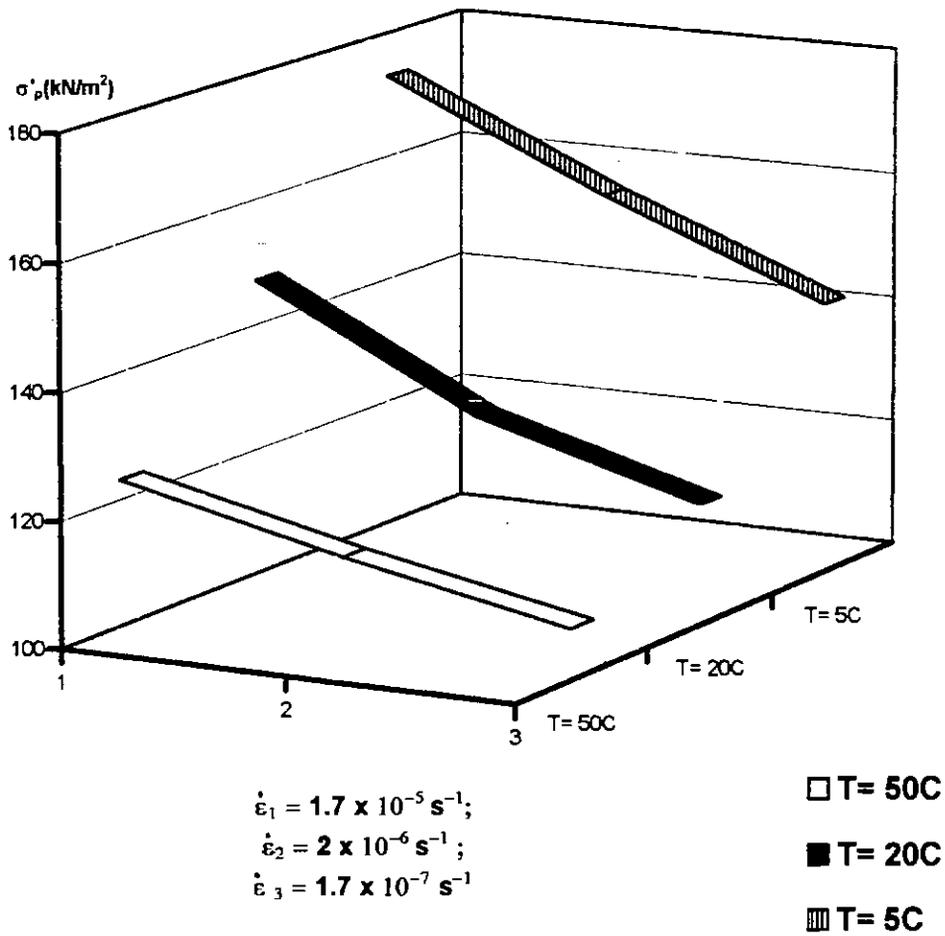


Fig. 4-53 - Superfície $\sigma'_v \times T \times \dot{\epsilon}_v - \dot{\epsilon}_v = \text{variável} - T = \text{variável} - \text{ensaios CRSC} - \text{Argila de Saint Polycarpe.}$

4.5 ENSAIOS ESPECIAIS

4.5.1 Ensaios de Fluência

Nos ensaios CRSC observou-se que as maiores deformações ocorrem para maiores temperaturas e menores velocidades de deformação vertical específica. Nos ensaios denominados nesta dissertação de ensaios de fluência, a velocidade de deformação não era controlada, mas foi calculada ao longo do ensaio a medida que as deformações se desenvolviam.

De acordo com a “strain-rate theory”(teoria dos processos viscosos), descrita por Mitchell (1964), a resistência seria função da temperatura e da velocidade de ensaio.

$$= \frac{2SkT}{\lambda} \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{B}\right) + \frac{2S\Delta F}{\lambda N} \quad (4-6)$$

A descrição detalhada de todas as parcelas desta equação, bem como a teoria dos processos viscosos pode ser obtida também em Mitchell (1976). Analisando-se a equação acima, qualitativamente, observa-se que :

- como $\ln \dot{\varepsilon}$ é negativo (as velocidades de deformação vertical específica normais são menores que 1 s^{-1}), nos ensaios de resistência à velocidades de deformação vertical específica maiores ($T = \text{constante}$), a resistência obtida é maior pois o termo $\ln \dot{\varepsilon}$ fica “menos” negativo;
- em ensaios de adensamento com velocidade de deformação vertical específica maiores, as deformações serão menores pois a resistência é maior;
- para ensaios de resistência à temperatura variável, executados à mesma velocidade, o termo $T \ln \dot{\varepsilon}$ fica menor com o aumento da temperatura, logo a resistência decresce com o aumento de T , logo em ensaios de adensamento com temperaturas maiores as deformações são maiores.

Apresenta-se da Fig. 4-54 a Fig. 4-61 a comparação dos resultados obtidos para os ensaios de fluência executados sob temperatura controlada.

OED. 1,2 E 4

σ'_v (kN/m²)

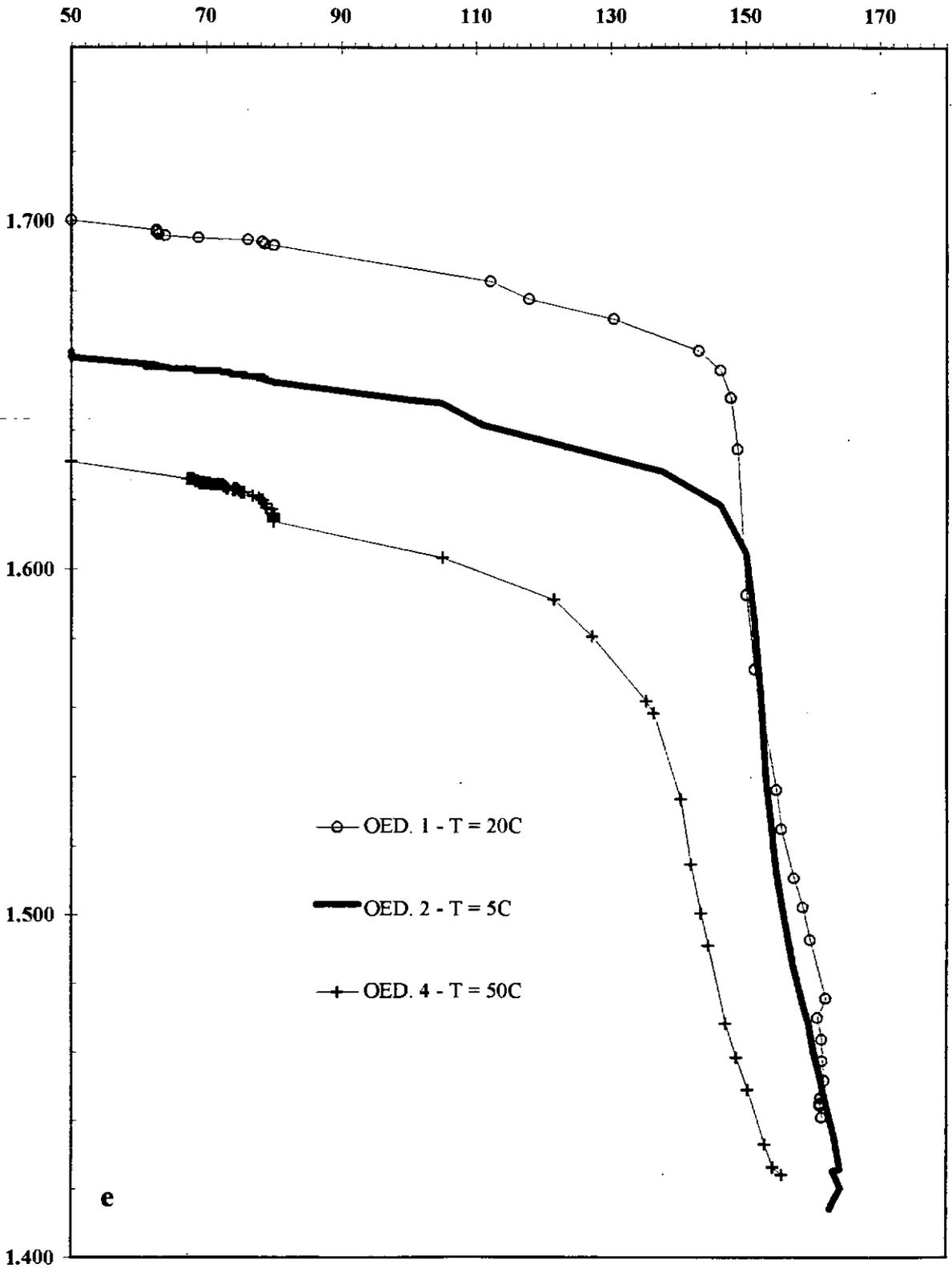


Fig.4-54 σ'_v x e - ensaios de fluência - OED1,2 e 4. Argila de Saint Polycarpe.

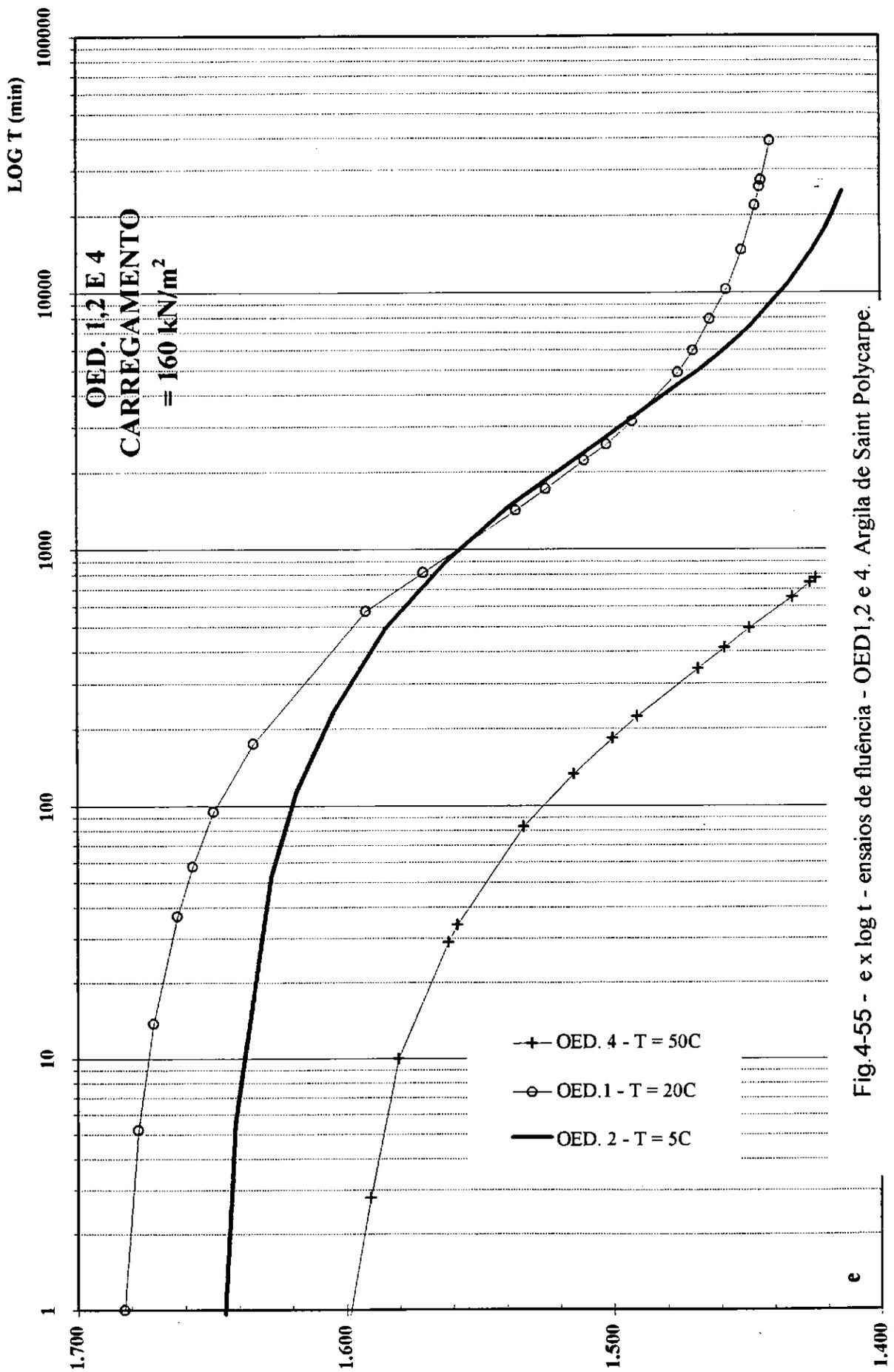


Fig. 4-55 - e x log t - ensaios de fluência - OED 1,2 e 4. Argila de Saint Polycarpe.

OED. 1,2 E 4 - CARREGAMENTO=160 kN/m²

LOG VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO (s⁻¹)

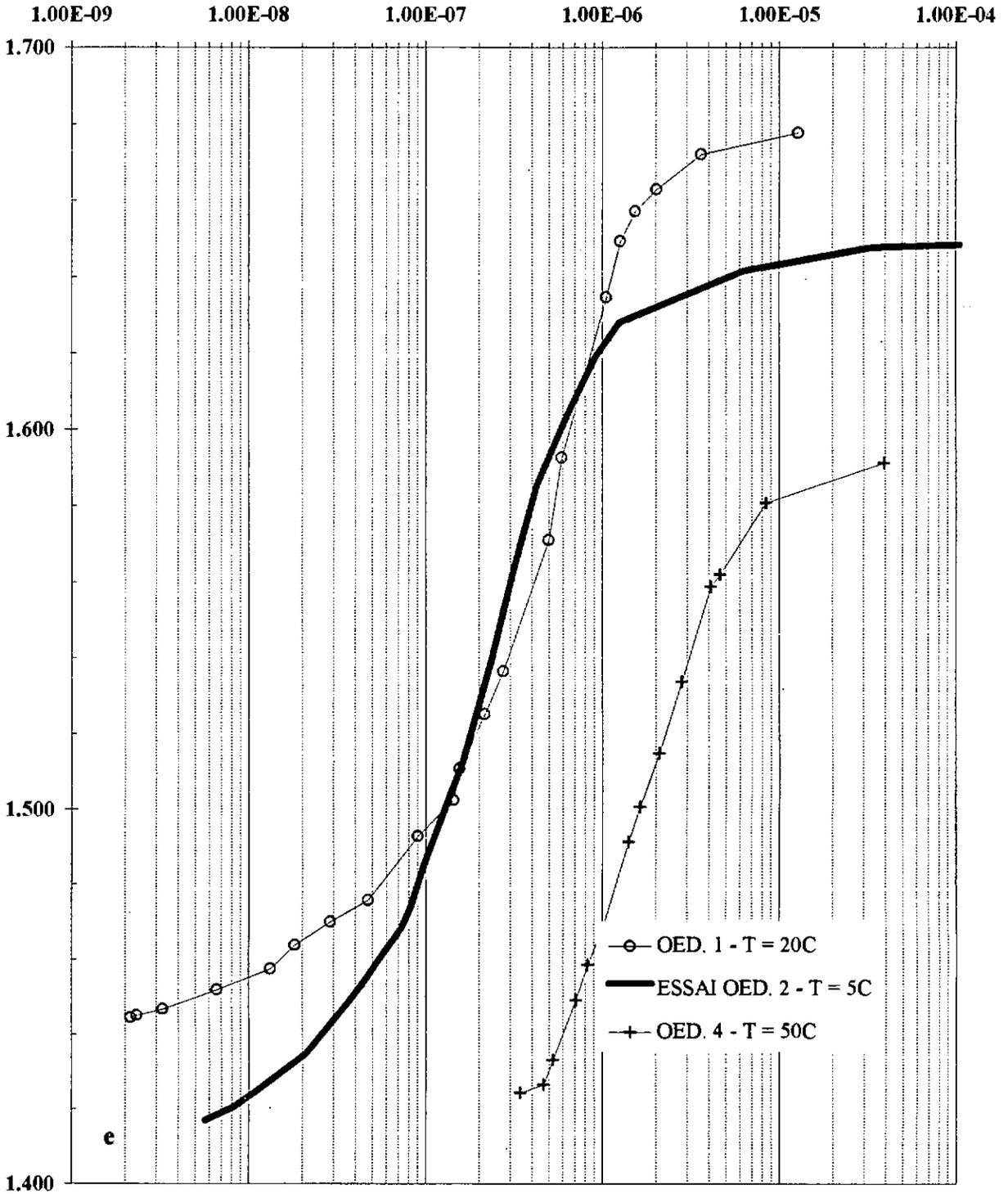


Fig.4-56 - Log ε̇, x e - ensaios de fluência - OED1,2 e 4. Argila de Saint Polycarpe.

OED 1, 2 E 4 - CARREGAMENTO = 160 kN/m²

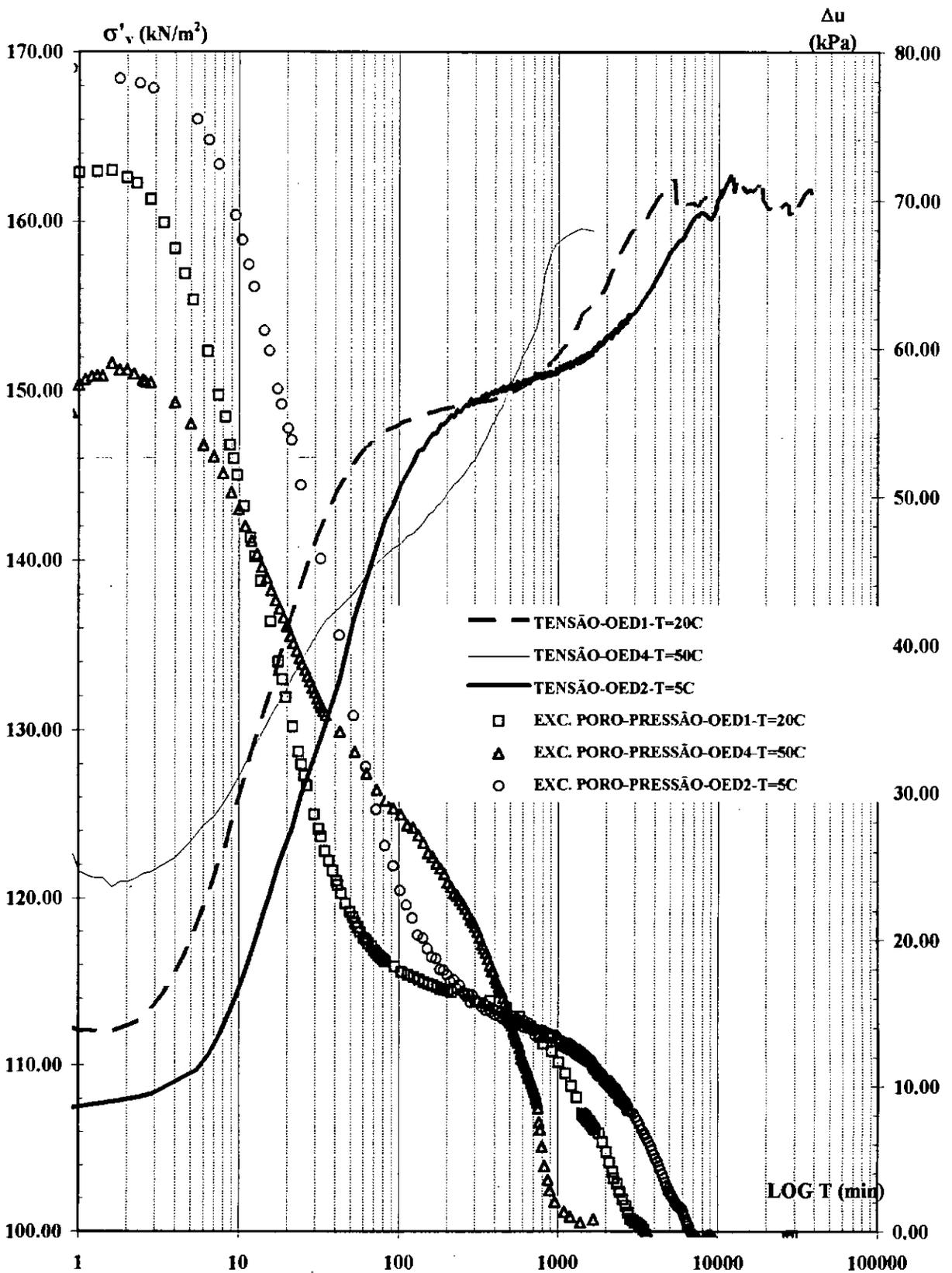


Fig.4 - 57- $\Delta u_b \times \log t$; $\sigma'_v \times \log t$ - ensaios de fluência - OED1,2 e 4. Argila de Saint Polycarpe.

OED. 1,3 E 5

σ'_v (kN/m²)

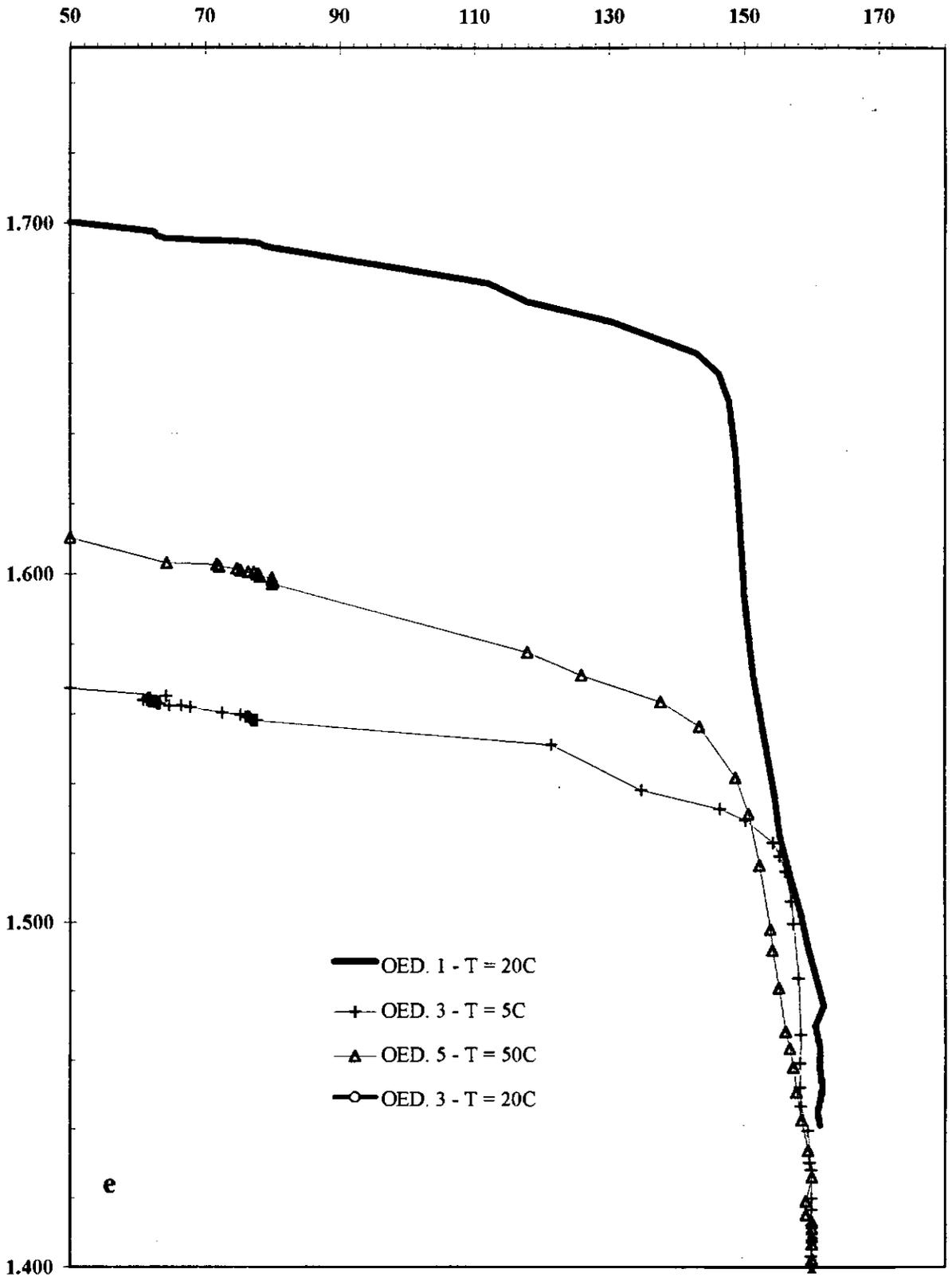


Fig.4-58 σ'_v x e- ensaios de fluência - OED1,3 e 5. Argila de Saint Polycarpe.

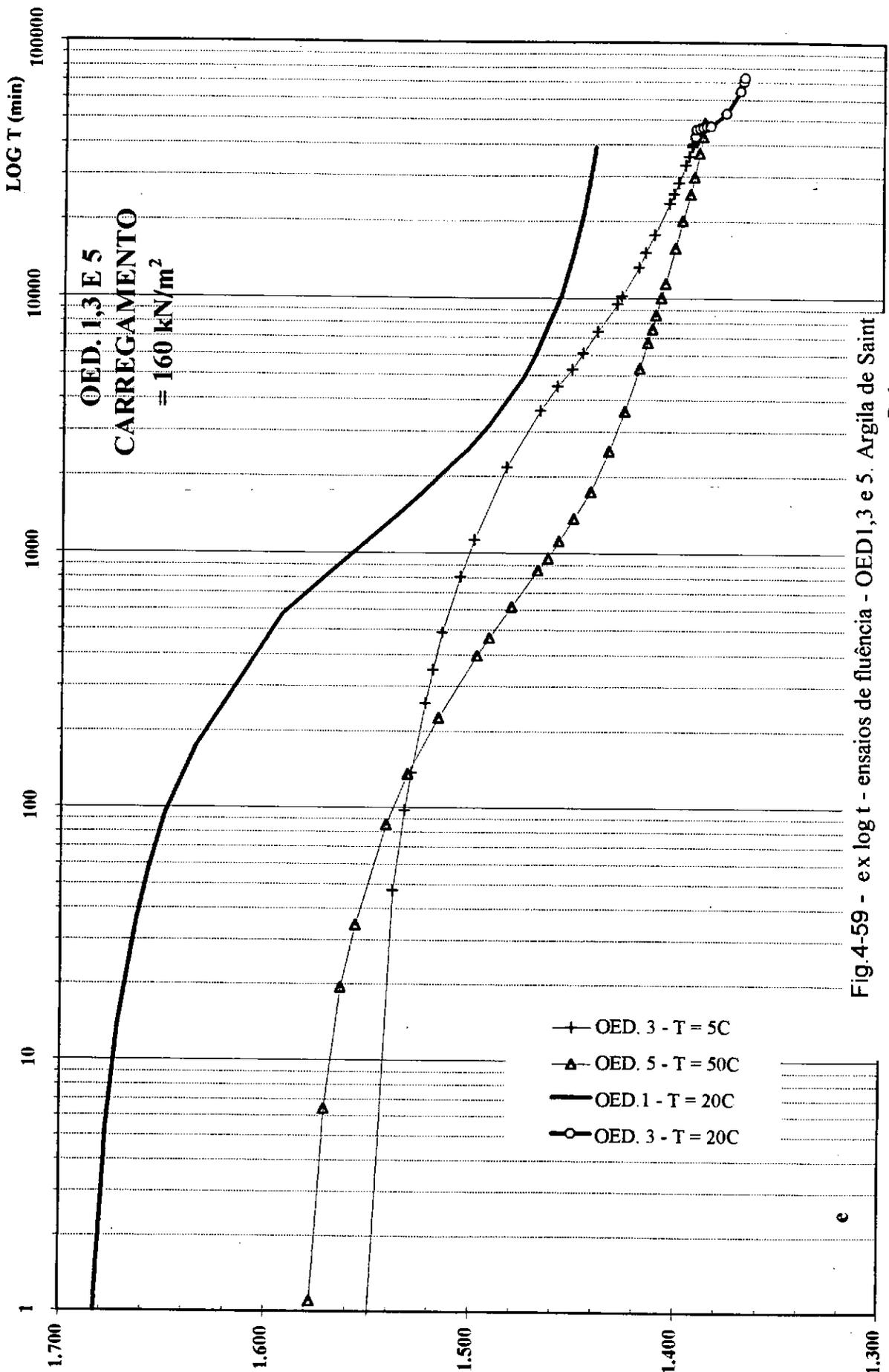


Fig.4-59 - ex log t - ensaios de fluência - OED1,3 e 5. Argila de Saint Polycarpe.

OED. 1, 3 E 5 - CARREGAMENTO = 160 kN/m²

LOG VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO (s⁻¹)

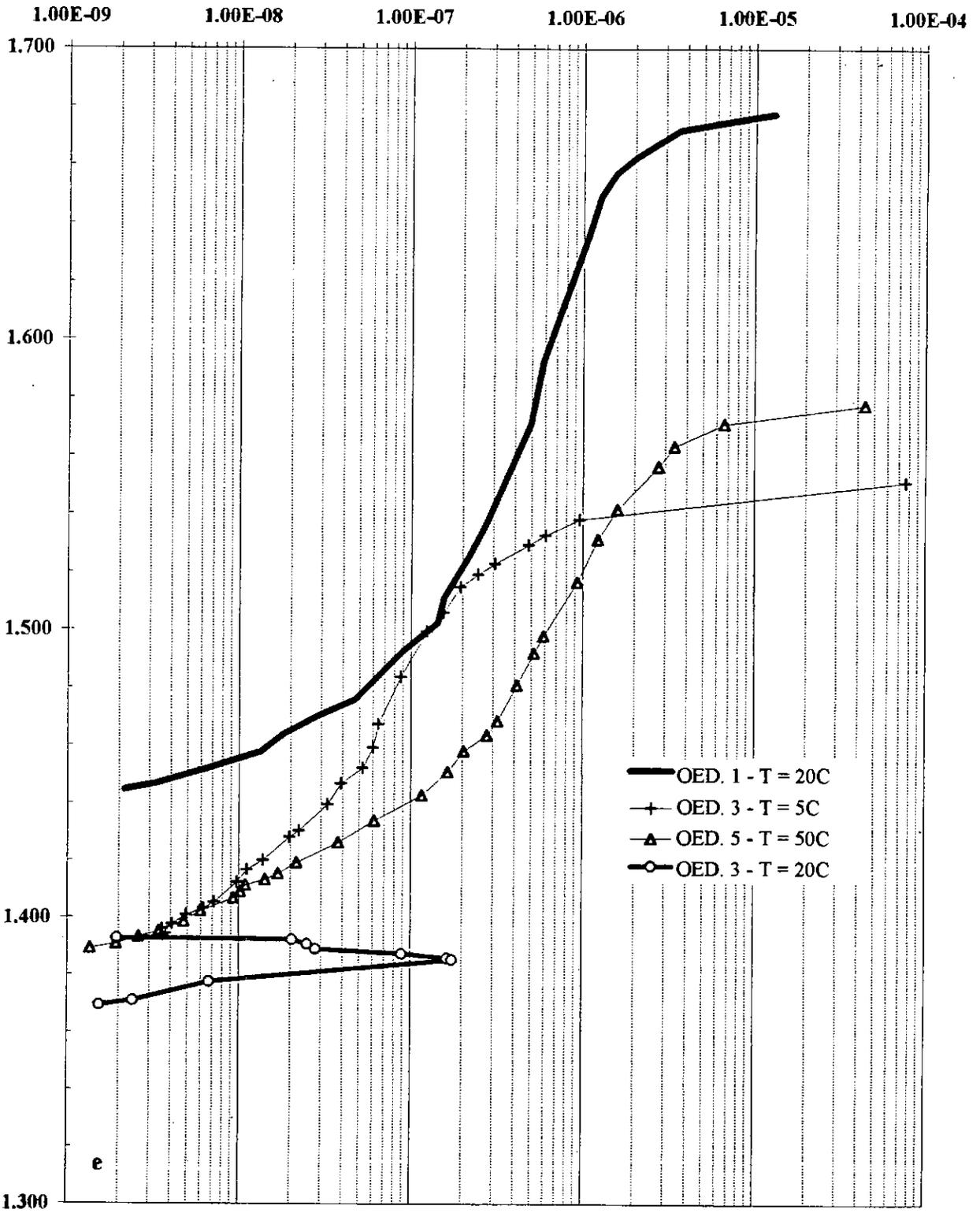


Fig. 4-60 - Log ε_v x e - ensaios de fluência - OED1,3 e 5. Argila de Saint Polycarpe.

OED 1,3 E 5 - CARREGAMENTO = 160 kN/m²

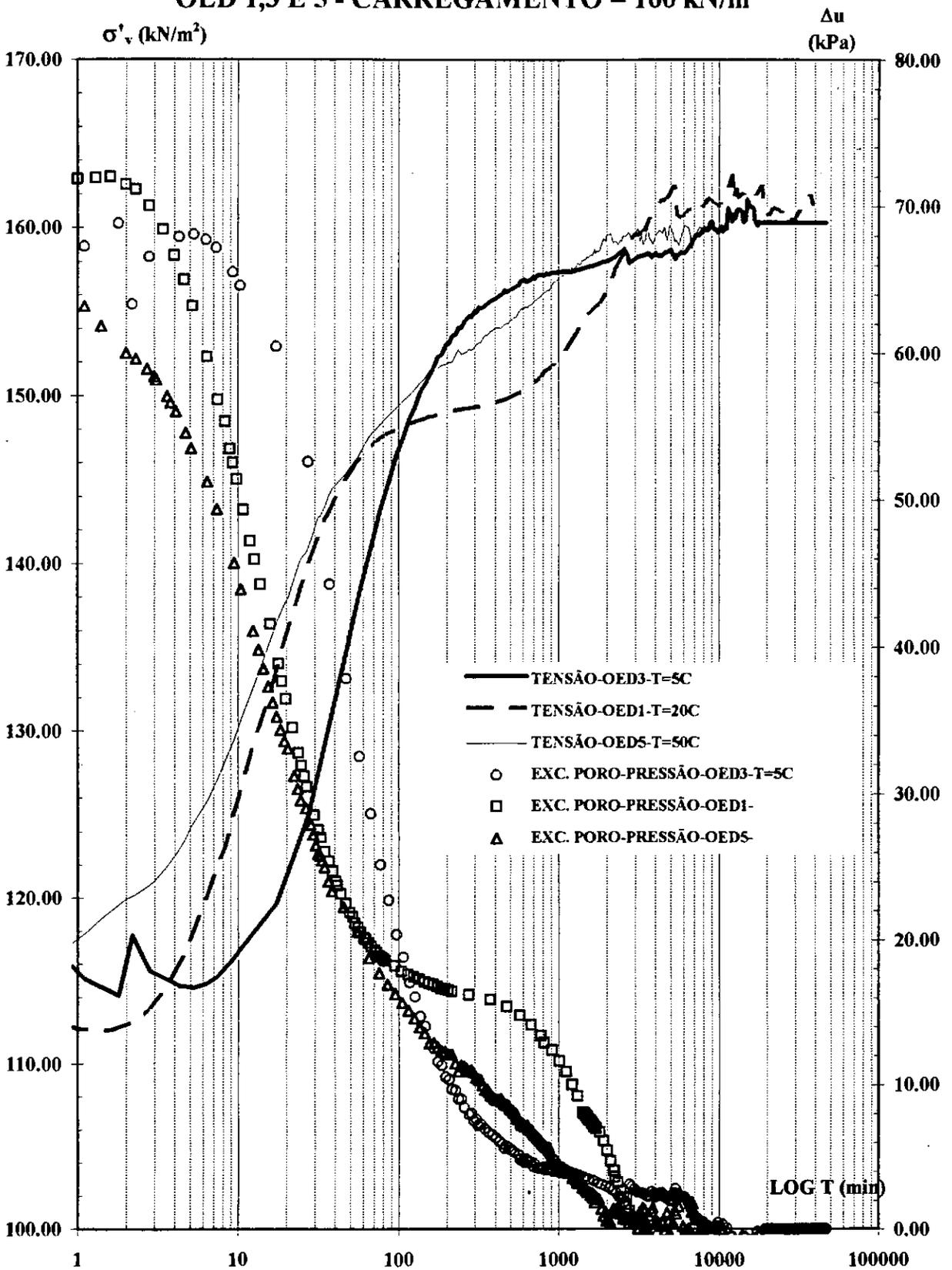


Fig.4-61 - $\Delta u_b \times \log t$; $\sigma'_v \times \log t$ - ensaios de fluência - OED1,3 e 5. Argila de Saint Polycarpe.

Observou-se nos ensaios de fluência, que para maiores temperaturas a amostra atingia o secundário mais rapidamente, conforme indicado na Tabela 4-5. Como já citado, o aumento da temperatura diminui a viscosidade, aumentando a facilidade da água percolante atravessar os vazios do solo e o excesso de poro-pressão se dissipa mais rapidamente, como pode-se observar no quadro a seguir, onde se indica o tempo aproximado decorrido entre o carregamento de 160kN/m^2 até a dissipação de poro-pressão.

Tabela 4-5 - Ensaio de fluência - tempo para dissipação das poro-pressões.

| ENSAIO | T(°C) | TEMPO (min) | ÍNDICE DE VAZIOS |
|--------|-------|-------------|------------------|
| OED1 | 20 | 3455 | 1.489 |
| OED2 | 5 | 6792 | 1.453 |
| OED3 | 5 | 7097 | 1.430 |
| OED4 | 50 | - | - |
| OED5 | 50 | 1935 | 1.441 |

Dentro do tubo de coleta de amostras, esquematizado na Fig. 3-3, as amostras dos ensaios OED 2 e OED 4 estão adjacentes, bem como as amostras dos ensaios OED 3 e 5 . Os resultados foram analisados em função desta proximidade e incluindo-se os resultados do ensaio OED1.

A amostra do ensaio OED1 é a que apresenta o maior índice de vazios inicial e portanto sua curva σ'_v x e está com valores de índice de vazios maiores que os dos demais ensaios, inclusive o OED2 e 3 executados a 5°C .

Mitchell et al.(1968), ao executarem ensaios de fluência com variação de temperatura em argilas naturais, observaram um aumento 100 vezes da velocidade de deformação vertical específica devido a uma variação de 17°C , para a argila ensaiada. Durante o ensaio de fluência se a temperatura for constante $\dot{\epsilon}_v$ está diminuindo (a taxa de variação de $\dot{\epsilon}_v$ é negativa). Ao aumentar-se a temperatura do sistema, uma energia é fornecida, de forma que a aceleração

passa a ser positiva e a velocidade de deformação vertical específica aumenta, conforme apresentado na Fig. 4-62.

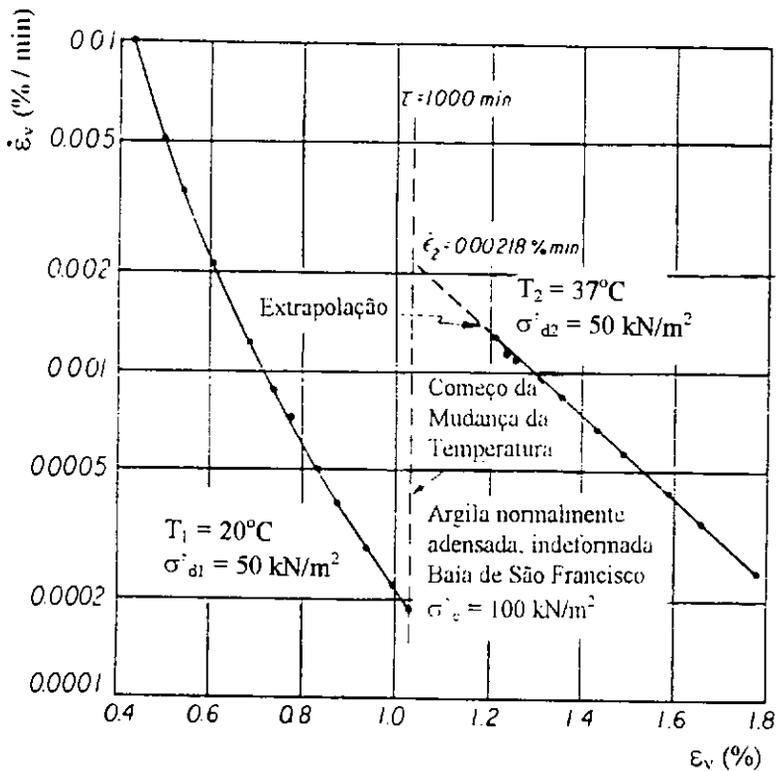


Fig. 4-62 - Relação entre ϵ_v e $\dot{\epsilon}_v$ para fluência da argila natural de San Francisco, submetida à variação rápida de temperatura. Mitchell et al. (1968).

Ao final do ensaio OED3 à 5°C, em Saint Polycarpe, alterou-se a temperatura para 20°C. Durante a variação de temperatura do ensaio OED3, no trecho em que a velocidade vai aumentando até alcançar a curva de 20°C, não se obteve a medida de poro-pressão pois não se dispunha da curva de calibração para a faixa de variação de temperatura utilizada, entretanto as medidas de deformação foram efetuadas em função do tempo, para o cálculo das velocidades de deformação vertical específica.

Ao se aumentar a temperatura a velocidade de deformação vertical específica, que estava diminuindo (aceleração negativa), passa a aumentar (aceleração positiva). Com a temperatura estabilizada em 20°C a velocidade de deformação vertical específica recomeça a diminuir (a aceleração passa a ser negativa novamente). Esta variação de sinal da aceleração não é instantânea pois ao se aumentar lentamente a temperatura as deformações não se iniciaram imediatamente. É possível que isto se deva a uma equalização de temperatura ao

longo do corpo de prova. Entretanto como só dispomos de um ensaio de fluência onde se variou a temperatura durante o ensaio, esta discussão será melhor esclarecida futuramente quando se prevê a execução de mais ensaios deste tipo, inclusive com a utilização de uma amostra disponível, próxima à utilizada no ensaio OED1. Poderá então se fazer a comparação das curvas $\log \dot{\epsilon}_v \times \epsilon_v$ à 20°C obtidas em ensaios em amostras com umidade inicial semelhantes.

Nos ensaios de adensamento cujo carregamento é executado de uma só vez (SSL - single stage load), inicialmente há um rápido aumento de velocidade para baixas deformações e um patamar de tensão na curva $\sigma'_v \times \log t$ nas proximidades da tensão de sobreadensamento. Observa-se também um patamar na curva de poro-pressões $\times \log$ tempo apresentada nas Fig. 4-57 e 4-61. Para temperaturas mais altas este patamar ocorre para um valor de poro-pressão mais alto, indicando uma tensão de sobreadensamento menor.

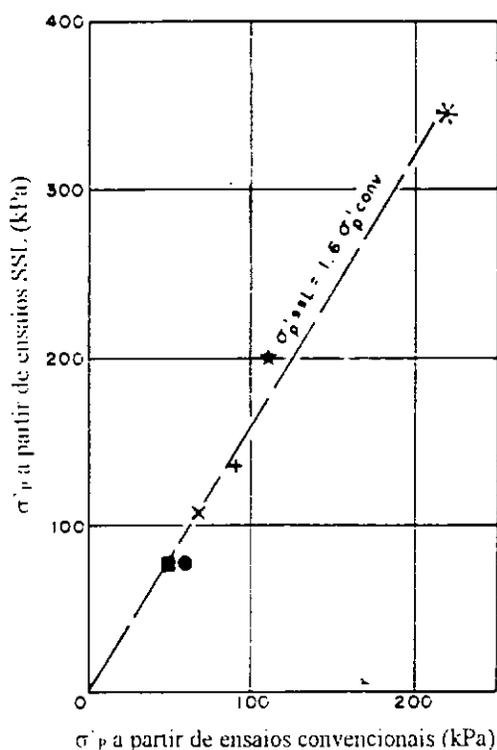


Fig. 4-63 - Correlação entre a tensão de sobreadensamento e α_2 determinada a partir de ensaios SSL em argilas da região de Champlain. Leroueil et al.(1983).

Leroueil et al.(1980) propoem um método para a determinação da tensão de sobreadensamento em ensaios SSL, a partir dos patamares das curvas $\sigma'_v \times \log t$ e $\Delta u_b \times \log t$,

para as argilas sensíveis. Entretanto, é necessário que o carregamento seja da ordem de 1.5 à 3.0 vezes a tensão de sobreadensamento prevista inicialmente, o que não ocorre nesta série de ensaios realizados em Saint Polycarpe.

Embora não se possa deduzir as tensões de sobreadensamento a partir destes ensaios utilizando o método proposto, observa-se que os patamares das curvas σ'_v x $\log t$ apresentam valores menores e ficam menos definidos a medida que a temperatura aumenta, indicando que para altas temperaturas a velocidade de deformação vertical específica ao se atingir σ'_p é maior com o aumento da temperatura do ensaio. Para os ensaios realizados à 50°C, o patamar nem chega a se definir, indicando que nas proximidades da tensão de sobreadensamento a velocidade de deformação vertical específica do ensaio é alta.

O coeficiente α_2 , definido em (4-2), obtido para os ensaios tipo SSL é da ordem de 1.6 conforme a Fig. 4-63.

Tabela 4-6 - Índice de vazios dos ensaios de para as velocidades de deformação utilizadas nos ensaios

| ENSAIOS | VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO(s^{-1}) | ÍNDICE DE VAZIOS |
|---------|--------------------------------------|------------------|
| OED 1 | 2×10^{-6} | 1.662 |
| | 1.7×10^{-7} | 1.519 |
| OED 2 | 2×10^{-6} | 1.632 |
| | 1.7×10^{-7} | 1.519 |
| OED 3 | 2×10^{-6} | 1.540 |
| | 1.7×10^{-7} | 1.512 |
| OED 4 | 1.7×10^{-7} | 1.512 |
| OED 5 | 2×10^{-6} | 1.548 |
| | 1.7×10^{-7} | 1.451 |

Para verificar a validade do modelo proposto por Leroueil (1985) incluíram-se os resultados dos ensaios de fluência na curva normalizada. Para a determinação da tensão de

sobreadensamento relativa a cada velocidade de deformação (calculada) e temperatura utilizada no ensaio foram adotadas as tensões de sobreadensamento obtidas da curva $\sigma'_p \times \epsilon_v$.

A Tabela 4-6 apresenta a variação do índice de vazios com a velocidade de deformação. Com estes valores e os das tensões de sobreadensamento, plotou-se os resultados na curva normalizada apresentada na Fig. 4-64. Observa-se que a medida que o solo se deforma a velocidade de deformação vai diminuindo.

ENSAIOS CRSC

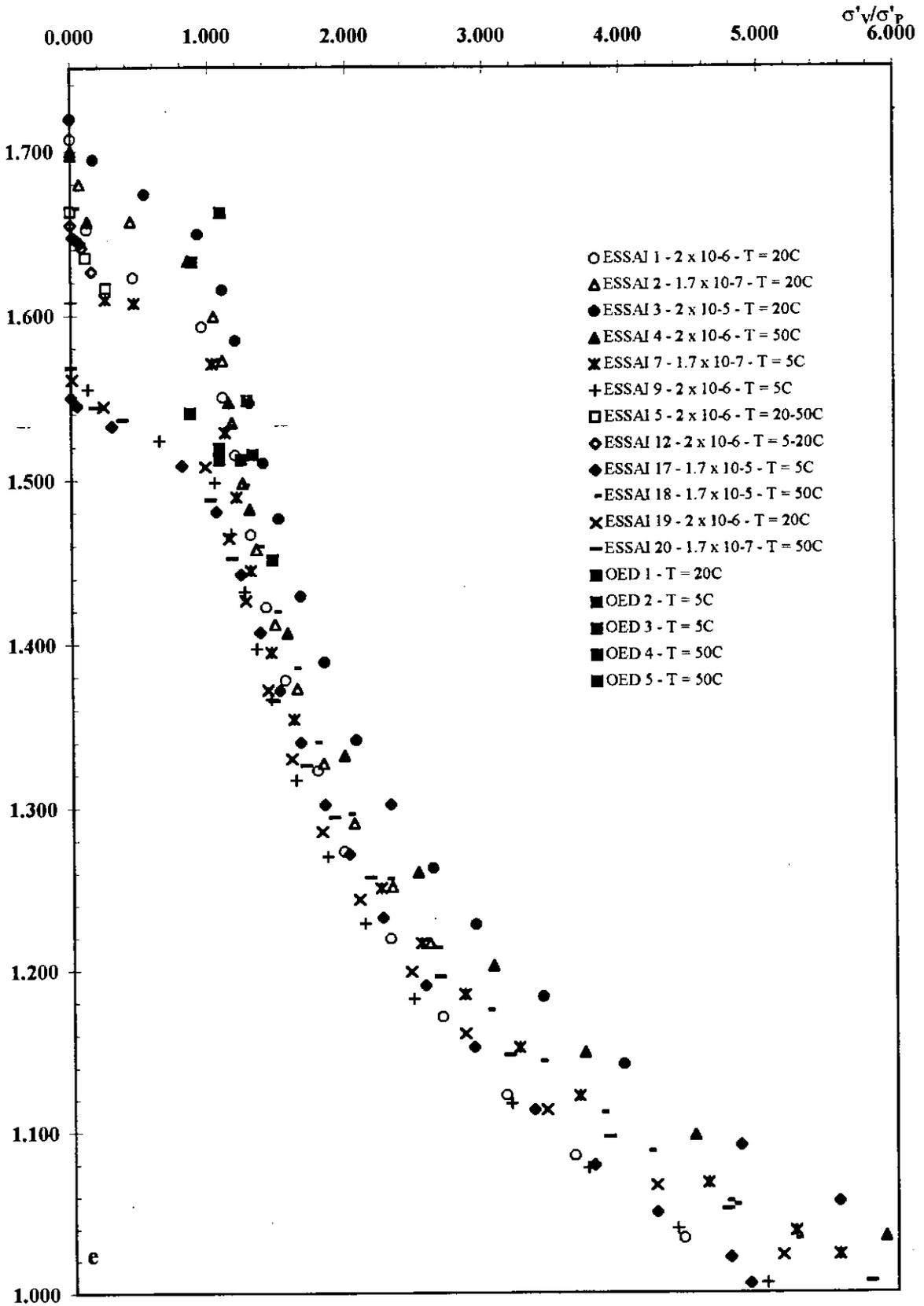


Fig. 4-64- Curva normalizada $\sigma'_v / \sigma'_p (\epsilon_v) \times e$ - Ensaios CRSC e de fluência - T = variável - ϵ_v = variável. Argila de Saint Polycarpe.

4.5.2 Ensaio CRSC executados após os ensaios de fluência

Apresenta-se da Fig. 4-65 a Fig. 4-68 a comparação dos resultados obtidos para os ensaios CRSC e convencionais executados sob temperatura constante, utilizando-se as amostras ao fim dos ensaios de fluência.

Executaram-se ensaios CRSC a $T = 20^{\circ}\text{C}$ e $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, com as amostras utilizadas após os ensaios de fluência, para se determinar a ocorrência de alguma variabilidade das amostras utilizadas. As curvas tensão x índice de vazios do ensaio CRSC6 executado após o ensaio de fluência à 20°C apresentaram-se concordantes com as curvas CRSC executadas a partir de amostras naturais à 20°C , entretanto observou-se um ligeiro aumento nas poro-pressões medidas.

As curvas obtidas no ensaio CRSC10 ao final do ensaio OED2 - 5°C não puderam ser comparadas com as demais, pois devido ao vazamento ocorrido ao fim do ensaio OED2 não se pode determinar a tensão efetiva ao fim do ensaio.

Observou-se a concordância entre as curvas obtidas do ensaio CRSC 15 executado após o ensaio OED3- 5°C e as curvas CRSC naturais. As poro-pressões apresentaram um ligeiro aumento e este aumento deve-se ao fato da amostra apresentar-se com um índice de vazios menor que o natural.

Com relação à condutividade hidráulica, os ensaios executados após os ensaios de fluência apresentaram uma ligeira diminuição da permeabilidade quando comparados com os ensaios CRSC executados em amostras naturais.

É interessante notar a diferença nas curvas σ'_v x e dos ensaios CRSC e dos ensaios convencionais. Para os ensaios convencionais, as velocidades de deformação são variáveis durante o ciclo de carregamento de 24h, e são em geral, menores que as dos ensaios CRSC, logo as curvas dos ensaios convencionais apresentam maiores deformações verticais que os ensaios CRSC.

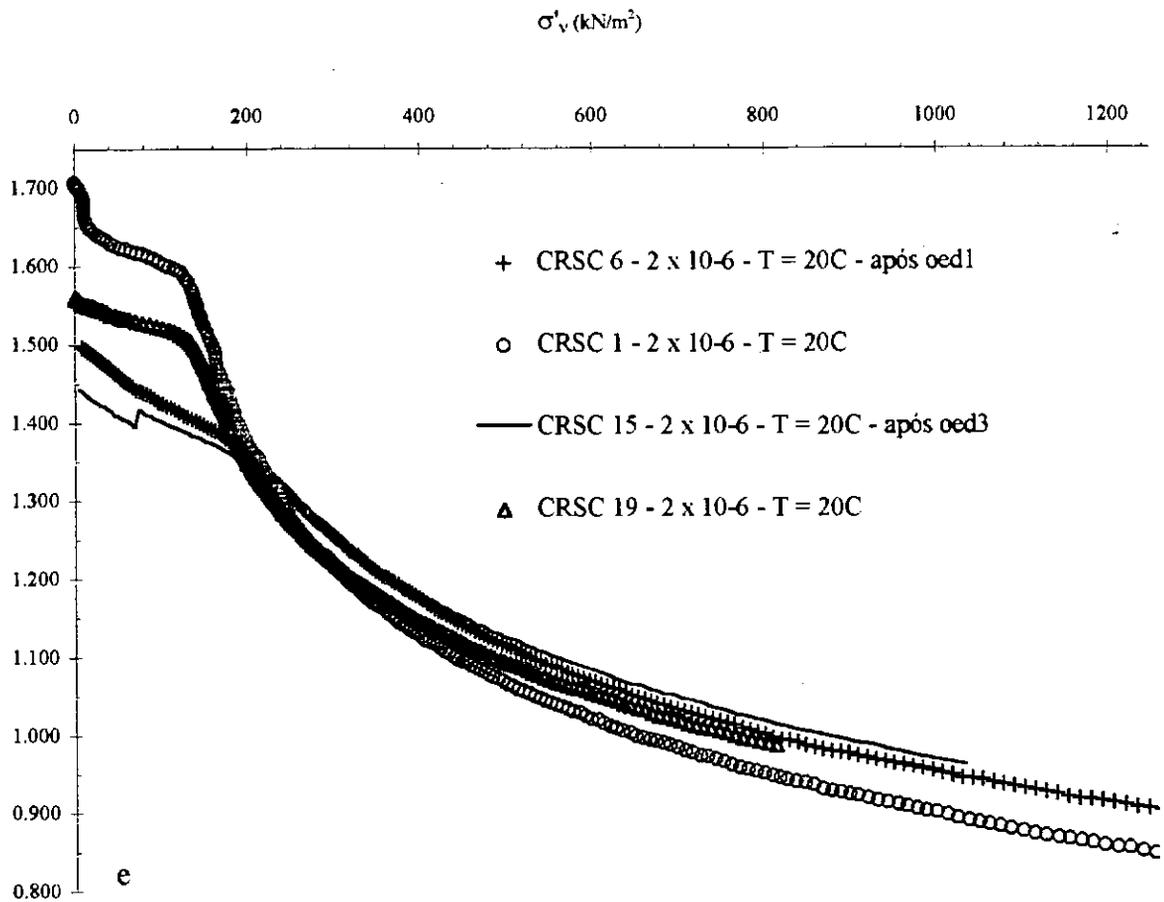


Fig.4-65 - σ'_v x $\epsilon_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20°C - ensaios CRSC após ensaios de fluência. Argila de Saint Polycarpe.

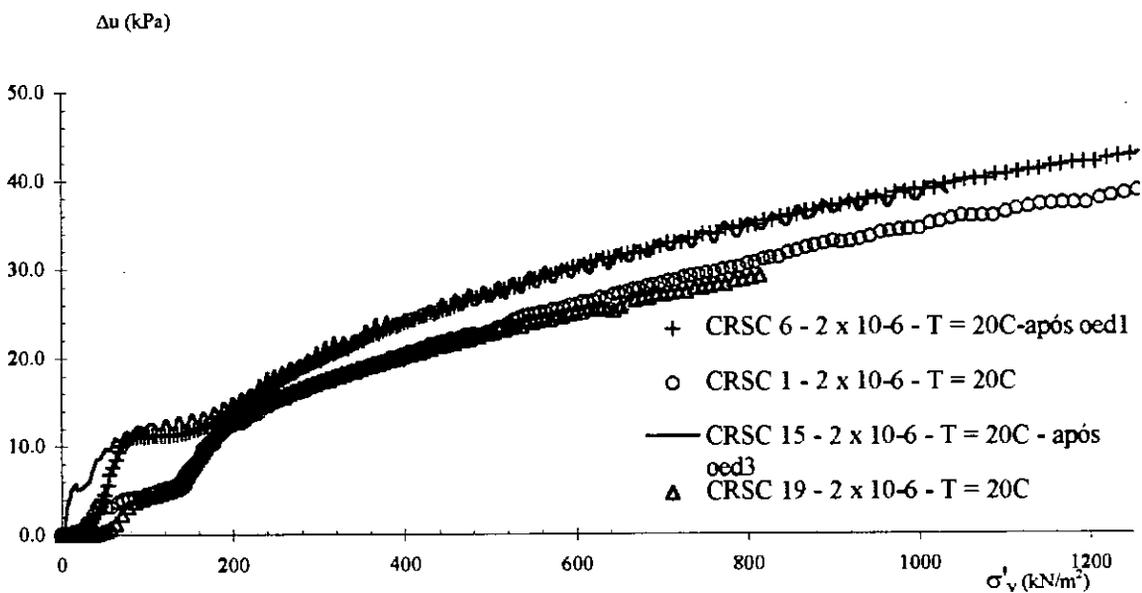


Fig.4-66 - σ'_v x Δu_b - $\dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; T = 20°C - ensaios CRSC após ensaios de fluência. Argila de Saint Polycarpe.

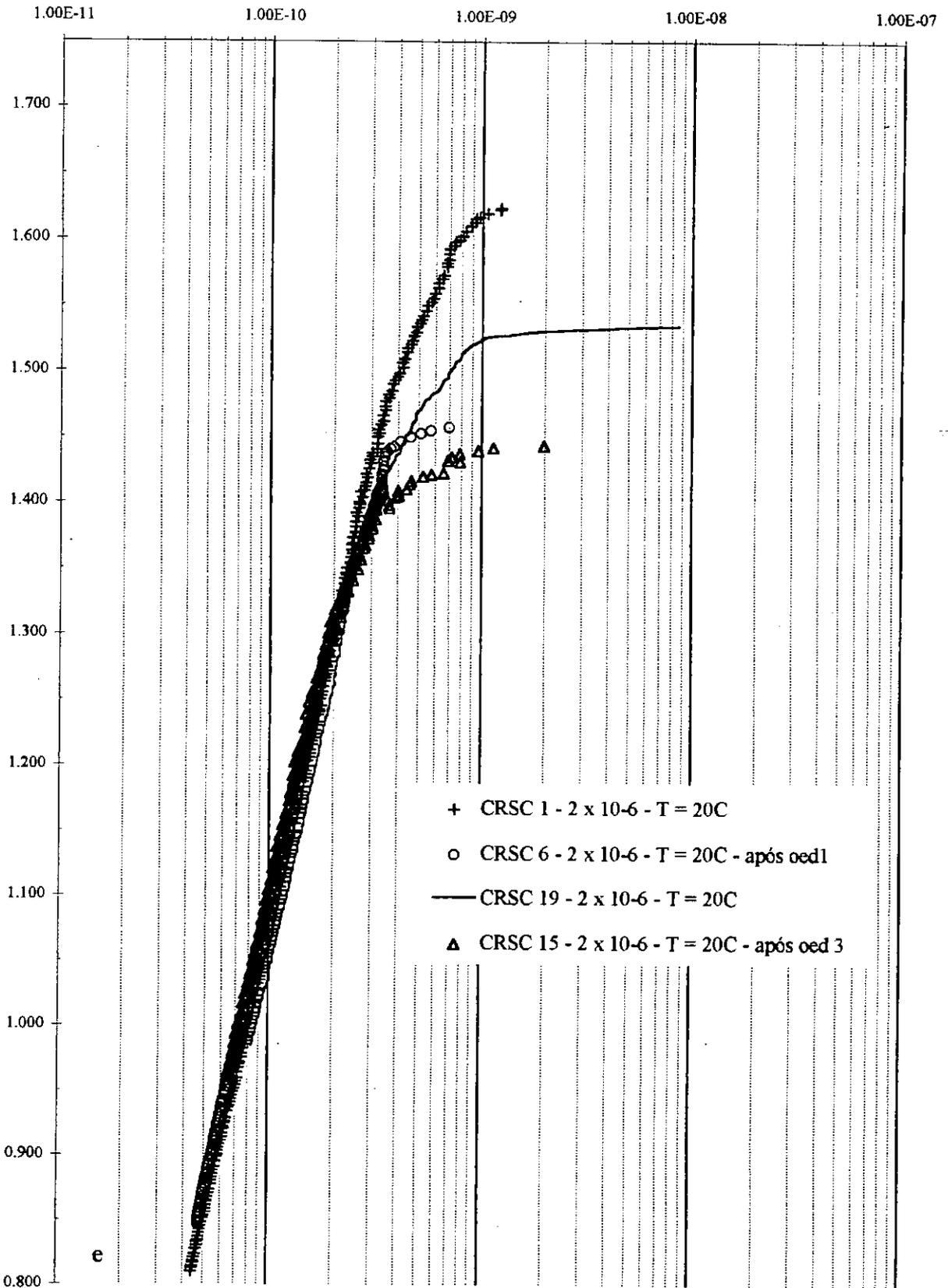


Fig. 4-67 $-\log k \times e - \dot{\epsilon}_v = 2 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$; $T = 20^{\circ}\text{C}$ - ensaios CRSC após ensaios de fluência. Argila de Saint Polycarpe.

ST 1 E 3 E CRSC 6 E 15 - T = 20 °C

σ'_v (kN/m²)

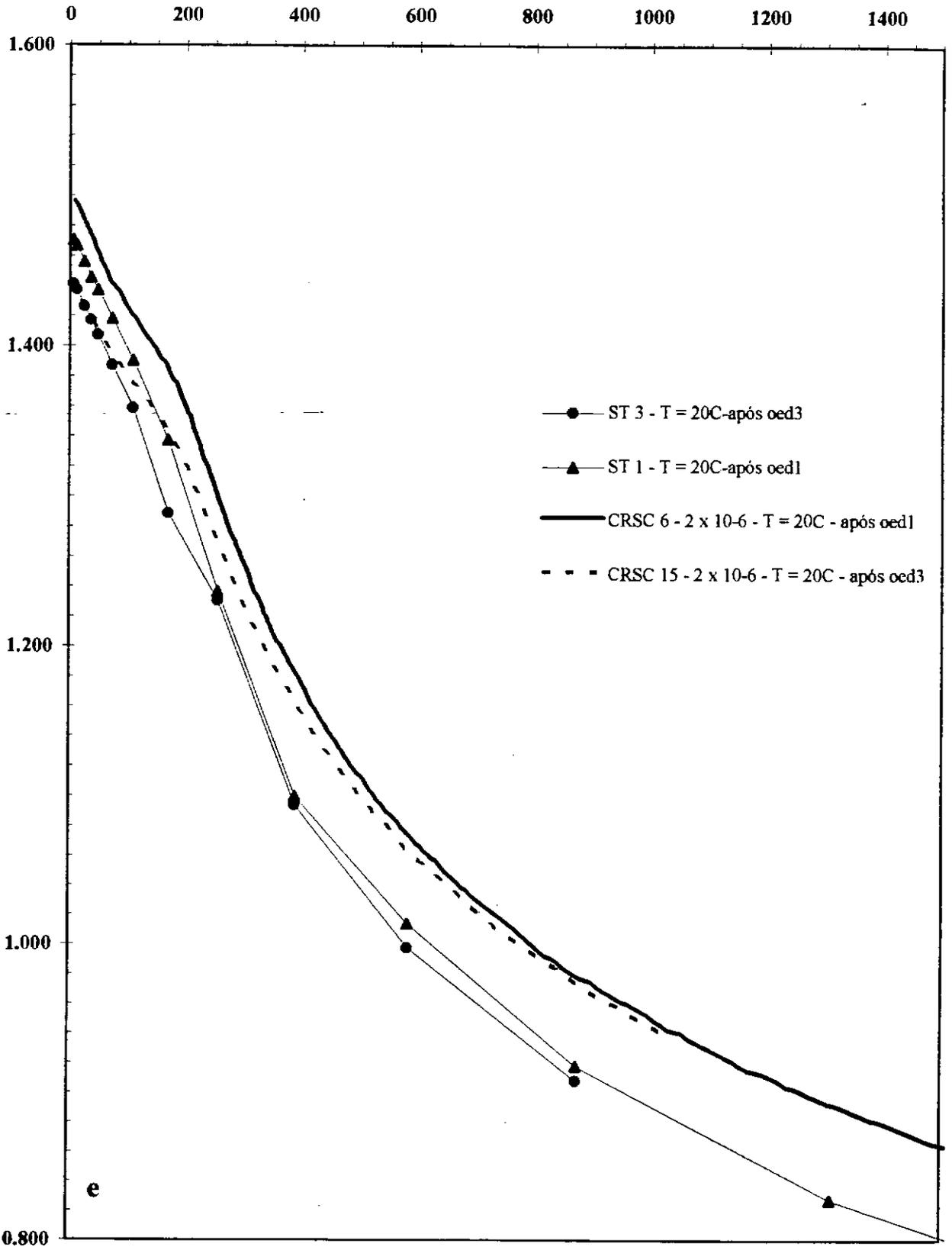


Fig. 4-68 $-\sigma'_v \times e - T = 20^\circ\text{C}$ - Ensaios CRSC e convencionais após ensaios de fluência - Argila de Saint Polycarpe.

5. CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA FUTURA PESQUISA

5.1 CONCLUSÕES

Este estudo teve por objetivo a análise do comportamento viscoso da argila Saint Polycarpe e duas argilas japonesas, Ariake e Osaka. Os resultados obtidos em termos de tensão-deformação-velocidade de deformação-temperatura, para Saint Polycarpe, permite concluir que esta argila apresenta um comportamento compatível com o modelo proposto por Boudali (1994). Os valores de tensão-índice de vazios-velocidade de deformação-temperatura obtidos dos ensaios CRSC estão compatíveis com os valores obtidos dos ensaios de fluência.

A condutividade hidráulica desta argila variou em função da variação da viscosidade/temperatura dentro do esperado. Além disto quando se compara com resultados obtidos em argilas suecas, observa-se uma concordância da evolução da tensão de sobreadensamento com a temperatura.

Apesar da dificuldade de se propor um modelo com base em resultados de ensaios realizados em amostras naturais, obteve-se uma visão geral do comportamento da argila Saint Polycarpe, em função das variações de temperatura e velocidade, ao se analisar os resultados em função do índice de vazios.

Os valores obtidos para tensão de sobreadensamento, quando relacionados em função da temperatura e velocidade dos ensaios apresentam-se coerentes. Do ponto de vista de procedimento e análise de ensaios de laboratório, conclui-se que ao se analisar os resultados de ensaios executados a 20°C deve-se considerar que as argilas de Champlain estão submetidas a uma temperatura média anual de 5°C. No trecho virgem da curva σ'_v x e, observou-se que para uma determinada deformação vertical específica, pode haver um aumento de 19% na tensão efetiva quando se diminui a temperatura de 20 a 5°C em ensaios realizados a uma velocidade de deformação vertical específica de $1.7 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Da mesma forma, em ensaios de laboratório executados a esta velocidade, a 5°C, obtem-se valores de deformação vertical específica correspondentes a 70% dos valores obtidos em ensaios a 20°C, para uma determinada tensão vertical efetiva. A tensão de sobreadensamento pode sofrer um aumento de 20% ao se variar a temperatura de 20°C à 5°C.

Supondo que as velocidades de deformação vertical específica de campo sejam de 10^{-7} s^{-1} , em ensaios de laboratório CRSC a velocidades maiores que este valor haveria uma

superestimativa dos valores de deformação. Mas o que ocorre, na realidade, é que os efeitos de temperatura e velocidade se sobrepõem, pois no campo as velocidades são menores do que as usualmente utilizadas em laboratório, conduzindo a maiores deformações, já a temperatura de campo, na região de Champlain, é menor que a de laboratório, conduzindo à menores deformações.

As deformações obtidas em ensaios CRSC executados à 10^{-6} s^{-1} são não apenas menores que as obtidas em ensaios convencionais como também menores que as deformações de campo.

Para as condições brasileiras, não há uma diferença significativa entre a temperatura do solo “in situ” e no laboratório. Entretanto durante a coleta e transporte a amostra está submetida a um gradiente de temperatura elevado durante algumas horas, que pode alterar suas condições iniciais, dependendo da sensibilidade da argila a uma variação de temperatura.

O que se observa é que de uma maneira geral, as argilas de regiões e origem diferenciadas apresentam comportamentos similares quando sujeitas à variação de temperatura, em função, por exemplo, de sua plasticidade e OCR. Tanto argilas moldadas em laboratório (Campanella & Mitchell -1968) quanto argilas naturais (Boudali - 1994), apresentam esta sensibilidade.

Das argilas analisadas, a argila de Saint Polycarpe é a que apresentou maior sensibilidade à variação de temperatura, quando se compara com as argilas japonesas ensaiadas a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Para a argila de Saint Polycarpe uma variação de temperatura de 20 a 5°C corresponde, para uma determinada deformação vertical específica, a um aumento de 15% de tensão vertical, para as argilas de Ariake e Osaka este aumento seria de apenas 10%. Este comportamento pode ser explicado em função da diferença de plasticidade e porcentagem de argila presente nas amostras.

5.2 PROPOSTAS PARA PESQUISAS FUTURAS

Em continuidade ao trabalho de pesquisa descrito nesta dissertação, pretende-se ensaiar argilas de origem e características diferentes, visando fornecer uma visão mais ampla do comportamento de argilas de diferentes locais, quando sujeitas à variação de temperatura e velocidade. Inicialmente pretende-se proceder a coleta de amostras de argilas orgânicas brasileiras com o auxílio do amostrador Laval e executar uma série de ensaios nestas argilas.

Paralelamente, serão executados ensaios nas amostras remanescentes das argilas japonesas. Aguarda-se também uma remessa de amostras de argilas mexicanas para se iniciar uma série de ensaios.

Com relação às argilas canadenses, especificamente a de Saint Polycarpe, pretende-se analisar o fenômeno da estruturação com base nos resultados dos ensaios já realizados e na próxima série de ensaios. Com o banco de dados já disponível na Universidade Laval, de outras argilas canadenses da região de Champlain, pretende-se verificar as equações propostas por Moritz (1995) e adaptá-las a estas argilas.

Com relação às argilas brasileiras pretende-se fazer um estudo do comportamento viscoso destas argilas, executando-se ensaios de adensamento unidimensional e ensaios de resistência. Além disto pretende-se executar uma série de ensaios em argilas orgânicas brasileiras para se obter as propriedades características das mesmas. Uma outra abordagem seria o estudo da estruturação das argilas orgânicas brasileiras pois a matéria orgânica parece ser um dos fatores que influencia a estruturação dos solos argilosos.

Pretende-se executar ensaios de mineralogia em todas as argilas ensaiadas para se ter uma base de comparação entre as diversas argilas estudadas.

Pretende-se também avaliar o comportamento “in situ” de argilas canadenses frente a variação de temperatura e velocidade de deformação vertical específica em colaboração com o Ministério dos Transportes de Québec.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akagi, H. & Komiya, K. (1995) - Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature - Compression and Consolidation of Clayey Soils, Yoshikuni & Kusakabe Balkema (editores) - Rotterdam : 3-8.
- Bjerrum, L. (1967) - Engineering geology of norwegian normally consolidated marine clays - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 17 (2) : 81-118.
- Boudali, M. (1995) - Comportament Tridimensionel et Visqueux des argiles naturelles - Ph. D. These - Université Laval, Québec, Canada.
- Boudali, M. ; Leroueil, S. & B. R. Srinivasa Murthy (1994) - Viscous behavior of natural clays - Proc. 13th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, New Dehli : 411-416.
- Burghignoli, A., Desideri, A. & Miliziano, S. (1992) - Deformability of clays under non isothermal conditions - Rivista Italiana di Geotecnica - anno xxvi - n.4.
- Butterfield, R. (1979) - A natural compression law for soils (an advance to $e - \log p'$) - Géotechnique - vol. 27 : 469 - 480.
- Campanella, R. G. (1965) - Effect of temperature and stress on the time-deformation behavior of saturated clay - Ph.D. Thesis - University of California, Berkeley, USA.
- Campanella, R. G. & Mitchell, J. K. (1968) - Influence of temperatures variations on soil behaviour - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 94 (3) : 709-734.
- Carvalho, S. R. L. (1989) - Ensaios de adensamento edométrico com taxa constante de deformação específica. Tese MSc - COPPE - UFRJ.
- Demars, K. R. & Charles, R. D. (1982) - Soil volume changes induced by temperature cycling - Canadian Geotechnical Journal, vol. 19 : 188-194.
- Eriksson, L. G. (1989) - Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays - Proc. 12th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, Rio de Janeiro, vol. 3 : 2087-2090.
- Feijó, R. L. (1991) - Relação entre a compressão secundária, razão de sobreadensamento e coeficiente de empuxo no repouso - Tese Msc - COPPE - UFRJ.

- Head, K. H. (1994) - Manual of Soil Laboratory Testing - Segunda Edição - Jonh Wiley & Sons.
- Johnson, S. J. (1970) - Precompression for improving foundation soils - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 96(1):111-144.
- Kavazanjian, Jr. E. & Mitchell, J. K. (1984) - Time dependence of lateral earth pressure - Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, april: 530-533.
- Lacerda, W. A. (1976) - Stress relaxation and creep effects on the deformation of soil - Ph.D. Thesis - University of California, Berkeley, USA.
- Lacerda, W. A. (1977) - Discussion on the evaluation of K_0 during the drained creep in one-dimensional compression tests - Proc. 9th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, Tokyo , vol 3 : 347-348.
- Lacerda, W. A. & Martins, I. S. M. (1985) - Discussion of time dependence of lateral earth pressure - Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, october: 1242-1244.
- La Rochelle, P. , Leroueil, S & Tavenas, F., (1986) - A technique for long-term storage of clay samples. Canadian Geotechnical Journal, vol. 23 : 602-605.
- La Rochelle, P. , Leroueil, S & Tavenas, F., (1986) - A technique for long-term storage of clay samples. Canadian Geotechnical Journal, vol. 23 : 602-605.
- La Rochelle, P. , Sarrailh, J. , Tavenas, F. , Roy, M. & Leroueil, S. (1981) - Causes of sampling disturbance and design of a new sampler for sensitive soils. Canadian Geotechnical Journal, vol. 18 : 52-66.
- Leonards, G.A. & Altschaeffl, A.G. (1964) - Compressibility of clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 90, SM5 :133-155.
- Leroueil, S. (1995) - Could it be that clays have no unique way of behaving during consolidation? - Compression and Consolidation of Clayey Soils - editores Yoshikuni & Kusakabe : 219-228.
- Leroueil, S. Le Bihan, J.P. & Tavenas, F. (1980) - An approach for the preconsolidation pressure in sensitive clays Canadian Geotechnical Journal, vol. 17(3) : 446-453.
- Leroueil, S. ; Kabbaj, M. ; Tavenas, F. & Bouchard, R. (1985) - Stress-strain -strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays - Géotechnique vol. 35 (2) : 159-180.

- Leroueil, S., Samson, L. & Bozozuk, M. (1983) - Laboratory and field determination of preconsolidation pressures at Gloucester - Canadian Geotechnical Journal, vol. 20 : 477-490.
- Leroueil, S., Tavenas, F. & LeBihan, J.P.(1983) - Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada - Canadian Geotechnical Journal, vol. 20 : 681-705.
- Lima, G. P. (1993) - Estudo de uma teoria não linear para o adensamento unidimensional - Tese MSc - COPPE - UFRJ.
- Martins, I. S. M. (1987) - Comunicação Pessoal.
- Martins, I. S. M. (1992) - Fundamentos de um modelo de comportamento de solos argilosos saturados - Tese Dsc - COPPE - UFRJ.
- Martins, I. S. M. & Lacerda, W. A. (1985) - A theory of consolidation with secondary compression - - Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, San Francisco : 567-570.
- Martins, I. S. M. & Lacerda, W. A. (1994) - Sobre a relação índice de vazios - tensão vertical efetiva na compressão unidimensional - Solos e Rochas, São Paulo 17 (3) : 157-166.
- Mayne, P. W. & Kulhawy, F. H. (1982) - K_0 - OCR - Relationship in soil - Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol 108, n6 : 851-872.
- Mesri, G. (1973) - Coefficient of secondary compression - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 99 (1) : 123-137.
- Mesri, G. & Godlewski, P. M. (1977) - Time and stress compressibility interrelationship - Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol 103, n5 : 417-430.
- Mitchell, J. K.(1976) - Fundamentals of Soil Behavior - John Wiley & Sons.
- Mitchell, J. K. (1964) - Shearing resistance of soils as a rate process - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 90 (1) : 29-61.
- Mitchell, J. K., Campanella, R. G. & Singh, A.(1968) - Soil creep as a rate process - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 94 (1) : 231-253.
- Mitchell, J. K., Singh, A. & Campanella, R. G.(1969) - Bonding, effective stresses, and strength of soils - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 95 (5) : 1219-1246.

- Moritz, Lovisa (1995) - Geotechnical properties of clay at elevated temperatures - Compression and Consolidation of Clayey Soils - editores Yoshikuni & Kusakabe: 267-272.
- Paaswell, R. E. (1967) - Temperature effects on clay soil consolidation - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 93 (3) paper 5225 : 9-22.
- Perret, D. (1995) - Diagenèse mécanique précoce des sédiments fins du fjord du Saguenay, Québec. Ph.D. Thesis, Université Laval, Québec, Canada.
- Plum, R. L. & Esrig M.I (1969) - Some temperature effects on soil compressibility and pore water pressure - Effects of temperature and heat on engineering behavior of soils - Special Report n. 103, HRB, Washington, D.C. : 231-242.
- Schmertmann, J. H. (1983) - A simple question about consolidation - Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol 109, n1 : 119-122.
- Smith, R. E. & Wahls, H. E. (1969) - Consolidation under constant rates of strain - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol 95 (2) : 519-539.
- Tavenas, F. Leblond, P., Jean, P. & Leroueil, S. (1983). - The permeability of natural soft clays - Part I: Methods of laboratory measurement. Canadian Geotechnical Journal, vol. 20 (4) : 629-644.
- Taylor, D. W. (1942) - Research on consolidation of clays - Publication from Department of Civil and Sanitary engineering, M.I.T., serial 82.
- Taylor , D. W. & Merchant, W. (1940) - A theory of clay consolidation accounting for secondary compression - Journal of Mathematics and Physics - vol 19, n3 : 167-187.
- Tidfors, M. & Sällfors, G. (1989) - Temperature effect on preconsolidation pressure - Geotechnical Testing Journal, vol. 12 (1) : 93-97.
- Vieira, L. O. M. (1988) - Contribuição ao estudo do adensamento secundário - Tese MSc - COPPE - UFRJ.
- Wissa, E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. & Heiberg, S. (1971) - Consolidation at constant rate of strain - Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, vol. 97 (10) : 1393-1413.

Yong, R. N., Sethi, A. J. & La Rochelle, P. (1979) - Significance of amorphous material relative to sensitivity in some Champlain clays. Canadian Geotechnical Journal, vol. 16 (3) : 511-520.

Youssef, M.S., Sabry, A. & El Ramili, A.H. (1961) - Temperature changes and their effects on some physical properties of soil - Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng, Paris, vol. 1 : 419-421.

ANEXOS

1 - CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO CRS.

Calibração dos transdutores.

Procedeu-se a calibração dos transdutores para medidas de deformação, pressão e carga. Os transdutores de medida de carga foram calibrados da seguinte forma :

- 1-Leitura inicial (em volts), correspondente ao peso zero no pendural;
- 2-Acréscimo de pesos ao pendural e respectivas leituras em volts do valor correspondente em kg;
- 3-Através de regressão linear, obteve-se a reta que correlaciona kg x volts;
- 4-Inseriu-se a equação de reta no sistema de aquisição de forma a obter-se o resultado em kN, correspondente ao registro em volts.

A calibração dos transdutores de deslocamento foi executada da seguinte forma:

- 1-Leitura inicial (em volts), correspondente a deformação zero no paquímetro digital;
- 2-Deslocamento do LVDT e respectivas leituras em volts do valor correspondente em mm no paquímetro digital acoplado ao LVDT;
- 3-Através de regressão linear, obteve-se a reta que correlaciona mm x volts;
- 4-Inseriu-se a equação de reta no sistema de aquisição de forma a obter-se o resultado em mm, correspondente ao registro em volts.

Para a calibração do transdutor de pressão, utilizou-se o sistema de controle de pressão apresentado na Fig.3-5, com procedimento semelhante ao utilizado nos transdutores de carga e deslocamento.

Calibração do Equipamento a 50°C.

No decorrer do ensaio CRS 4 observou-se a variação da pressão de referência

da célula ao se variar a temperatura. A questão que se apresentava era se havia apenas uma variação do zero no sistema de aquisição ou se havia também uma variação angular da curva de calibração. Procedeu-se a calibração do sistema. Os resultados obtidos indicaram que houve apenas variação da referência.

Inicialmente preencheu-se a célula e a cuba com água a 20°C e aumentou-se a temperatura até 50°C. Deixou-se nestas condições por uma noite para que todo o sistema estivesse a 50°C. Calibrou-se então o sistema variando-se a pressão no sistema de pressão de potes de mercúrio e obtendo-se o respectivo valor no sistema de aquisição. As retas das duas calibrações obtidas são quase paralelas indicando uma mudança apenas na referência. Utilizou-se a equação da reta de calibração a 50°C para a correção dos dados obtidos, referindo-se sempre à temperatura de 20°C, pois não é conveniente interromper a aquisição de dados no decorrer do ensaio para se inserir as equações no sistema de aquisição, toda a vez que ocorre uma mudança de temperatura.

Não se observou qualquer alteração no valor zero do anel de carga quando submetido a um aumento de temperatura. De acordo com o manual do fabricante do anel de carga, o efeito da temperatura é menor que 0,0008%/°F . Manteve-se um dispositivo acoplado ao sistema de carga que permitiu leitura contínua de temperatura ao longo do tempo e observou-se que a temperatura máxima no anel foi de 35°C, o que fornece uma variação de 0.02% do valor da carga.

Calibração do Equipamento a 5°C.

Para a realização dos ensaios a 5°C foi necessária a relocação do equipamento para a câmara fria localizada no laboratório de Mecânica do Gelo, situado dois andares acima do nível dos primeiros ensaios. Foi portanto necessário rever todo o sistema de aquisição, com procedimento análogo a calibração do equipamento para 20°C. Refez-se também a calibração a 20°C pois com a relocação do equipamento, a fiação do sistema de aquisição foi alongada.

2 - CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DOS ENSAIOS DE FLUÊNCIA.

O sistema de carregamento da célula edométrica de 15cm de diâmetro, denominada célula 2, é composto de pendural, braço e pesos. Foi necessária a utilização de braço de alavanca, em virtude do alto valor das tensões dos ensaios e da grande dimensão do corpo de prova.

Equipamento utilizado:

.anel dinamométrico com capacidade de carga de 10 kN, com deflectômetro Wykeham Farrance (0.002mm);

.pendural, braço e pesos.

Procedeu-se inicialmente à calibração do anel dinamométrico, correlacionando-se pesos x deformação do deflectômetro e calculando-se a constante do anel. A partir de então calibrou-se o braço de alavanca fazendo-se a correlação peso sobre o pendural x peso lido deflectômetro do anel. A calibração dos captores de poro-pressão foi executada de modo análogo ao da célula 1, para 20°C, 5°C e 50°C.

3 - DESCRIÇÃO DA AMOSTRAGEM COM O USO DO AMOSTRADOR LAVAL

Introdução

A coleta de amostras de solo ditas indeformadas é um processo dispendioso e tecnicamente problemático. Estudos mostram que argilas sensíveis têm suas resistências drenada e não drenada e índices de compressão significativamente reduzidos devido ao amolgamento do solo durante amostragem.

As principais causas do amolgamento são :

- Distorção mecânica devido a penetração do amostrador;
- Distorção mecânica e sucção durante a retirada da amostra do amostrador;
- Amolgamento do solo devido a perfuração, antes da coleta da amostra, ou pelo pistão na hora da coleta;
- Mudança da tensão total existente em campo.

Das causas citadas, a inevitável é a mudança da tensão total “in situ”, entretanto as demais podem ser atenuadas ou eliminadas, dependendo do processo de coleta utilizado. Dos processos de coleta o que apresenta melhor performance é o de coleta de amostras em blocos. Entretanto é um processo caro e nem sempre viável.

La Rochelle et al.(1981) propõem a utilização de um amostrador com tubo de 200 mm de diâmetro (denominado amostrador Laval) para obtenção de amostras de alta qualidade. Estudos mostram (Leroueil et al. 1983) que para as argilas de Champlain, ensaios de adensamento executados em amostras coletadas com o amostrador Laval fornecem valores de σ'_p mais elevados. Entretanto amostras coletadas com amostradores de 70 e 75mm de diâmetro fornecem valores comparáveis, a profundidades inferiores à 5m, porém com valores maiores a medida que a profundidade aumenta. Já os amostradores de 51mm de diâmetro fornecem valores muito baixos de σ'_p .

A estocagem de solo por um longo período de tempo tem sido utilizada por institutos de pesquisa e por laboratórios comerciais, para pesquisas a longo termo. Se as amostras não são bem armazenadas, embora não se perca a umidade pode ocorrer envelhecimento da argila e conseqüente alteração das propriedades físico-químicas e mecânicas. Para prevenir estes

efeitos, a estocagem de amostras por um longo período deverá ser executada de modo a impedir o contato da argila com o ar e portanto a oxidação.

La Rochelle et al.(1986) propoem uma técnica de armazenamento com base em resultados obtidos em amostras armazenadas durante um período de 3 a 8 anos. Nos ensaios executados durante este período, em acordância com a técnica proposta, observou-se uma constância dos Limites de Atterberg e pH dos solos ensaiados. Descreve-se a seguir os procedimentos de coleta e armazenagem em utilização atualmente no laboratório de geotecnia da Universidade Laval.

Procedimentos de coleta

As amostras são coletadas com o auxílio do amostrador Laval descrito por La Rochelle et al.(1981), cujo desenho é apresentado na Fig A3-1.

Para a execução da perfuração utiliza-se uma perfuratriz, acoplada a hastes padrão, bem ancorada ao solo . A perfuração tem início com um trado helicoidal de grande diâmetro (Foto 1 e Foto 2), para atravessar a camada de argila ressecada da superfície. Após atravessada a camada ressecada procede-se a perfuração com circulação, utilizando-se um tubo adaptado com uma hélice na extremidade (Foto 3 e Foto 5), até se atingir a camada a ser investigada .

Em geral não se utiliza revestimento pois durante este processo furo é estabilizado com uma mistura de bentonita e barita (150 l de água: 33 kg de bentonita : 14 kg de bária). O revestimento pode ser utilizado caso exista uma camada superficial de areia, que não possa ser estabilizada com bentonita.

Ao se alcançar a camada a ser investigada, instala-se o tubo coletor associado ao tubo-guia de perfuração (Foto 7 e Foto 9). O tubo coletor é o tubo interno que coleta amostra e tem um diâmetro grande o suficiente para reduzir o amolgamento em torno do centro da amostra. A sua extensão é tal que se possa aproveitar o máximo de solo em cada manobra, pois cerca de 8 cm das partes superior e inferior da amostra são jogadas fora devido ao amolgamento.

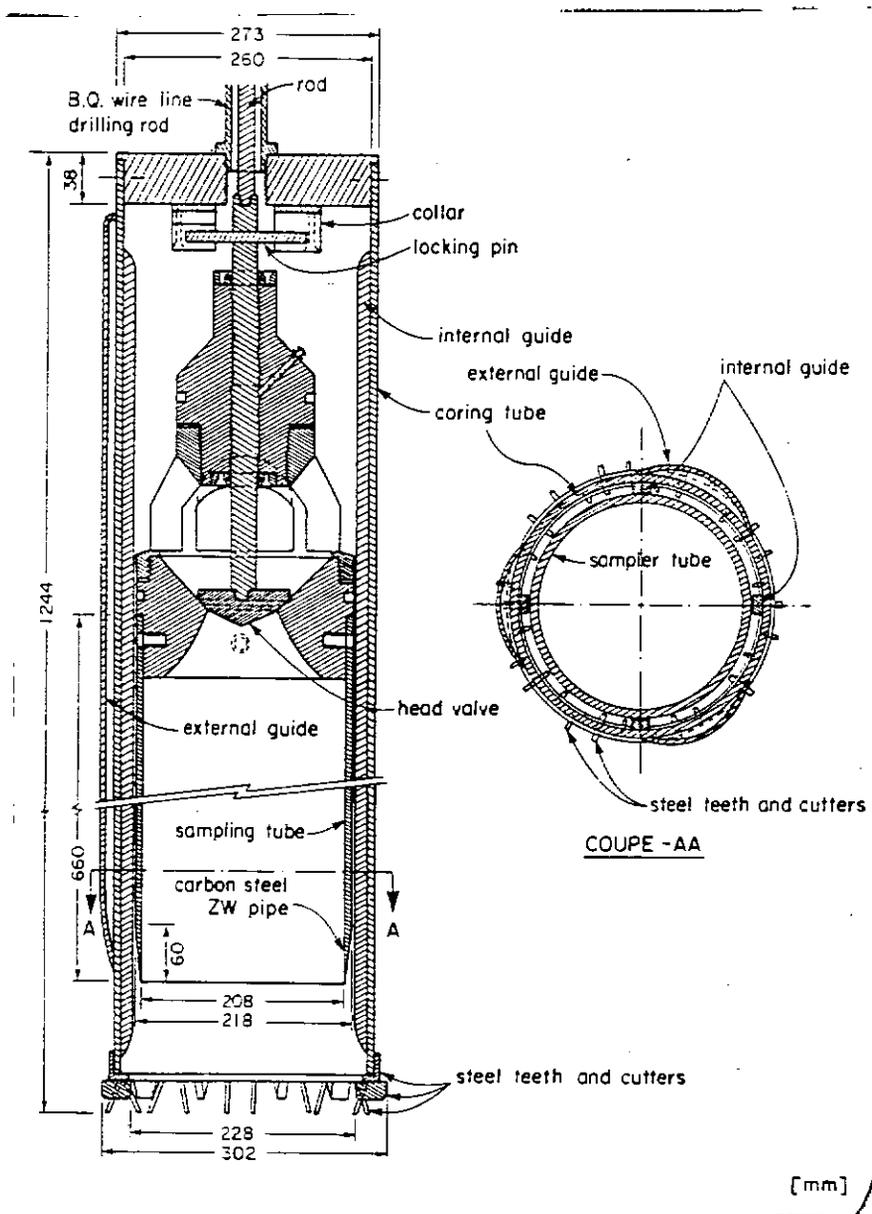


Fig. A3-1 -Desenho esquemático do amostrador Laval. La Rochelle et al.(1981).

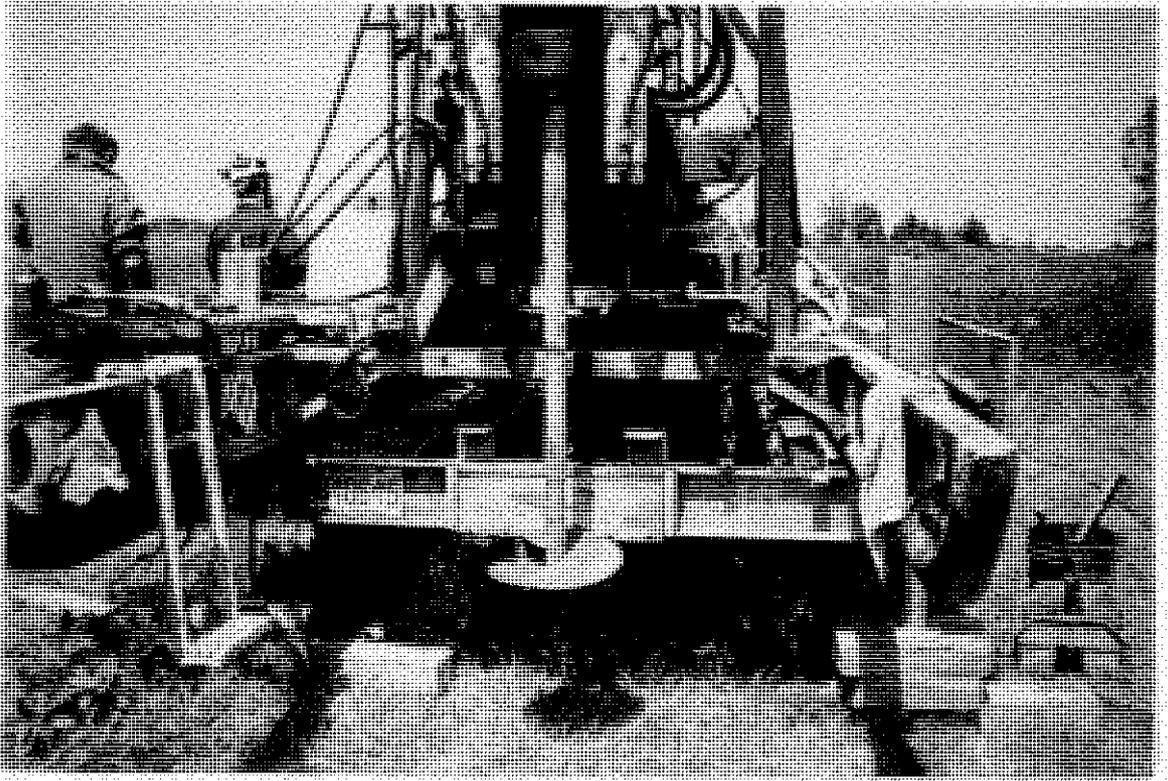


Foto 1 - Trado helicoidal de grande diâmetro.

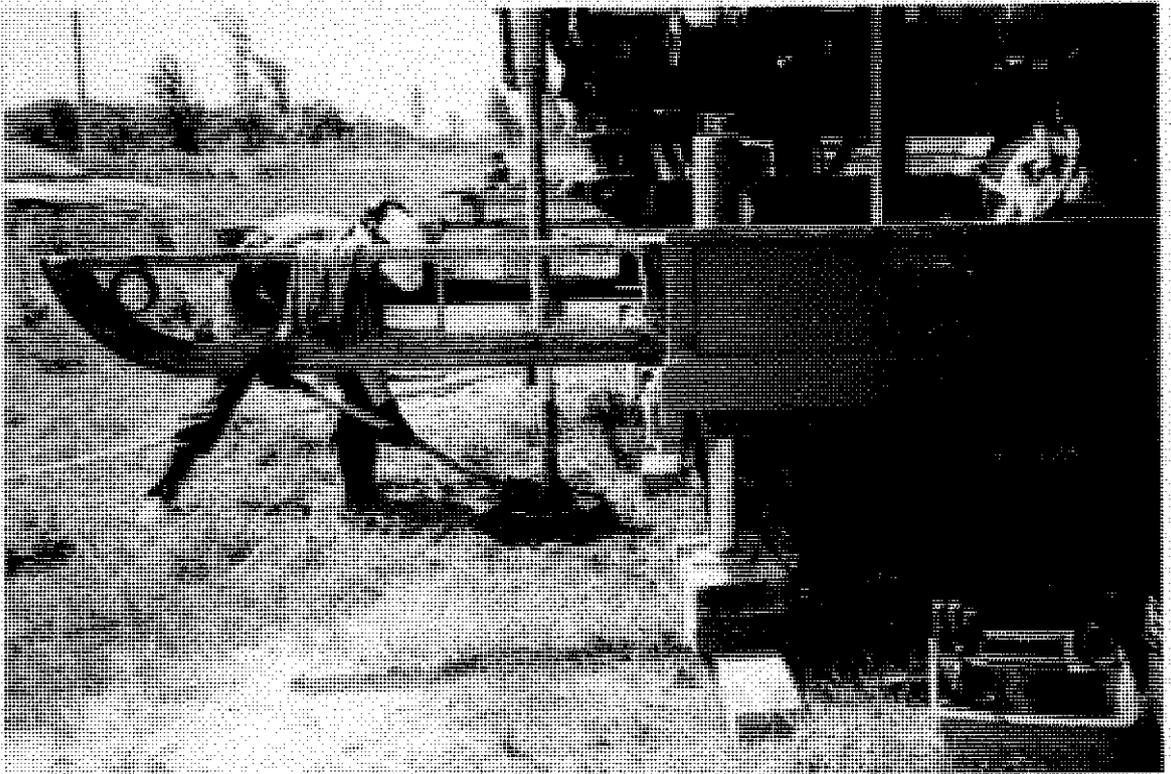


Foto 2 - Perfuração da camada de madeira ressecada.

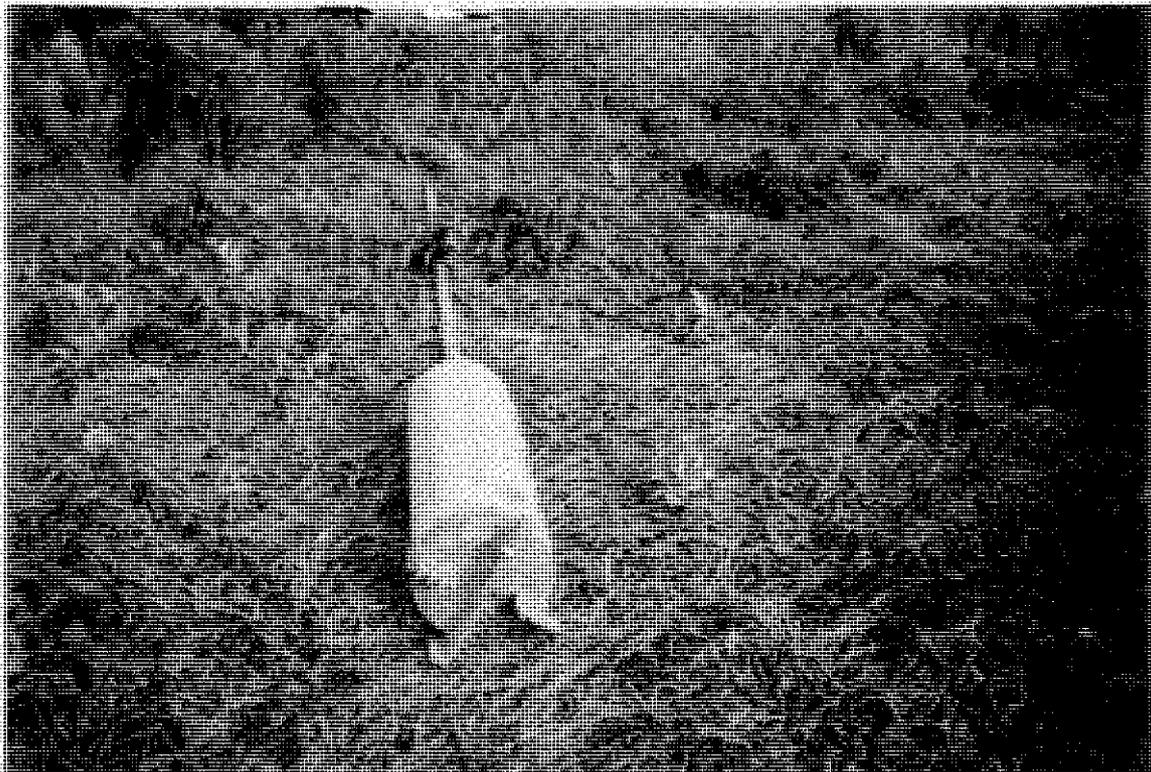


Foto 3 - Tubo de perfuração .

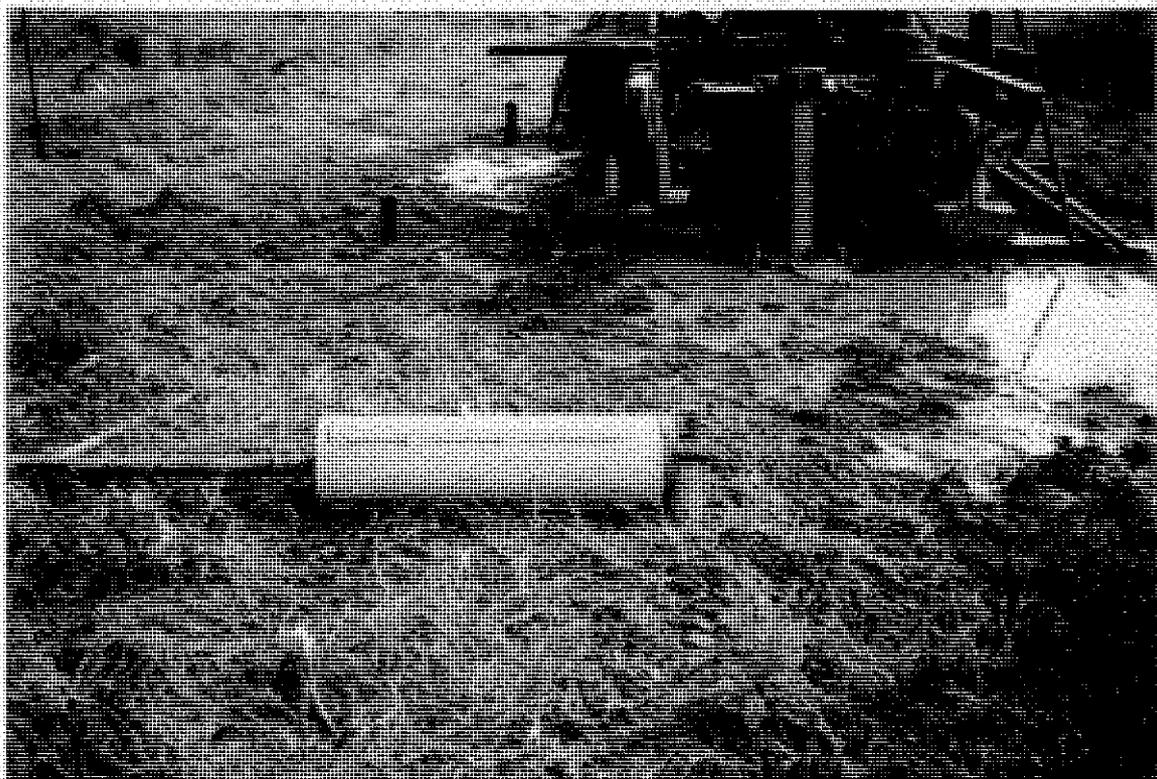


Foto 4 - Tubo de perfuração com circulação d'água.



Foto 5 - Perfuração com circulação d' água.

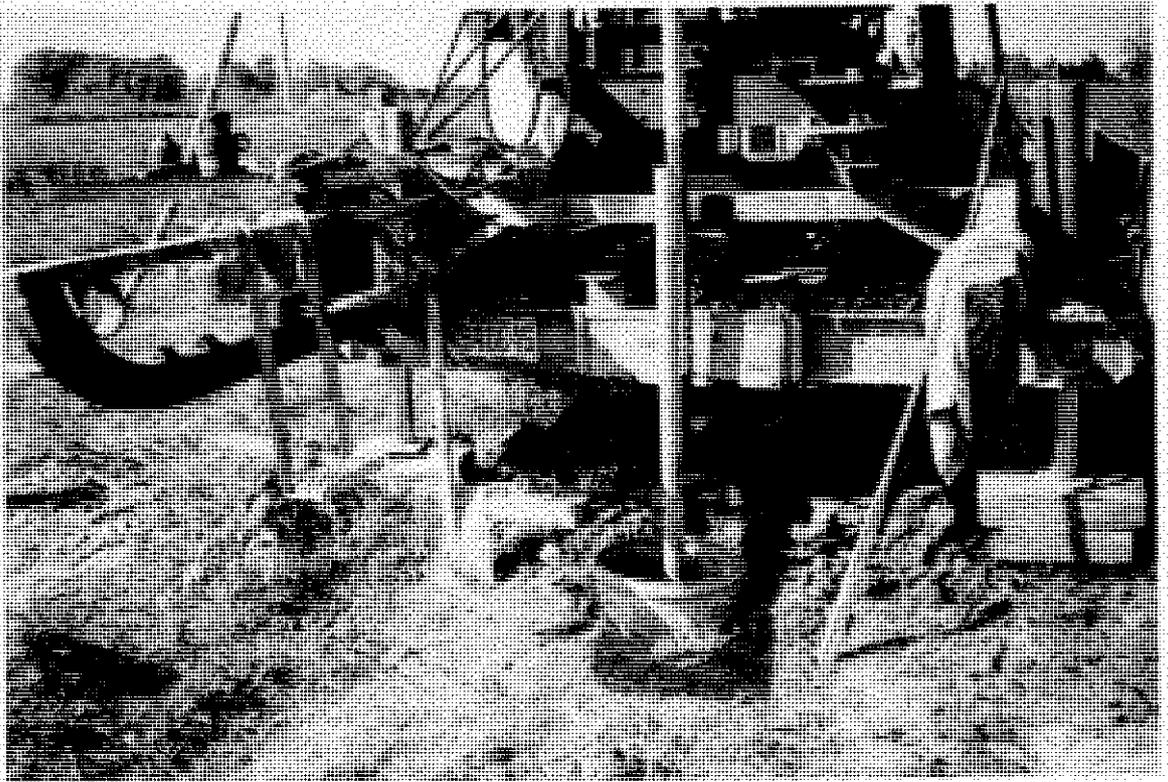


Foto 6 - Detalhe da proteção da boca do furo.



Foto 7 - Detalhe do tubo coletor .

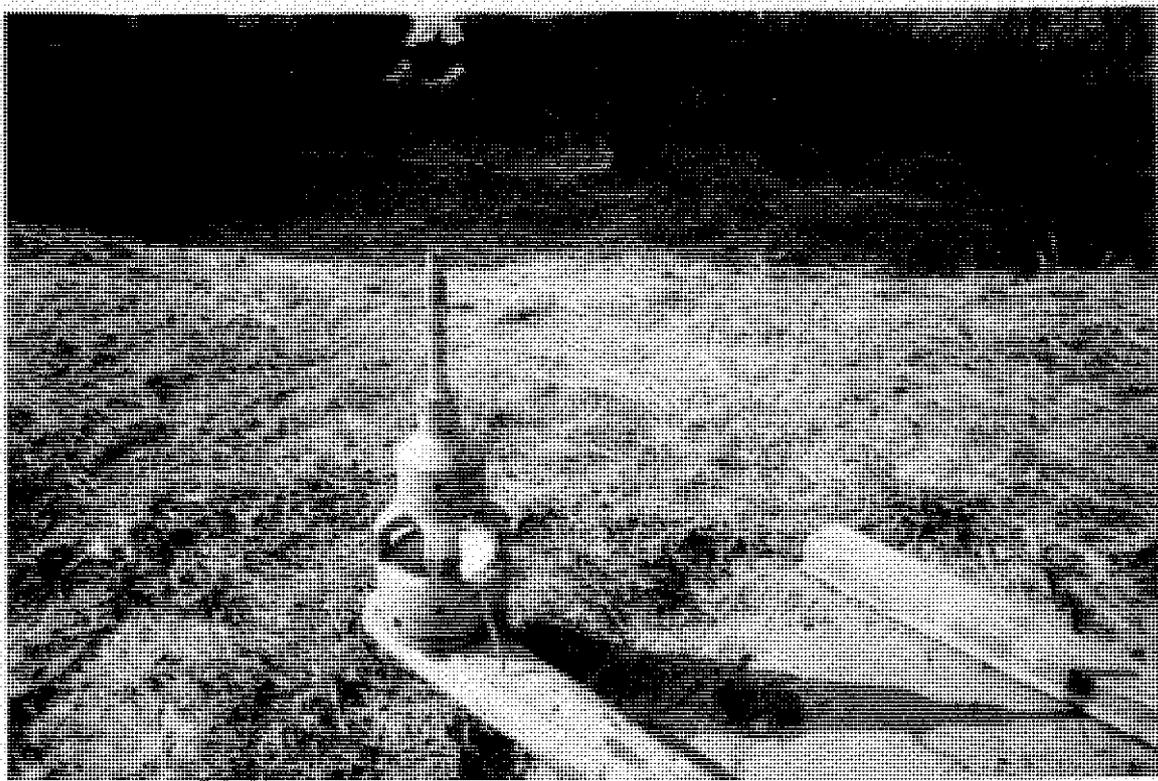


Foto 8 - Detalhe da cabeça do amostrador.

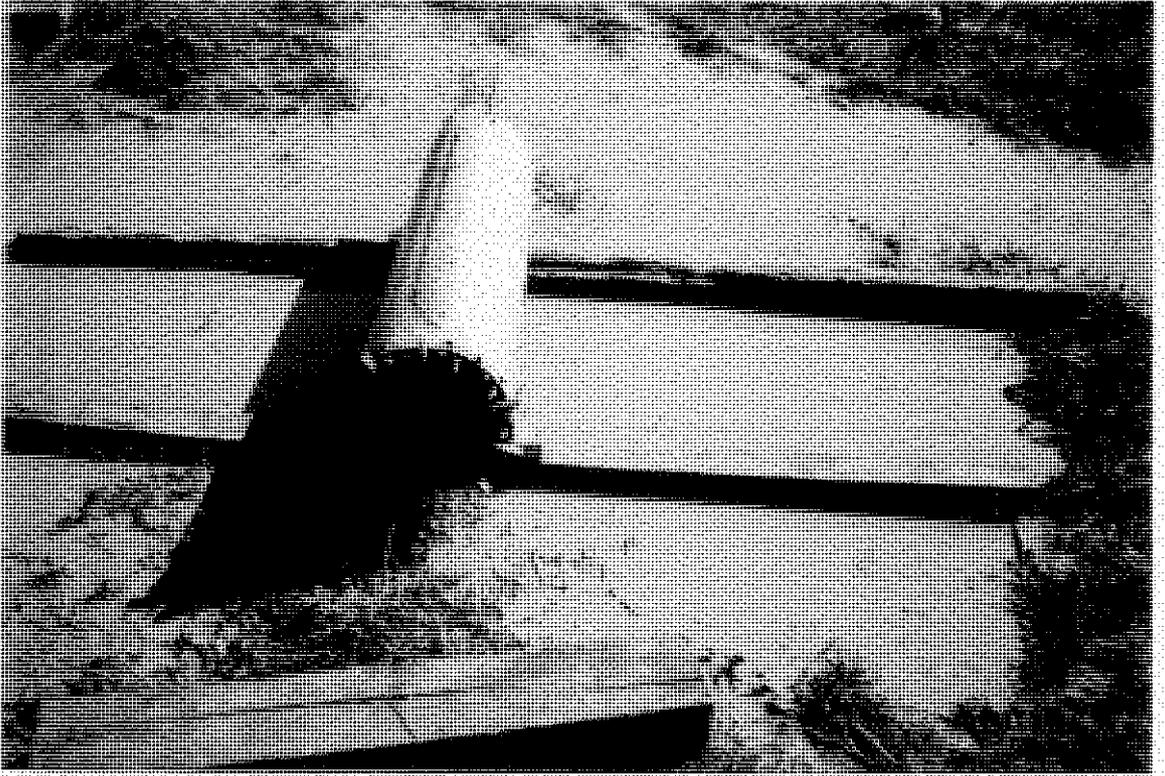


Foto 9 - Detalhe do tubo externo.



Foto 10 - Cabeça do amostrador, haste acoplada e tubo externo.

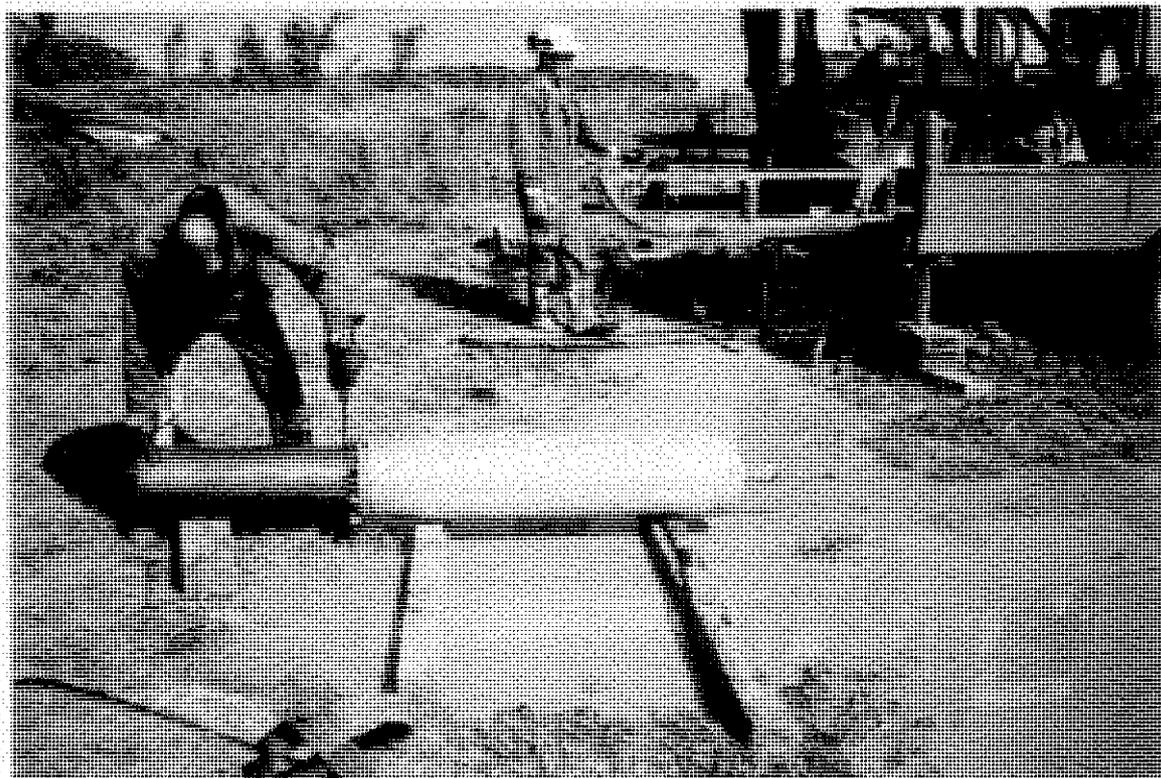


Foto 11 - Conjunto cabeça, haste, tubos externo e coletor.



Foto 12 - Transporte do conjunto até a perfuratriz.

A perturbação causada pela inserção do tubo coletor dentro do solo é reduzida ao se utilizar um tubo de pequena espessura e lubrificando o tubo antes de cada manobra. Além disto sua extremidade é biselada e não há o espaço vazio que existia no amostrador padrão, que permitia uma expansão do solo dentro do tubo coletor. É fundamental que o tubo coletor seja perfeitamente cilíndrico, e isto deve ser observado quando da aquisição do tubo.

No topo do tubo coletor é acoplado um “cap” (cabeça do amostrador - Foto 8) que possui um pino-trava, fixando o tubo coletor ao tubo-guia (Foto 10 e Foto 11). Os tubos descem acoplados até a profundidade desejada, no trecho pré-perfurado, com a válvula do “cap” aberta (Fig. 2), para que a bentonita possa fluir através dela. Solta-se o pino-trava e o tubo coletor desce sozinho durante a amostragem. Quando o cap está a cerca de 5 cm da camada de argila, a descida do tubo coletor é interrompida, impedindo assim um esforço sobre a amostra. Fecha-se a válvula do cap, o tubo-guia é descido com injeção de bentonita até cerca de 2 cm abaixo da extremidade do tubo coletor. O tubo coletor é girado de 90° e então suspenso até o contato com o tubo-guia, o pino-trava é fechado e os tubos sobem juntos. A utilização de um tubo-guia externo permite a amostragem sem o uso do pistão e elimina a sucção.

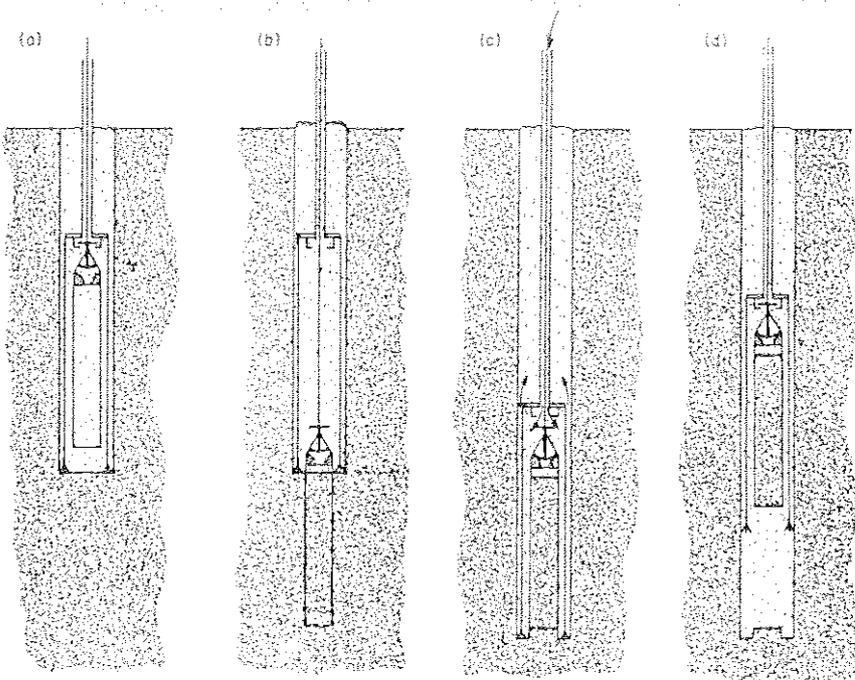


Fig. A3-2 - Procedimento de coleta. La Rochelle et al.(1981).

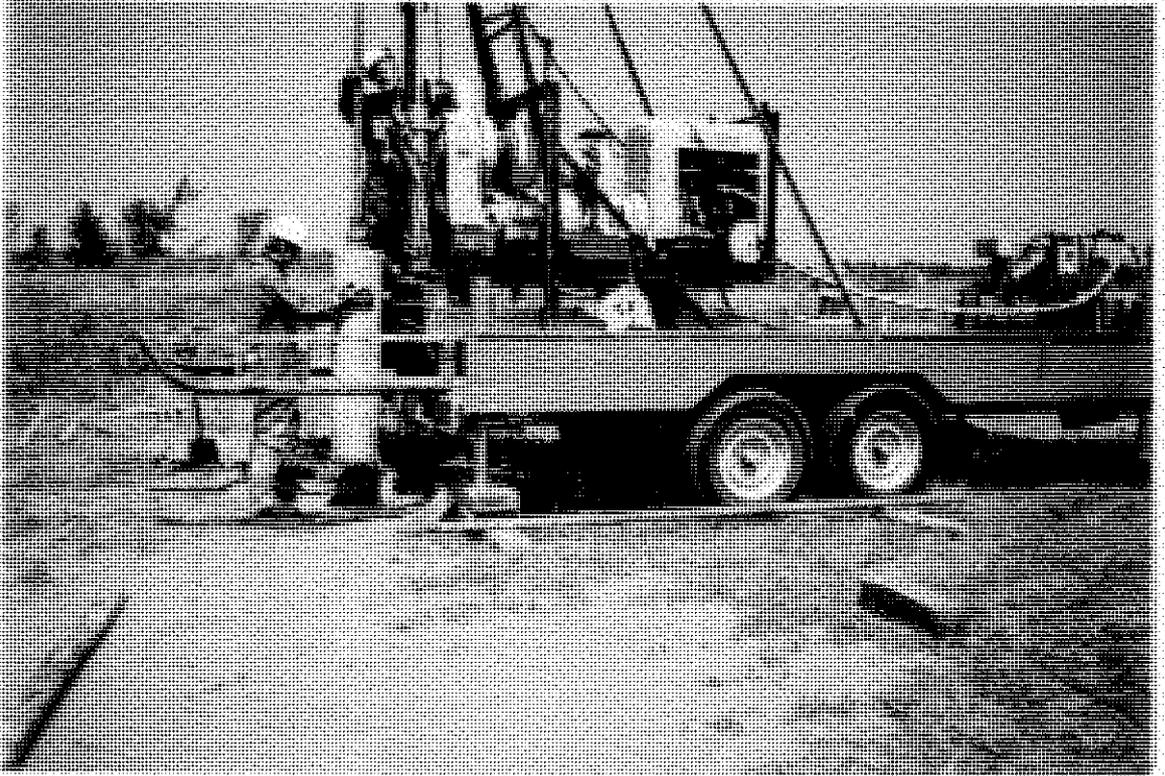


Foto 13 - Vista da perfuratriz e início da amostragem.

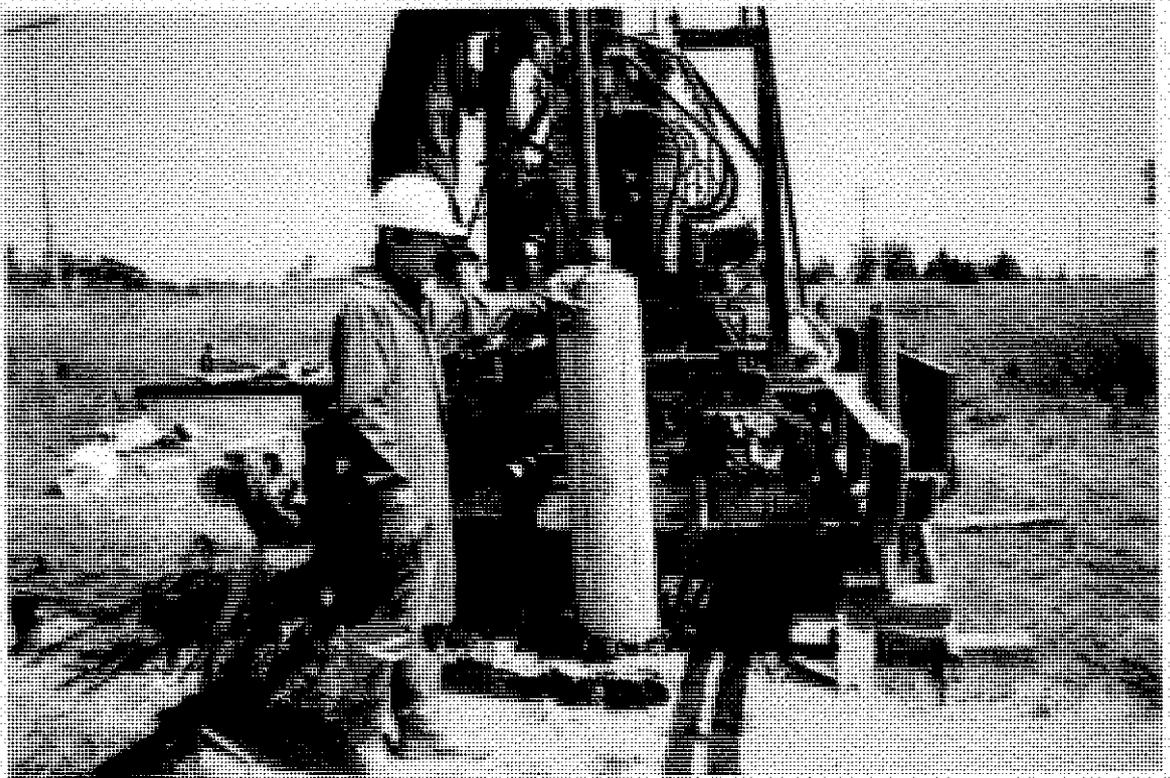


Foto 14 - Início da amostragem.

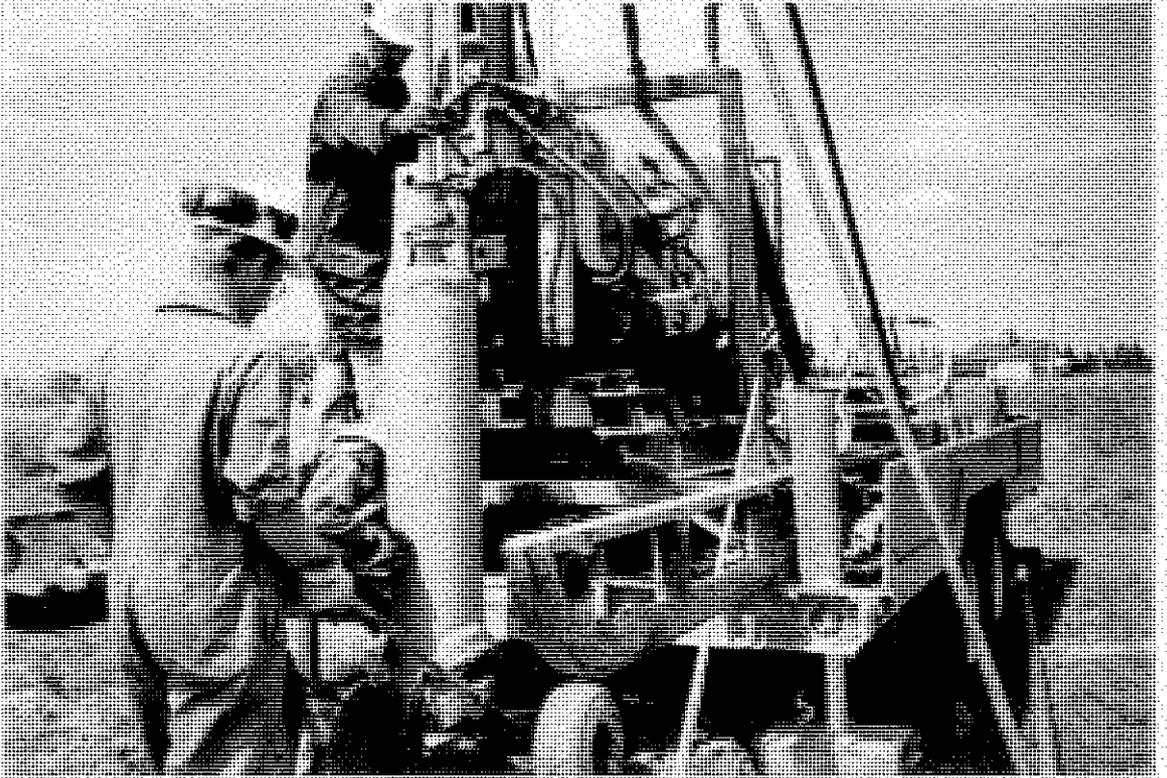


Foto 15 - Fim da amostragem.



Foto 16 - Transporte do conjunto ao fim da amostragem.

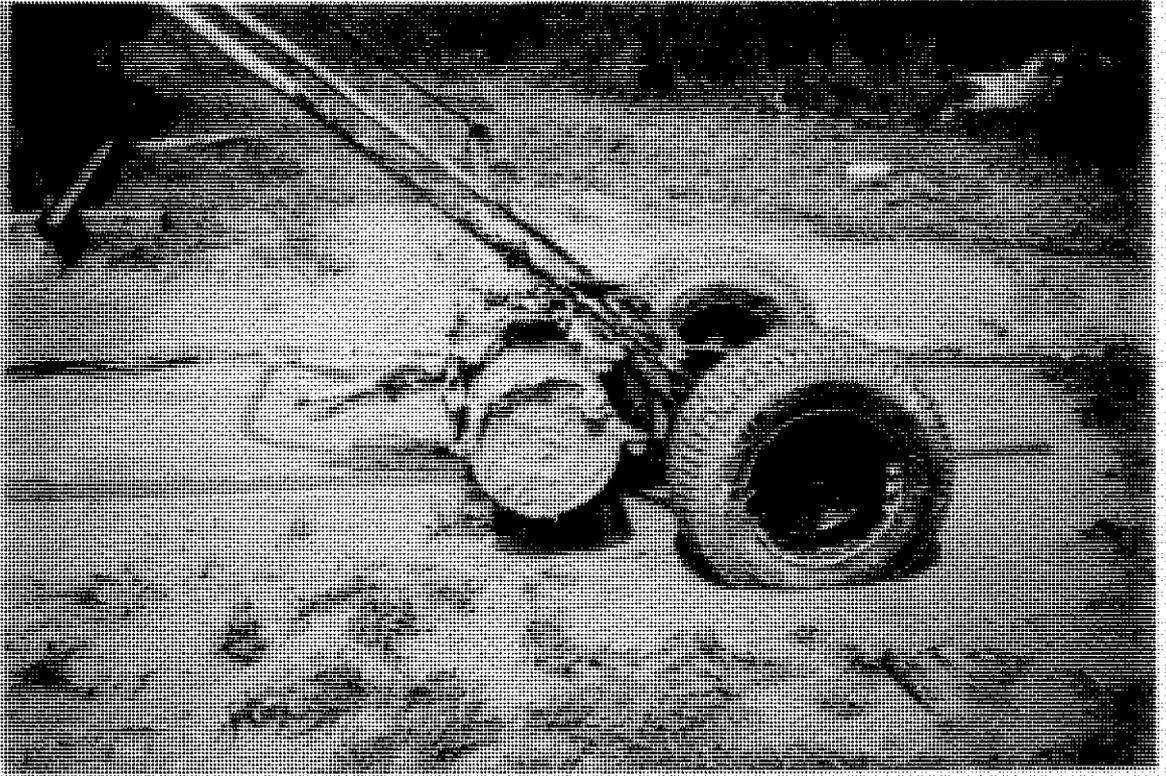


Foto 17 - Vista do conjunto ao fim da amostragem - detalhe do solo no amostrador.

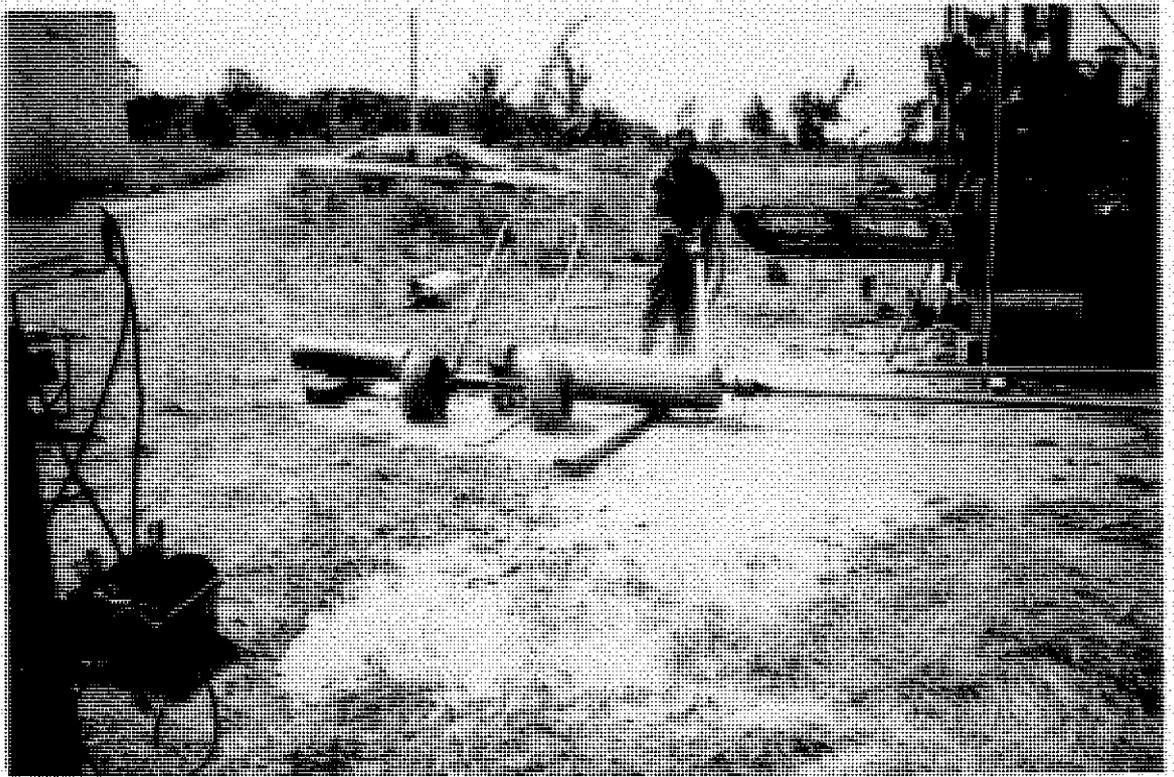


Foto 18 - Limpeza do conjunto.

Após a coleta, o equipamento é limpo (Foto 18) e a amostra é retirada do tubo, com auxílio de uma prensa acoplada a um macaco hidráulico (Foto 19 e Foto 20) . A retirada da amostra deve ser feita no mesmo sentido da entrada do solo no tubo coletor. A parte amolgada superior e inferior da amostra é jogada fora e somente as amostras intactas são aproveitadas (Foto 21). As amostras são cortadas com fio de aço com cerca de 20cm de altura ou em função dos ensaios programados (Foto 22). Procede-se então uma inspeção visual e descrição das amostras, antes de se executar a armazenagem.



Foto 19 - Preparação do suporte de extração das amostras.



Foto 20 - Preparação do suporte de extração das amostras.



Foto 21 - Retirada da parte superior amolgada.



Foto 22 - Amostra intacta.

Procedimentos de armazenagem

As amostras são retiradas do tubo coletor logo após a coleta, ainda no campo, quando são cortadas com um fio de aço na altura desejada em função da programação de ensaios. A proteção das amostras é feita da seguinte forma :

- Preparação de uma mistura de 50% de parafina +50% de vaselina mantida a uma temperatura entre 60 e 65°C (abaixo de 70°C). Observou-se que misturas preparadas somente com parafina tendem a apresentar pequenas fissuras com o tempo e permitem a oxidação.

- Uma base de madeira de 250 x 250 mm de 20mm de espessura é banhada com a mistura (somente um dos lados), coberta com filme plástico (tipo Saran Wrap ou similar) e novamente pincelada com a mistura. O filme plástico, antes de ser aplicado, é imerso na mistura e ao ser colocado deverá ser esticado de forma a não permitir a existência de bolhas entre o filme e a 1ª camada da mistura. Isto deve ser feito para evitar a oxidação e o surgimento de fungos na madeira.

- Coloca-se a amostra coletada sobre a base preparada, observando o topo e base da amostra (base da amostra sempre em contato com a base de madeira). A amostra é pincelada com a mistura e coberta com duas camadas de plástico intercaladas com a mistura. Em caso de ocorrência de bolhas ao se colocar a camada plástica, elas deverão ser furadas e preenchidas com a mistura.

Após estes procedimentos a amostra é estocada em local sem temperatura controlada evitando-se porém frio ou calor excessivos. No laboratório, a estocagem é feita em câmara úmida com temperatura controlada entre 8 a 9°C e umidade de 90%.

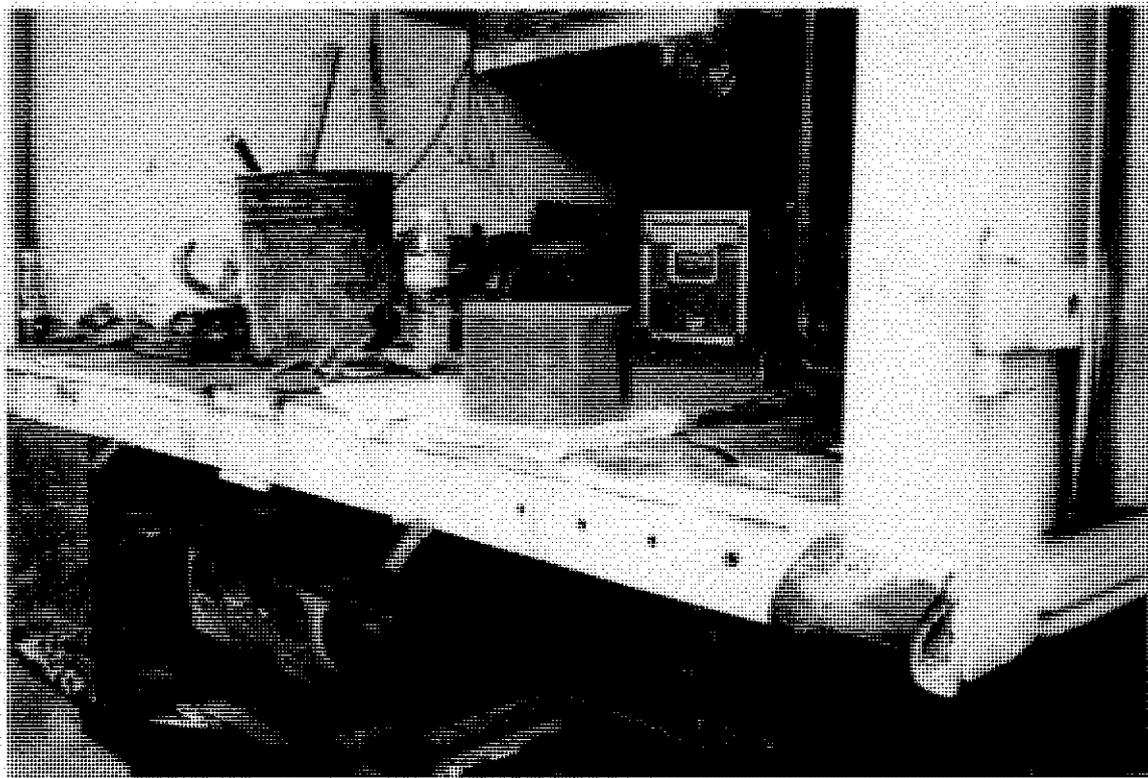


Foto 23 - Amostra coletada sobre o suporte de madeira preparado.



Foto 24 - Armazenamento provisório das amostras no campo.