

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ADENSAMENTO COM VELOCIDADE CONTROLADA DE  
DEFORMAÇÃO (CRS): DESENVOLVIMENTO DO  
EQUIPAMENTO E REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EM SOLOS  
MOLES DO LESTE DE SANTA CATARINA**

**ADRIANO PINTO DE MOURA**

**Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Civil.**

**FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2004.**

**ADENSAMENTO COM VELOCIDADE CONTROLADA DE DEFORMAÇÃO  
(CRS): DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO E REALIZAÇÃO DE  
ENSAIOS EM SOLOS MOLES DO LESTE DE SANTA CATARINA**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

---

Prof. Marciano Maccarini, PhD – Orientador – UFSC

---

Prof<sup>a</sup>. Henriette Lebre La Rovere – Coordenadora do PPGEC/ UFSC

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Glaci Trevisan Santos – UFSC

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Davison Dias – UFSC

---

Prof. Adriano Virgilio Damiani Bica, PhD - UFRGS

*Á minha noiva Fernanda pelo apoio  
e compreensão e também pelas  
difíceis horas compartilhadas.  
Essa vitória é nossa!*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Gaspar e Maria Helena, que sempre me proporcionaram todas as condições para continuar estudando.

Aos meus sogros Luiz Alberto e Ceres Helena pelo apoio e incentivo.

Um agradecimento especial ao professor Marciano Maccarini pela dedicação, amizade, apoio, sugestões e orientação que resultou no êxito desse trabalho.

À professora Glaci Trevisan Santos pela amizade, carinho, ajuda e pelo grande incentivo durante esse período.

À professora Regina Davison Dias pela convivência, amizade e pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas de pós-graduação.

Ao professor Luiz Alberto Gomez pelo auxílio no desenvolvimento do software de aquisição e processamento dos dados.

Aos colegas de pós-graduação pelo coleguismo e amizade. Boa sorte a todos vocês!

Aos bolsistas do LMS e do LAMGEO pelo convívio, amizade e pela ajuda sempre que solicitados.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pela bolsa de estudos que viabilizou a realização desse trabalho.

E a todos que não foram aqui citados, mas que de alguma forma colaboraram para a realização desta dissertação.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xi
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	xii
<b>RESUMO</b>	xiii
<b>ABSTRACT</b>	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	3
2.1 Amostragem	3
2.2 Amolgamento e Perturbação de Amostras	3
2.3 Tipos de Amostradores	4
2.4 Ensaios de Adensamento Edométricos	5
2.5 Ensaios Convencionais de Adensamento Edométrico	6
2.5.1 Tensão de Pré-Adensamento ( $\sigma'_{vm}$ )	6
2.5.2 Parâmetros de Compressibilidade	7
2.5.3 Coeficiente de Adensamento ( $C_v$ )	7
2.5.4 Adensamento Primário e Secundário	8
2.5.5 Curvas Índice de Vazios x Tensão Efetiva (esc. log), “e x $\sigma_v$ (esc. log)”	9
2.5.6 Parâmetros de Adensamento	9
2.5.7 Características do Ensaio de Adensamento Convencional	10
2.6 Ensaios Especiais de Adensamento	11
2.6.1 Equipamentos para Ensaios Especiais	12
2.6.1.1 Tipo de Célula	12
2.6.1.2 Métodos de Carregamento e Condições de Contorno	13
2.6.2 Tipos de Ensaios Especiais de Adensamento	13
2.6.2.1 Ensaio a Velocidade Constante de Carregamento – CRL	14
2.6.2.1.1 Características do Ensaio CRL	14
2.6.2.2 Ensaio com Gradiente Controlado de Poro-Pressão – CG	15
2.6.2.2.1 Características do Ensaio CG	16
2.6.2.3 Ensaio com Razão Poro Pressão/ Pressão Aplicada Constante – CPR	18
2.6.2.3.1 Características do Ensaio CPR	18
2.6.2.4 Ensaio de Fluxo Restringido	19
2.6.2.4.1 Características do Ensaio de Fluxo Restringido	20
2.7 Ensaio com Velocidade Controlada de Deformação – CRS	21
2.7.1 Introdução	21
2.7.2 Princípio do Ensaio CRS	21
2.7.3 Histórico do Ensaio CRS	23
2.7.4 Cálculo dos parâmetros obtidos no ensaio CRS segundo Wissa et al. (1971)	36
2.7.5 Determinação da Velocidade no Ensaio CRS	38
2.7.5.1 Critério da ASTM ( <i>American Society of Testing and Materials</i> )	38
2.7.5.2 Critério de Armours e Drnevich (1986)	39

<b>3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO</b>	41
3.1 Local de Extração das Amostras	41
3.2 Aspectos Geológicos	41
3.3 Pedologia	42
3.4 Ensaio de Caracterização	43
3.4.1 Análise Granulométrica	43
3.4.2 Propriedades Físicas	45
<b>4 METODOLOGIA</b>	47
4.1 Apresentação do Equipamento	47
4.1.1 Célula de Carga e Câmara de Ensaio	49
4.1.2 Célula de Adensamento	50
4.2 Velocidade de Deformação	51
4.3 Instrumentação	52
4.4 Desenvolvimento do <i>Software</i> e Sistema Automático de Aquisição de Dados	53
4.4.1 Funcionamento do <i>Software</i>	54
4.5 Ensaio Preliminares	57
4.5.1 Problemas Verificados	57
4.5.1.1 Assentamento do Pistão com a Placa de Carga	57
4.5.1.2 Vedação do Corpo de Prova	58
4.5.1.3 Dispersões nas Leituras dos Transdutores	59
a) Transdutor de Deformação	59
b) Transdutor de Força	59
c) Transdutor de Pressão	60
4.6 Funcionamento do Equipamento e Procedimentos de Ensaio	61
4.6.1 Preparação e Montagem do Equipamento	61
a) Preparação do Corpo de Prova	61
b) Montagem do Corpo de Prova na Célula de Adensamento	62
c) Montagem da Câmara de Ensaio	62
4.6.2 Procedimentos Iniciais para Execução do Ensaio	62
a) Preenchimento da Câmara de Ensaio com Água	62
b) Aplicação da Contrapressão	63
c) Determinação da Velocidade de Ensaio	63
d) <i>Software</i> de Aquisição e Processamento dos Dados	63
4.6.3 Início do Ensaio	63
4.7 Ensaio de Adensamento Edométricos Convencionais para fins comparativos	64
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	66
5.1 Programa de Ensaio	66
5.1.1 Ensaio Exploratórios	66
5.1.1.2 Leitura dos Transdutores	67
5.1.1.3 Curvas “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)”	68
5.1.1.4 Curvas “ $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)”	69
5.1.1.5 Curvas “ $C_v \times \sigma'_v$ (esc. log)”	71
5.1.1.6 Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ”	73
5.1.1.7 Ajuste Final	74
5.1.2 Ensaio Definitivos	74
5.1.2.1 Velocidades de Ensaio	75
5.1.2.1.2 Critérios de Determinação da Velocidade	76
a) Critério de Smith e Wahls (1969)	76

b) Critério de Wissa et al. (1971)	76
c) Critério da ASTM ( <i>American Society of Testing and Materials</i> )	77
d) Critério de Armours e Drnevich (1986)	77
5.1.2.2 Curvas Índices de Vazios x Tensão Efetiva	79
5.1.2.2.1 Tensão de Pré-Adensamento ( $\sigma'_{vm}$ )	83
5.1.2.3 Curvas Deformação Vertical x Tensão Efetiva	86
5.1.2.4 Curvas Coeficiente de Adensamento x Tensão Efetiva	90
5.1.2.5 Curvas Poro Pressão x Tensão Efetiva	94
5.1.2.5.1 Aplicação da Contrapressão	98
5.1.2.6 Curvas Módulo Edométrico x Tensão Efetiva	99
5.1.2.7 Razão $u_b/\sigma_v$	102
5.2 Influência da Velocidade de Deformação na obtenção dos Parâmetros de Adensamento nos Ensaio CRS	106
5.3 Síntese dos Resultados	112
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>	114
6.1 Conclusões	114
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	116
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	117

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Tubo amostrador de parede fina tipo shelby (ABNT – MB- 3122/1989)	5
Figura 2.2	Célula de adensamento especial (adaptado de Head, 1986)	12
Figura 2.3	Tipos de Ensaios de Adensamento, Head (1986)	13
Figura 2.4	Velocidade de carregamento do Ensaio CRL segundo Fay e Cotton, 1986 (Almeida, 1988)	15
Figura 2.5	Comparação das poro pressões durante os Ensaios Convencional e com Gradiente Controlado (Lowe et al., 1969)	16
Figura 2.6	Célula (de adensamento) para ensaio de Fluxo Restringido (adaptado de Head, 1986)	19
Figura 2.7	Esquema do Ensaio CRS (adaptado de Almeida, 1988)	22
Figura 2.8	Gráficos típicos obtidos no ensaio CRS (Head, 1986)	23
Figura 2.9	Gráficos “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidos nos ensaios CRS comparados com os oriundos de ensaios convencionais (Wissa et al., 1971)	25
Figura 2.10	Comparação das curvas Módulo Edométrico $\times$ Tensão Efetiva obtidos no ensaio convencional e no CRS (Wissa et al., 1971)	26
Figura 2.11	Curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” dos ensaios nº 7, 8, 9 e do experimento convencional (prof. 5,0 a 5,5m) (Carvalho, 1989)	28
Figura 2.12	Comparação dos valores de coeficientes de adensamento de ensaios CRS e convencionais (Carvalho, 1989)	29
Figura 2.13	Comparação entre as curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS com célula Rowe comparadas com as do adensamento convencional (Sheahan e Watters, 1996)	30
Figura 2.14	Comparação entre as curvas “ $C_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS com célula Rowe comparadas com as do adensamento convencional (Sheahan e Watters, 1996)	30
Figura 2.15	Curvas “ $C_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas no ensaio CRS e convencional (IL 1, 2, 3, 9) (Alborta, 1997)	31
Figura 2.16	Curva “ $D \times \sigma'_v$ ” obtidas no ensaio CRS e convencional (IL 4), (Alborta, 1997)	32
Figura 2.17	Curvas “ $PPR \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas no ensaio CRS, (Alborta, 1997)	33
Figura 2.18	Variação de $C_v$ com $\sigma'_v$ em dois ensaios CRS e um convencional (Baptista, 1998)	34
Figura 2.19	Curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” em ensaio convencional e CRS (Baptista, 1998)	34
Figura 3.1	Mapa Geotécnico de Florianópolis com a localização das amostras extraídas do aterro da Via Expressa Sul (Santos, 1997)	42
Figura 3.2	Mapa Geotécnico da área urbana de Joinville com a localização das amostras extraídas (França Júnior, 2002)	43
Figura 3.3	Curvas Granulométricas dos solos de Florianópolis	44
Figura 3.4	Curvas Granulométricas dos solos de Joinville	44
Figura 4.1	Vista geral do equipamento	47
Figura 4.2	Perfil esquemático do equipamento utilizado para a realização dos ensaios CRS	48
Figura 4.3	Câmara de ensaio e célula de carga	49



Figura 4.4	Vista superior e frontal da célula de adensamento juntamente com o corpo de prova	50
Figura 4.5	Pedra porosa incrustada na superfície da base	51
Figura 4.6	Verificação da velocidade aplicada pela prensa	52
Figura 4.7	Vista dos transdutores	53
Figura 4.8	Sistema automático de aquisição dos dados no ensaio CRS	54
Figura 4.9	Dados iniciais lançados no programa	55
Figura 4.10	Monitoramento inicial das leituras dos três transdutores	55
Figura 4.11	Gráficos plotados simultaneamente no decorrer do ensaio após cada leitura	56
Figura 4.12	Modificação realizada no terminal do pistão	58
Figura 4.13	Dispersão verificada com a troca do amplificador e do transdutor de deformação	59
Figura 4.14	Dispersão verificada no transdutor de força depois da troca do amplificador	60
Figura 4.15	Dispersão verificada no transdutor de pressão utilizado nos ensaios finais	60
Figura 4.16	Ensaio de Adensamento Convencionais	64
Figura 5.1	Leitura dos transdutores de deslocamento e força ao longo dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)	67
Figura 5.2	Leitura do transdutor poro pressão ao longo dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)	68
Figura 5.3	Curvas “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2) e do Convencional	69
Figura 5.4	Curvas “ $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2) e suas respectivas linhas de tendência	70
Figura 5.5	Varição da razão $u_b/\sigma'_v$ com $\sigma'_v$ nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)	70
Figura 5.6	Influência da dispersão da poro pressão na obtenção dos gráficos “ $C_v \times \sigma'_v$ (esc. log)”	72
Figura 5.7	Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)	74
Figura 5.8	Curvas “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2, CONV2	80
Figura 5.9	Curvas “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS3, CONV3 e CRS4, CONV4	81
Figura 5.10	Curva “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtida no ensaio CRS5 e CONV5	82
Figura 5.11	Valores de $C_r$ e $C_c$ verificados nos ensaios CRS e convencionais	83
Figura 5.12	Tensões de Pré-Adensamento verificadas em ensaios CRS e convencionais	84
Figura 5.13	Tensões de Pré-Adensamento verificadas em ensaios CRS e convencionais para valores de até 110 kPa	85
Figura 5.14	Tensões de Pré-Adensamento verificadas nos ensaios CRS e convencionais	86
Figura 5.15	Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2, CONV2	87
Figura 5.16	Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS3, CONV3 e CRS4, CONV4	88
Figura 5.17	Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS5 e CONV5	89
Figura 5.18	Valores de $C_v$ dos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2 e CONV2	91
Figura 5.19	Valores de $C_v$ dos ensaios CRS3, CONV3 e CRS4 e CONV4	92

Figura 5.20	Valores de $C_v$ dos ensaios CRS5 e CONV5	93
Figura 5.21	Curvas " $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtidas nos ensaios CRS1 e CRS2	95
Figura 5.22	Curvas " $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtidas nos ensaios CRS3 e CRS4	96
Figura 5.23	Curva " $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtida no ensaio CRS5	97
Figura 5.24	Curvas " $e \times \sigma'_v$ (esc. log)" e " $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)" do ensaio CRS2	98
Figura 5.25	Curva " $D \times \sigma'_v$ " obtida no ensaio CRS1 e CONV1	99
Figura 5.26	Curvas " $D \times \sigma'_v$ " obtidas nos ensaios CRS2, CONV2 e CRS3, CONV3	100
Figura 5.27	Curvas " $D \times \sigma'_v$ " obtidas nos ensaios CRS4, CONV4 e CRS5, CONV5	101
Figura 5.28	Valores do Ponto Mínimo de D verificados nos ensaios CRS	102
Figura 5.29	Curvas " $u_b/\sigma_v \times \sigma'_v$ " obtidas nos ensaios CRS1 e CRS2	103
Figura 5.30	Curvas " $u_b/\sigma_v \times \sigma'_v$ " obtidas nos ensaios CRS3, CRS4 e CRS5	104
Figura 5.31	Curvas " $e \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	107
Figura 5.32	Tensões de pré-adensamento determinadas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	107
Figura 5.33	Curvas " $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	108
Figura 5.34	Valores de $C_v$ verificados nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	109
Figura 5.35	Curvas " $D \times \sigma'_v$ " obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	110
Figura 5.36	Curvas " $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)" obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	111
Figura 5.37	Variações de $u_b/\sigma_v$ com $\sigma_v$ nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Leituras realizadas no ensaio CRS (Head, 1986)	22
Tabela 2.2	Caracterização do material de estudo (Gorman et al., 1978)	27
Tabela 2.3	Valores da relação $\sigma'_{vmCRS}/\sigma'_{vmCONV}$ obtidos através de uma reunião de resultados realizada por Lerouiel (1996)	36
Tabela 2.4	Velocidades de ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/ 98 (ASTM, 1998)	38
Tabela 2.5	Critérios para determinação de velocidades de deformação utilizadas no ensaio CRS	40
Tabela 3.1	Distribuição Granulométrica	45
Tabela 3.2	Propriedades físicas do material ensaiado	45
Tabela 4.1	Nomenclatura atribuída aos ensaios de adensamento convencionais	64
Tabela 5.1	Nomenclatura atribuída aos ensaios CRS	75
Tabela 5.2	Comparação entre as velocidades nominais e médias verificadas nos ensaios	75
Tabela 5.3	Velocidades de ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/ 98 para corpos de prova de 20 mm de altura (ASTM, 1998)	77
Tabela 5.4	Valores de velocidades de deformação aplicadas e razão $u_b/\sigma_v$ máxima encontrados em ensaios CRS	78
Tabela 5.5	Teores de umidades naturais e índices de vazios iniciais verificados nos ensaios CRS e convencionais	79
Tabela 5.6	Valores de Cr e Cc verificados nos dois tipos de ensaios	82
Tabela 5.7	Velocidades de deformação utilizadas nos ensaios CRS e seus respectivos tempos de duração	106
Tabela 5.8	Resumo dos parâmetros de adensamento obtidos nos ensaios CRS	113

## LISTA DE SÍMBOLOS

ASTM	American Society of Testing and Materials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
$\sigma'_{vm}$	Tensão de Pré-Adensamento
$\sigma'_v$	Tensão Efetiva Vertical
$\sigma_v$	Tensão Total
$C_v$	Coefficiente de Adensamento
$C_c$	Índice de Compressão
$C_r$	Índice de Recompressão
$C_\alpha$	Coefficiente de Adensamento Secundário
CR	Relação de Compressão
RR	Relação de Recompressão
$T_v$	Fator Tempo
D	Módulo Edométrico
k	Coefficiente de Condutividade Hidráulica
$H_0$	Altura Inicial do Corpo de Prova
$m_v$	Coefficiente de Compressibilidade Volumétrica
e	Índice de Vazios
$\Delta e$	Variação do Índice de Vazios
u	Porosidade
$u_b$	Porosidade na base
$\varepsilon_v$	Deformação Vertical
v	Velocidade de Deformação
$W_{nat}$	Teor de Umidade Natural
$\gamma_{nat}$	Peso Específico Aparente na Umidade Natural

## RESUMO

MOURA, A. P. “Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação (CRS): Desenvolvimento do Equipamento e Realização de Ensaios em Solos Moles do Leste de Santa Catarina”. Florianópolis, 2004. PPGEC/ UFSC.

O objetivo desta dissertação foi desenvolver no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina um equipamento para realização de ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação (CRS) visando à obtenção de parâmetros de adensamento tão confiáveis quanto aos obtidos nos tradicionais ensaios edométricos convencionais incrementais num intervalo de tempo mais reduzido. Para a automatização do equipamento, foi desenvolvido também um *software* para aquisição e processamento dos dados.

Com o objetivo de analisar a eficácia do novo equipamento, foram ensaiados solos moles provenientes de dois locais distintos. As amostras são oriundas da costa leste do Estado de Santa Catarina, sendo duas delas coletadas no município de Florianópolis e outras três do município de Joinville.

O programa de experimentos contou, no total, com nove ensaios CRS. Dois deles foram de caráter final de experimentação denominados de Ensaios Exploratórios, sendo que os outros sete restantes foram denominados de Ensaios Finais. Desses sete ensaios finais, três deles foram realizados com o objetivo de verificar a influência da velocidade de deformação aplicada na obtenção dos parâmetros de adensamento. Além dos ensaios CRS, foram realizados cinco ensaios edométricos convencionais incrementais para fins comparativos.

O maior tempo de duração dos ensaios CRS foi de 22 horas e o mais rápido durou 8 horas. Os resultados comprovaram a eficácia do ensaio CRS na obtenção das relações “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, mostrando curvas de boa qualidade e bem definidas. Os valores obtidos para as tensões de pré-adensamento foram maiores nos ensaios CRS que nos convencionais. Os valores dos coeficientes de adensamento, quando comparados com os do ensaio convencional, mostraram boa concordância no trecho de compressão da amostra, mesmo apresentando significativa dispersão, mostrando que é possível obter-se valores de  $C_v$ , nos ensaios CRS, confiáveis em relação aos convencionais. Os resultados mostraram também que há influência da velocidade de deformação aplicada nas curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” e nos valores da tensão de pré-adensamento.

Através da obtenção desses bons resultados, verificou-se a eficácia do equipamento, concluindo-se que o ensaio CRS, por ser mais rápido e automatizado, é uma boa alternativa para a realização de ensaios de adensamento.

Palavras-chave: CRS – solos moles – ensaios de adensamento

## ABSTRACT

MOURA, A. P. Constant Rate of Strain Consolidation (CRS): Equipment development and soft clay accomplishment tests in the eastern side of Santa Catarina. Florianópolis, 2004. PPGEC/ UFSC.

The objective of this work was to develop an equipment to accomplish constant rate of strain consolidation tests, in the Laboratory of Soil Mechanics of Universidade Federal de Santa Catarina, in order to obtain consolidation parameters in a shorter time-lag and as reliable as those reached through conventional incremental loading consolidation tests. For the equipment automatization, a software for data acquisition and processing was developed.

Aiming at analyzing the efficacy of the new equipment, soft clays from two distinguishing places were tested. The samples were taken from the eastern coast of Santa Catarina State; two of them were collected in Florianópolis city, and the others, in Joinville city.

The experimental program included nine CRS tests in total. Two of them had a final exploratory nature denominated Exploratory Tests; the other seven were denominated Final Tests. Out of those seven final tests, three of them were performed to verify the strain rate influence applied to accomplish the consolidation parameters. Besides the CRS tests, five conventional incremental loading consolidation tests for comparative purposes were accomplished.

The largest time duration obtained in the CRS tests lasted 22 hours, and the fastest one 8 hours. The results attested the efficacy of the CRS test in achieving the relations " $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (log esc.)", showing good quality and well-defined curves. The values achieved for the preconsolidation pressures indicated larger estimates in the CRS tests than in the conventional ones. The values of coefficient of consolidation, when compared to the incremental loading consolidation tests, displayed similarity within the compression sample portion, even though showing significant dispersion, pointing out the possibility of obtaining reliable  $C_v$  values, in the CRS tests, in relation to the conventional ones. The results also showed the influence of the strain rate applied in the achievement of " $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (log esc.)" curves and in the preconsolidation pressures values.

The attainment of such positive results, made possible to verify the equipment efficacy and to conclude that the CRS test, due to its speed and automatization, becomes a good alternative for the accomplishment of consolidation tests.

Key-words: CRS, soft clays, consolidation tests

## 1 INTRODUÇÃO

Os primeiros registros do emprego do termo adensamento constam do início do século XIX. O termo é utilizado para caracterizar o fenômeno observado na natureza no qual, lenta e gradualmente, desenvolve-se uma variação de volume associada à expulsão de água no solo, após a imposição de determinada sobrecarga.

Mesmo sendo considerado importante para a engenharia da época, o fenômeno do adensamento dos solos veio a ter uma base experimental e um tratamento teórico mais concreto na década de vinte do século passado através de trabalhos realizados por Karl Terzaghi. Desde então, o ensaio de adensamento edométrico convencional sugerido por Terzaghi (1925) tem sido usualmente adotado como o ensaio padrão de adensamento em muitos países. O ensaio é muito eficaz na obtenção dos parâmetros de compressibilidade do solo quando este é lateralmente confinado e axialmente drenado, sujeito à aplicação incremental de carga, executado em vários estágios, cada um com vinte e quatro horas de duração e uma razão unitária entre o incremento de tensão e a tensão do estágio anterior. O tempo de duração varia de sete a dez dias em média, o que é, reconhecidamente, a principal desvantagem a ele atribuída. Outra desvantagem é que os pontos da curva tensão-deformação são espaçados, dificultando, para certos tipos de solos, uma boa definição da tensão de pré-adensamento.

Com o intuito de superar essas desvantagens, e aprimorar a obtenção dos parâmetros de ensaio, foram desenvolvidos novos tipos de ensaios de adensamento, ditos ensaios contínuos, também denominados de ensaios especiais, que se caracterizam pela rapidez, eficiência e confiabilidade na obtenção dos dados. Outra característica importante desses ensaios é a medida da poro pressão em pelo menos uma das faces do corpo de prova.

Dentre os mais freqüentemente utilizados, aparece o ensaio CRS – *Constant Rate of Strain* – Ensaio Especial de Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação, que nos primórdios de sua criação, no final dos anos cinquenta, teve, originalmente, o objetivo de conferir rapidez à estimativa da tensão de pré-adensamento.

A utilização do ensaio tornou-se mais atraente por apresentar uma base teórica bem estabelecida e pela simplicidade do mecanismo de transmissão de força ao corpo de prova, no qual se utiliza uma prensa comumente empregada nos ensaios triaxiais.

Considerando a importância e a consolidação que o ensaio com velocidade controlada de deformação (CRS) já assumiu em vários países e vem assumindo no Brasil, é de real interesse conhecer e dominar sua tecnologia de execução.

Portanto, essa Dissertação apresenta como objetivo principal desenvolver no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina a montagem do equipamento para a realização do ensaio com velocidade controlada de deformação, junto a procedimentos experimentais de verificação de eficácia do equipamento.

Para tornar viável a realização da pesquisa e alcançar com êxito o seu objetivo principal, é condizente salientar também a realização de alguns procedimentos como:

- confecção de um programa de aquisição e processamento automático de dados;
- realização de ensaios com solos moles de diferentes propriedades geotécnicas (plasticidade, compressibilidade, etc.) no novo equipamento;
- verificação da influência da velocidade de deformação aplicada na obtenção dos parâmetros de ensaios;
- realização de ensaios convencionais de adensamento para comparar e confrontar os resultados obtidos no novo tipo de ensaio.

Esta Dissertação de Mestrado está organizada em seis capítulos. O capítulo um – Introdução – faz a apresentação inicial do trabalho. O capítulo dois – Revisão Bibliográfica - aborda uma revisão de alguns conceitos específicos sobre o assunto a ser desenvolvido na pesquisa. O capítulo três – Caracterização do Material Ensaiado – caracteriza o material de estudo utilizado na pesquisa, classifica-o e situa os locais em que se procederam as amostragens. O capítulo quatro – Metodologia – apresenta a descrição do equipamento, o desenvolvimento do *software* de aquisição e processamento automático dos dados e a metodologia empregada para a realização dos ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação. O capítulo cinco – Apresentação e Análise dos Resultados – faz um relato das análises e interpretações de todos os ensaios da pesquisa. O capítulo seis – Conclusões e Sugestões – apresenta as conclusões do presente trabalho e sugestões para futuras pesquisas.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para efetuar a análise e obter resultados que visem a apontar caminhos e desenvolver os objetivos propostos, é necessária a revisão de alguns conceitos para o referido estudo. Dessa forma, buscou-se, através da revisão bibliográfica, apresentar conceitos específicos sobre o assunto a ser desenvolvido nesta Dissertação.

### **2.1 Amostragem**

O objetivo da amostragem de um solo é permitir a sua descrição, caracterização e determinação de parâmetros geotécnicos através de ensaios de laboratório.

Dois tipos de amostras podem ser obtidas no processo de amostragem: amostras indeformadas e amostras deformadas (Soares, 1997). As indeformadas são obtidas por extração de blocos de solo ou por cravação de tubos amostradores. Essas amostras sofrem perturbação muito pequena durante o processo de extração, de modo que a estrutura do solo e a umidade foram praticamente mantidas. Amostras deformadas são obtidas por processos de escavação e sondagem. A estrutura do solo é seriamente perturbada e o teor de umidade geralmente se altera em decorrência do próprio processo de extração. Essas amostras são inadequadas para ensaios que visem à determinação da resistência e da compressibilidade naturais do solo, prestando-se normalmente a ensaios de caracterização e compactação.

### **2.2 Amolgamento e Perturbação de Amostras**

A qualidade das amostras influi diretamente na obtenção de parâmetros confiáveis de compressibilidade em laboratório.

Segundo Clayton et al. (1995) apud Soares (1997), alguns mecanismos são associados ao amolgamento e perturbação de uma amostra de solo, tais como: mudanças no estado de tensões, variações do teor de umidade e índice de vazios, deformações impostas pelos processos de cravação, entre outros. De acordo com o autor, os amostradores e técnicas de amostragem devem ser selecionados em função do adequado tamanho da amostra e mínima perturbação.

A amostragem com tubos é feita cravando-se um tubo metálico no solo, geralmente de parede fina, sem rotação. A cravação provoca deformações cisalhantes no solo que causam variações de tensão efetiva e quebra de ligações cimentantes entre partículas.

Segundo Jamiolkowski et al. (1985), o amolgamento, ou seja, a desestruturação da amostra, afeta a curva de compressão de ensaios em argilas com consistência entre mole e rija, e sensibilidade entre baixa e moderada, conforme a descrição a seguir:

- decresce o índice de vazios (ou aumenta a deformação específica) para uma dada tensão efetiva;
- torna difícil a definição do ponto do raio mínimo e, portanto, obscurece o valor de  $\sigma'_{vm}$ , além de reduzi-lo;
- aumenta a compressibilidade no trecho de recompressão e no de compressão virgem pode diminuí-la.

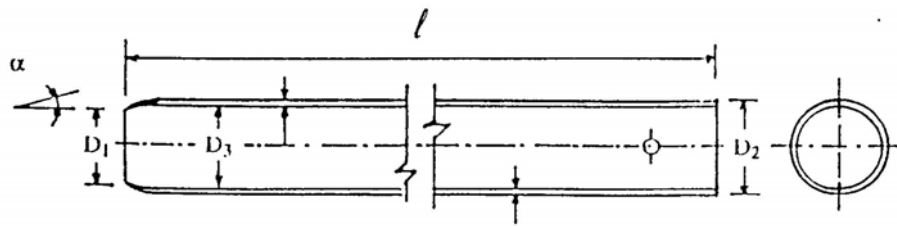
Segundo Martins e Lacerda (1994), o ensaio de adensamento (item 2.5) que apresenta uma reta no trecho virgem de adensamento indica sinais de severa perturbação da estrutura do solo durante a amostragem. Ensaios com amostras de boa qualidade apresentam curvatura no gráfico “ $e \times \log \sigma'_v$ ”, após a tensão de pré-adensamento ter sido ultrapassada. Quanto pior a qualidade da amostragem, mais desestruturada a argila se encontra no início do ensaio de adensamento.

### 2.3 Tipos de Amostradores

Os amostradores, comumente utilizados em solos moles, são os tubulares de parede fina e o amostrador padrão SPT. Os primeiros são o principal tipo de amostrador utilizado para solos moles, consistindo em um tubo de espessura reduzida que é introduzido no terreno por mecanismos de cravação estática, provocando a penetração em seu interior da amostra indeformada do solo.

Há dois tipos de amostradores tubulares de parede fina: o de tubo aberto (tipo shelby) e o com pistão estacionário.

O tubo shelby é um amostrador aberto de parede fina. Nesse tipo de amostrador, o tubo é aberto na extremidade inferior e o solo penetra no tubo tão logo este seja comprimido contra o terreno. A figura 2.1 mostra um tubo amostrador do tipo shelby.



**Figura 2.1 – Tubo amostrador de parede fina tipo shelby  
(ABNT – MB-3122/1989)**

Amostradores com tubos abertos não são recomendados para a utilização em argilas moles devido ao risco de perda da amostra durante a recuperação. Um outro tipo de técnica utilizada para minimizar este risco é a utilização de amostradores com pistão estacionário.

Nos amostradores de pistão, durante o processo de cravação, o pistão permanece estacionário à medida que o solo penetra no amostrador.

Segundo Soares (1997), a utilização de pistões visa a:

- prevenir a entrada de detritos de perfuração, antes do amostrador atingir a cota de amostragem;
- reduzir perdas de amostras;
- controlar o comprimento da amostra.

#### **2.4 Ensaios de Adensamento Edométricos**

A determinação dos parâmetros geotécnicos de solos para fins de engenharia pode ser efetuada com base em ensaios de laboratório. Esses ensaios são realizados em amostras de pequenas dimensões, as quais se supõem sejam representativas do depósito estudado.

Os ensaios de adensamento podem ser classificados em dois tipos: Ensaios Incrementais Convencionais, apresentado no item 2.5 e Ensaios Contínuos, ditos Ensaios Especiais de Adensamento, apresentados no item 2.6. O ensaio com velocidade controlada de deformação (CRS), por ser objeto principal de estudo dessa pesquisa, será apresentado no item 2.7.

## 2.5 Ensaios Convencionais de Adensamento Edométrico

O adensamento está associado à drenagem da água dos poros do solo quando sujeito a sobrecargas. Trata-se de um processo lento e gradativo que teve seu estudo teórico e experimental desenvolvido por Karl Terzaghi a partir da década de 20. Posteriormente, outros autores estudaram o fenômeno de adensamento, entre os quais: Casagrande (1936), Taylor (1942), Bjerrum (1973), Coutinho (1976), Olson (1986), Crawford (1986), Almeida e Ferreira (1993), entre outros.

Os ensaios de adensamento incrementais têm como princípio a aplicação incremental de carga vertical sobre o corpo de prova. Cada acréscimo de carga somente pode ser aplicado após ter sido completado o adensamento primário do corpo de prova devido ao acréscimo de carga anterior.

A execução de ensaios de adensamento geralmente visa à medição das variações volumétricas do solo e à previsão do tempo que ocorrerá o adensamento. A tomada de decisão sobre um projeto geotécnico, muitas vezes, depende da previsão dos recalques e dos tempos em que ocorrerão.

### 2.5.1 Tensão de Pré-Adensamento ( $\sigma'_{vm}$ )

A tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) indica o valor da máxima tensão já aplicada no solo. A determinação de  $\sigma'_{vm}$  é importante para argilas sensíveis estruturadas, porque estas apresentam baixa compressibilidade para cargas menores que  $\sigma'_{vm}$  e grande compressibilidade para cargas maiores que  $\sigma'_{vm}$ . Dois métodos de determinação de  $\sigma'_{vm}$  são comumente utilizados: método de Casagrande (1936) e de Pacheco Silva (1970).

Segundo Silva (1970), ambos os métodos não levam em consideração o grau de amolgamento da amostra, pois, o efeito do amolgamento tende a diminuir o valor da tensão de pré-adensamento.

Segundo Marques (1996), o valor da tensão de pré-adensamento de argilas moles ou sensíveis é consideravelmente influenciada pelo método de ensaio, especialmente pela velocidade de carregamento. Para Crawford (1986) há evidências de que incrementos de carga com intervalos de 24 horas forneçam razoáveis relações pressão-compressão.

### 2.5.2 Parâmetros de Compressibilidade

No estudo das deformações, é necessário o conhecimento dos parâmetros de compressibilidade, a fim de se realizar a previsão do comportamento do solo sujeito a sobrecargas. Alguns parâmetros importantes são apresentados a seguir:

Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica:  $m_v$

Módulo Edométrico  $D = 1/m_v$

Índice de Compressão:  $C_c$

Índice de Recompressão:  $C_r$

Índice de Descompressão ou Inchamento:  $C_s$

Coeficiente de Adensamento Secundário:  $C_\alpha$

$C_c$ ,  $C_r$  e  $C_s$  são parâmetros referentes ao adensamento primário, e  $C_\alpha$  ao adensamento secundário, atribuído à deformação visco-elástica do esqueleto sólido sob carregamento constante ao longo do tempo.

O índice de compressão ( $C_c$ ) é a declividade da porção aproximadamente linear da curva de compressão virgem “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”. É um índice que está associado diretamente com a magnitude dos recalques. É pouco influenciado pelas variações no método de ensaio, mas decresce com a perturbação da amostra, segundo Soares (1997).

Ribeiro (1992) constatou que os valores dos parâmetros de compressibilidade  $C_c$ ,  $C_s$  e  $C_r$  da argila de Sergipe, na região Nordeste, não apresentam nenhuma correlação com a profundidade. Ele observa que os valores de  $C_r$  são mais altos para a argila sob o efeito do amolgamento, e, no caso de  $C_c$ , os valores para o material amolgado são inferiores aos do material indeformado. Já  $C_s$  mostrou-se independente do amolgamento. Ainda segundo o autor, além da granulometria e da natureza da fração argila, a composição iônica do fluido intersticial também influencia a compressibilidade.

### 2.5.3 Coeficiente de Adensamento ( $C_v$ )

A determinação do coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) é necessária para a estimativa do tempo de dissipação dos excessos de poro pressão, portanto, esse coeficiente está relacionado à velocidade de adensamento. Ladd (1971) observa que há redução do valor de  $C_v$  conforme aproximação da tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ), no

caso de argilas levemente pré-adensadas. Porém, para pressões atuantes acima de  $\sigma'_{vm}$ ,  $C_v$  mantém-se constante. No ensaio incremental,  $C_v$  pode ser obtido para cada estágio de carregamento pelos métodos de Casagrande e de Taylor, que utilizam os gráficos “ $\varepsilon_v$  x tempo (esc. log)” e “ $\varepsilon_v$  x raiz quadrada do tempo”, respectivamente.

Outro método analítico para determinação de  $C_v$  foi desenvolvido por Raju et al.(1995), no qual envolve correlações empíricas entre o índice de vazios para o teor de umidade igual ao LL e a tensão vertical efetiva aplicada. Resultados experimentais, apresentados pelos autores, mostraram boa concordância com os dos métodos gráficos tradicionais.

A teoria original de Terzaghi apresentou uma equação matemática para a velocidade de adensamento primário, considerando constantes a condutividade hidráulica e a compressibilidade do solo e desprezando o adensamento secundário, nessa fase. A experiência tem mostrado que essas hipóteses não são corretas e, na maioria dos casos, ocorre substancial discrepância entre as velocidades previstas e medidas.

#### **2.5.4 Adensamento Primário e Secundário**

O adensamento é composto de duas parcelas - do fenômeno de expulsão de água, na qual as poro pressões geradas são dissipadas até atingirem o valor da poro pressão hidrostática, denominado adensamento primário, - e do fenômeno através do qual o solo continua comprimindo após a total dissipação do excesso de poro pressão, a uma tensão efetiva constante, denominado adensamento secundário.

O conceito de dois estágios distintos de adensamento é arbitrário, mas é útil para análise de recalques. Na verdade, segundo Wahls (1962), uma parcela menor do adensamento secundário ocorre durante o primário. O adensamento secundário atinge, portanto, uma velocidade máxima após o fim do primário.

A velocidade de adensamento no campo é quase sempre maior do que as previsões de ensaios de laboratório. Segundo Soares (1997), isto é devido (a) à maior condutividade hidráulica *in situ*, especialmente na direção horizontal, (b) à existência de drenagem lateral e deformações laterais no campo, em muitas obras de engenharia.

### 2.5.5 Curvas Índice de Vazios x Tensão Efetiva (esc. log), “e x $\sigma'_v$ (esc. log)”

Os solos apresentam baixa deformabilidade no trecho pré-adensado, e uma deformabilidade elevada no trecho normalmente adensado. O mesmo comportamento não é notado em amostras amolgadas. Um fator fundamental para a obtenção de uma boa curva “e x  $\log \sigma'$  (esc. log)” é a qualidade da amostra. Martins e Lacerda (1994), comparando curvas de compressibilidade de amostras de boa qualidade e amolgadas, concluem que os seguintes efeitos do amolgamento podem ser percebidos:

- para um valor qualquer de tensão efetiva vertical, o índice de vazios de amostras amolgadas é sempre menor;
- a curvatura do gráfico “e x  $\sigma'_v$  (esc. log)” fica menos acentuada em amostras amolgadas;
- em amostras amolgadas existe um aumento da compressibilidade na zona de recompressão e uma diminuição da mesma na zona de compressão virgem.

### 2.5.6 Parâmetros de Adensamento

Para a obtenção dos resultados obtidos nos ensaios de adensamento convencionais, foram utilizadas as seguintes expressões:

a) Índice de Vazios Inicial ( $e_i$ )

$$e_i = \frac{\delta_g}{\gamma_s} - 1 \quad (2.1)$$

b) Coeficiente de Compressibilidade ( $a_v$ )

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (2.2)$$

c) Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica ( $m_v$ )

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_1} \quad (2.3)$$

d) Índice de Compressão ( $C_c$ )

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.4)$$

Esse índice é uma grandeza adimensional e é obtido na curva  $e$  x  $\sigma'_v$ , no trecho virgem de compressão.

e) Índice de Recompressão (Cr)

$$C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (2.5)$$

Assim como o índice de compressão, esse índice é uma grandeza adimensional e é obtido na curva  $e$  x  $\sigma'_v$ , no trecho de recompressão, que antecede a tensão de pré-adensamento.

f) Relação de Compressão (CR)

$$CR = \frac{C_c}{1 + e_i} \quad (2.6)$$

g) Relação de Recompressão (RR)

$$RR = \frac{C_r}{1 + e_i} \quad (2.7)$$

h) Coeficiente de Condutividade Hidráulica (k)

$$K = \frac{C_v \cdot a_v \cdot \gamma_w}{1 + e_m} \quad (2.8)$$

onde  $e_m$  = índice de vazios médio.

### 2.5.7 Características do Ensaio de Adensamento Convencional

Neste subitem, é realizada uma avaliação do ensaio de adensamento convencional através da abordagem das vantagens e desvantagens, além de alguns requisitos especiais para sua execução.

Entre as vantagens do ensaio de adensamento convencional, podem-se citar as seguintes:

- a) A utilização do equipamento é bastante simples, não exigindo um técnico altamente especializado para o seu manuseio.



- b) Há procedimentos práticos bem estabelecidos, tornando mais fácil a execução do ensaio e o estabelecimento da interpretação dos dados.

O ensaio, porém, apresenta uma série de desvantagens abaixo relacionadas:

- a) O método convencional exige um tempo excessivo de ensaio, usualmente variando de uma ou duas semanas, mas esse tempo pode aumentar, consideravelmente, quando ocorrem ciclos de carga e descarga. Logo, o ensaio torna-se dispendioso.
- b) Os pontos da curva tensão deformação são espaçados, dificultando, para certos tipos de solos, uma boa definição da tensão de pré-adensamento  $\sigma'_{vm}$ . A utilização de uma relação incremental de pressão igual a 0,5, ao invés da unitária, melhora a definição de  $\sigma'_{vm}$ , mas duplica o tempo do ensaio. (Almeida, 1988).
- c) As deformações provenientes do adensamento secundário manifestam-se em magnitudes variáveis nos diferentes estágios de carregamento e podem afetar a estimativa da tensão de pré-adensamento.
- d) O ensaio, ao ser executado com uma relação incremental unitária, submete a amostra a carregamentos instantâneos e crescentes durante o desempenho do experimento, o que induz a uma distribuição acentuadamente desuniforme de pressões neutras e altos gradientes hidráulicos.

Segundo Head (1986), alguns requisitos especiais são essenciais para a execução do ensaio, tais quais:

- a) Atenção constante e análise manual dos dados (a menos que um sistema de aquisição de dados seja utilizado).
- b) A decisão (do executor do ensaio) de quando aplicar o próximo incremento.

## 2.6 Ensaio Especiais de Adensamento

Visando a superar as desvantagens apresentadas nos ensaios de adensamento convencional, principalmente no que diz respeito ao excesso de tempo que o ensaio exige, pesquisadores têm proposto, ultimamente, vários tipos de ensaios de adensamento contínuo. Nesses ensaios as tensões efetivas são continuamente aumentadas através de diferentes procedimentos, os quais permitem a realização de ensaios em um ou dois dias, ou mesmo em algumas horas. Uma característica

importante desses ensaios é a contínua observação de poro pressões em uma das faces da amostra. Desenvolvimentos teóricos para a interpretação de tais ensaios (utilizando extensões da teoria de Terzaghi) têm sido apresentados em paralelo.

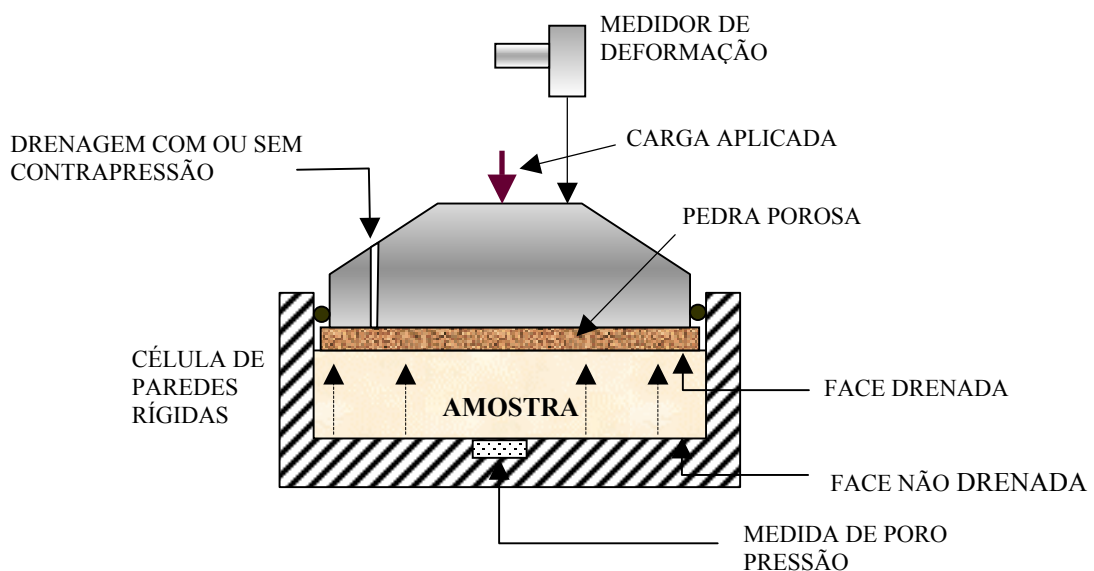
## 2.6.1 Equipamentos para Ensaio Especial

### 2.6.1.1 Tipo de Célula

Os ensaios de adensamento contínuos requerem uma célula especial na qual em uma das extremidades, em geral a face superior, há a ocorrência da drenagem e na outra extremidade, em geral na face inferior, a drenagem é restringida. A poro pressão da face não drenada é medida durante o ensaio. A figura 2.2 mostra os requisitos essenciais de uma célula de adensamento especial.

Segundo Almeida (1988), um requisito não essencial, mas desejável dos ensaios de adensamento contínuos, é o registro automático de dados, seja através de um oscilógrafo ou através de sistemas automáticos de aquisição de dados.

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



**Figura 2.2 - Célula de adensamento especial (adaptado de Head, 1986)**

### 2.6.1.2 Métodos de Carregamento e Condições de Contorno

Para os ensaios especiais de adensamento, são dois os métodos de carregamento em geral utilizados, segundo Almeida (1988):

- Carregamento mecânico através de uma prensa com velocidade constante controlada, usualmente através de um sistema de engrenagens, utilizado para ensaios de deformação controlada (tipo CRS).
- Carregamento hidráulico-pneumático oriundo da aplicação de ar a uma interface ar-água, sendo o ar comprimido fornecido por compressores ou por balão de nitrogênio, utilizado em geral para pressões de até 1000 kPa ( $\approx 10 \text{ kg/cm}^2$ ).

O sistema de aplicação direta de pressão permite também a realização de ensaios de deformação controlada através da utilização de motores de passo que pressionam água, a uma velocidade constante, e um pistão conectado na extremidade deslocável do corpo de prova.

### 2.6.2 Tipos de Ensaios Especiais de Adensamento

Diversos tipos de ensaios especiais de adensamento são apresentados na literatura. A figura 2.3 resume esses tipos de ensaios com os seus padrões de carregamento característicos e o procedimento convencional de aplicação de carga por incrementos.

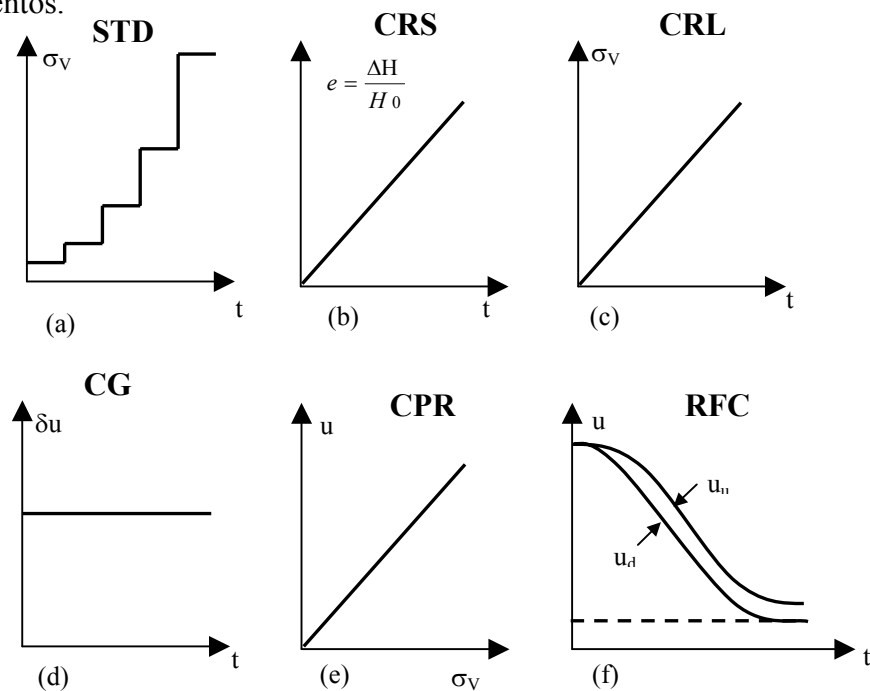


Figura 2.3 – Tipos de Ensaios de Adensamento, Head (1986)

O ensaio de adensamento incremental é representado na figura 2.3a. Nas figuras 2.3b a 2.3f, são representados os ensaios de adensamento contínuos, ditos especiais, descritos resumidamente a seguir:

- i) Figura 2.3b: Ensaio com Velocidade Controlada de Deformação, conhecido abreviadamente por CRS, do termo inglês *Constant Rate of Strain*.
- ii) Figura 2.3c: Ensaio à Velocidade Constante de Carregamento, CRL (*Constant Rate of Loading*), no qual a tensão aplicada é aumentada a uma velocidade constante.
- iii) Figura 2.3d: Ensaio com Gradiente Controlado de Poro Pressão, CG (*Constant Pore Pressure Gradient*), no qual a diferença entre as poro pressões no topo e na base são mantidas constantes.
- iv) Figura 2.3e: Ensaio com Razão Poro Pressão/ Pressão Aplicada Constante, CPR (*Constant Pressure Ratio*), no qual a carga é aplicada de tal forma que a poro pressão na face não drenada  $u_b$  é sempre uma proporção fixa da pressão aplicada  $\sigma_v$  ( $u_b/\sigma_v = \text{constante}$ ).
- v) Figura 2.3f: Ensaio de Fluxo Restringido, RFC (*Restricted Flow Consolidation*), no qual a velocidade de drenagem é controlada por um restritor de fluxo, de forma que a diferença entre a poro pressão nas duas faces permanece pequena durante o ensaio.

### 2.6.2.1 Ensaio à Velocidade Constante de Carregamento – CRL

No ensaio CRL, a carga aplicada à amostra é aumentada a uma taxa constante com o tempo, o que requer um sistema de aplicação de cargas mais complexo. Os métodos de aplicação de cargas mais utilizados são: a aplicação, a uma velocidade constante, de pesos a um braço de uma célula oedométrica convencional (Aboshi et al., 1970), ou o equipamento utilizado para o ensaio CRS, permitindo a drenagem apenas em uma face da amostra e medindo-se a poro pressão na base onde a face é não drenada.

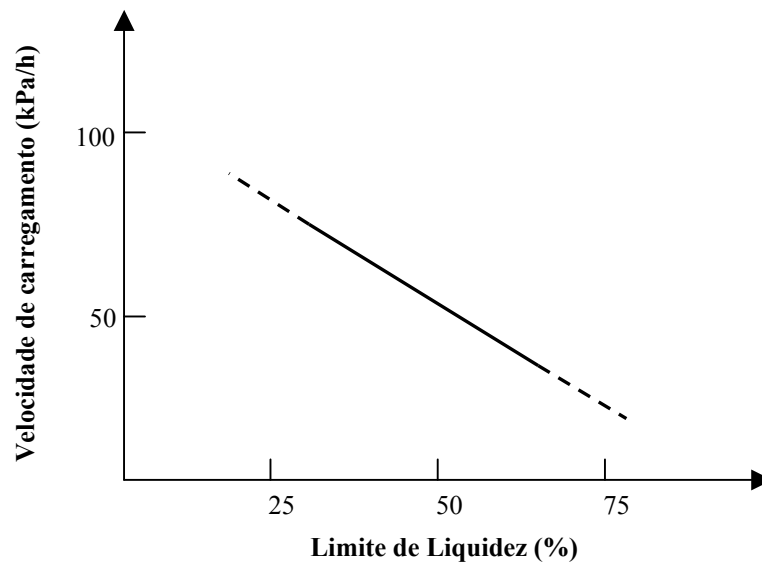
#### 2.6.2.1.1 Características do Ensaio CRL

Analisando os aspectos referentes à execução do ensaio, conclui-se que:

- a) As velocidades de carregamento utilizadas no ensaio CRL variam, em geral, de 6 a 600 kPa por hora, segundo Burghignoli (1979), mas ao contrário do ensaio

CRS, existe menos experiência acumulada a respeito da velocidade a ser utilizada. Fay e Cotton (1986) apud Almeida (1988), utilizaram velocidades variando entre 2 a 22%/h. Os autores sugeriram a utilização do gráfico da figura 2.4 para a definição da velocidade de carregamento em função do limite de liquidez do solo. Este gráfico baseia-se na experiência própria dos autores os quais não apresentaram os critérios utilizados para se chegar à relação proposta entre LL e a velocidade de carregamento.

- b) A velocidade de carregamento definida por experimentação para um determinado solo deve ser suficientemente baixa para garantir uma distribuição das poro pressões mais uniforme.



**Figura 2.4 – Velocidade de carregamento do Ensaio CRL segundo Fay e Cotton, 1986 (Almeida, 1988)**

- c) O ensaio necessita de um mecanismo automático de retroalimentação, sendo um fator de encarecimento do custo da aparelhagem.

#### **2.6.2.2 Ensaio com Gradiente Controlado de Poro Pressão - CG**

No início do ensaio, é aplicada uma pressão inicial que permite a dissipação da poro pressão da base  $u_b$  até um valor pré-selecionado de  $u_b$ . A partir daí, a carga aplicada à amostra é controlada de forma a manter  $u_b$  constante. Como a poro pressão na face drenante é nula (ou igual à contrapressão quando esta é utilizada), o gradiente de poro pressão entre as duas faces mantém-se constante.

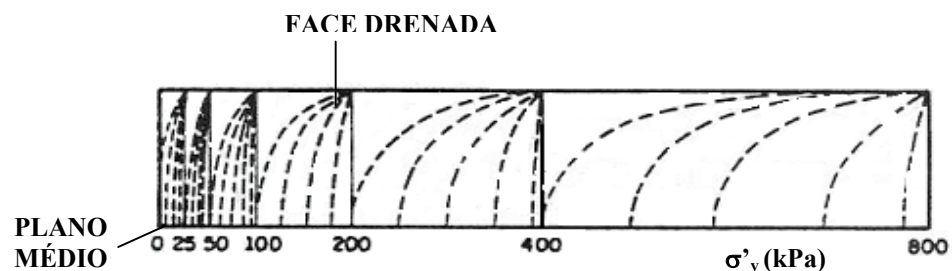
Assim, a poro pressão em qualquer profundidade é independente do tempo, e a equação diferencial parcial de Terzaghi reduz-se a uma equação diferencial ordinária.

Lowe et al. (1969) desenvolveram um equipamento para o ensaio CG e resolveram as respectivas equações. Após a fase transiente, foram obtidas equações idênticas ao do ensaio CRS.

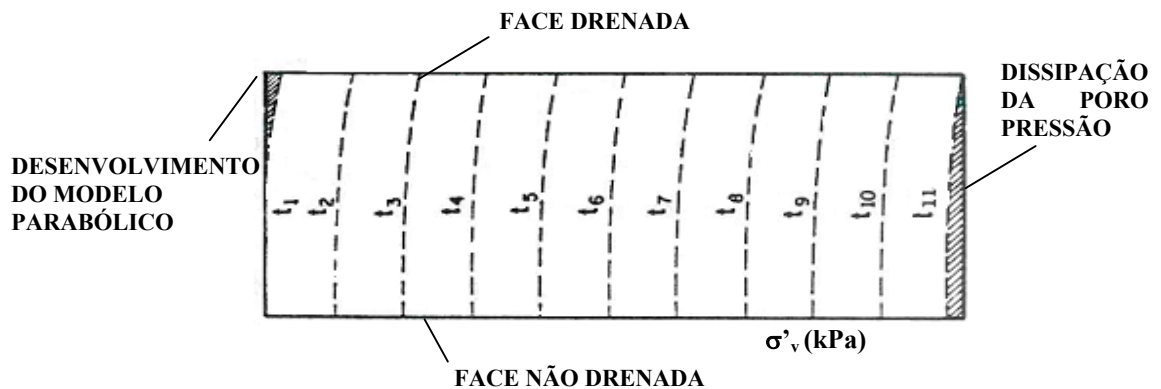
### 2.6.2.2.1 Características do Ensaio CG

As características mais relevantes desse ensaio podem ser assim citadas:

- A poro pressão é mantida constante e pequena na face inferior, aplicando-se gradualmente a tensão total no corpo de prova.
- A poro pressão distribui-se através de uma parábola, variando o valor gerado na base até zero na face drenada, conforme mostra a figura 2.5, sendo independente do tempo, permanecendo inalterada durante todo o ensaio, exceto no período de transição no começo da aplicação do carregamento e no final, quando cessam os incrementos de carga, continuando a dissipação das poro pressões.



(a) Isócronas do Ensaio Convencional



(b) Isócronas do Ensaio com Gradiente Controlado

Figura 2.5 – Comparação das poro pressões durante os Ensaio Convencional e com Gradiente Controlado (Lowe et al., 1969)

- c) Interrompendo-se o experimento em diferentes níveis de tensão total, obtêm-se informações a respeito da compressão secundária.
- d) O corpo de prova é saturado por contrapressão.

Vários autores expuseram trabalhos a respeito do ensaio CG, entre eles: Lowe et al. (1969), Sällfors (1975), Gorman et al. (1978), Leroueil et al. (1985), Silvestrini et al. (1986), entre outros.

Gorman et al. (1978) utilizaram valores de  $u_b$  entre 14 e 21 kPa (e contrapressão de 69 kPa) e ensaios de duração variando entre 1 a 6 dias. Os autores sugerem que a poro pressão na base não seja superior a 50% da pressão total aplicada, mas que não seja menor que 7 kPa. Lowe et al. (1969) utilizaram valores de  $u_b$  entre 5 e 28 kPa (contrapressão de 140 kPa) em uma argila marinha pré-adensada (LL entre 37% e 41%). A duração desses ensaios variou entre 1 e 3 dias. Já Sällfors (1975) utilizou valores de  $u_b$  variando entre 0,75 e 12,5 kPa (sem contrapressão). Esses ensaios duraram de 0,5 a 3 dias.

Os autores também concluem a respeito de alguns tópicos referentes tanto à realização como à obtenção de dados no ensaio, tais quais:

- a) O ensaio fornece dados significativos sobre a compressão primária e secundária.
- b) A poro pressão e os gradientes hidráulicos gerados são bem inferiores aos do ensaio convencional, conforme mostra a figura 2.5.
- c) As velocidades de deformação específica são baixas, mas ainda superiores às verificadas em campo.
- d) As curvas obtidas no ensaio são melhores definidas por apresentarem um maior número de pontos. Isso se deve à automação do processamento e da aquisição de dados.
- e) Devido à necessidade de dispor de um mecanismo automático de retroalimentação que segure um ajuste contínuo e gradual do carregamento, de forma a proporcionar a permanência de uma poro pressão constante na base, o ensaio exige um equipamento sofisticado, o que automaticamente eleva seu custo.

### 2.6.2.3 Ensaio com Razão Poro Pressão/ Pressão Aplicada Constante – CPR

A denominação CPR (*Constant Pressure Ratio*) foi proposta por Janbu et al. (1981) e tem por princípio a razão constante da poro pressão na base e da tensão total. Essa relação foi chamada de  $\lambda$  nos ensaios analisados por Janbu et al. (1981) nos quais os valores dessa relação encontraram-se no intervalo de 0,2 a 0,7. Os autores utilizaram velocidades de deformação entre 5%/h e 10%/h em argilas de média a baixa plasticidade, o que conduziu a ensaios com menos de 1 hora de duração. Essas velocidades seriam inadequadas para argilas moles de alta plasticidade.

O equipamento descrito por Janbu et al. (1981) consiste de uma célula oedométrica com medida de poro pressão na base e montada em uma prensa motorizada controlada por computador.

#### 2.6.2.3.1 Características do Ensaio CPR

A partir do ponto de vista de alguns autores, algumas observações e vantagens a respeito do ensaio de Carregamento Contínuo podem ser citadas:

- a) Janbu et al. (1981) atribuíram à possibilidade de estudo da tensão de pré-adensamento, através da influência da velocidade de aplicação de carga, uma das vantagens do ensaio de carregamento contínuo.
- b) Para Olson (1986), a condição  $\lambda = \text{constante}$  implica que as equações propostas por Janbu et al. (1981) não são válidas sob condições de fluxo transiente.

Porém, algumas desvantagens podem ser observadas no ensaio, tais como:

- a) A faixa de valores de  $\lambda$  a ser empregada em vários ensaios de um mesmo material precisa ser definida e não há critérios bem estabelecidos.
- b) O equipamento utilizado é bastante complexo, além de necessitar de um sistema automático de retroalimentação para que se possa variar a velocidade de carregamento de forma que se mantenha  $\lambda$  constante.



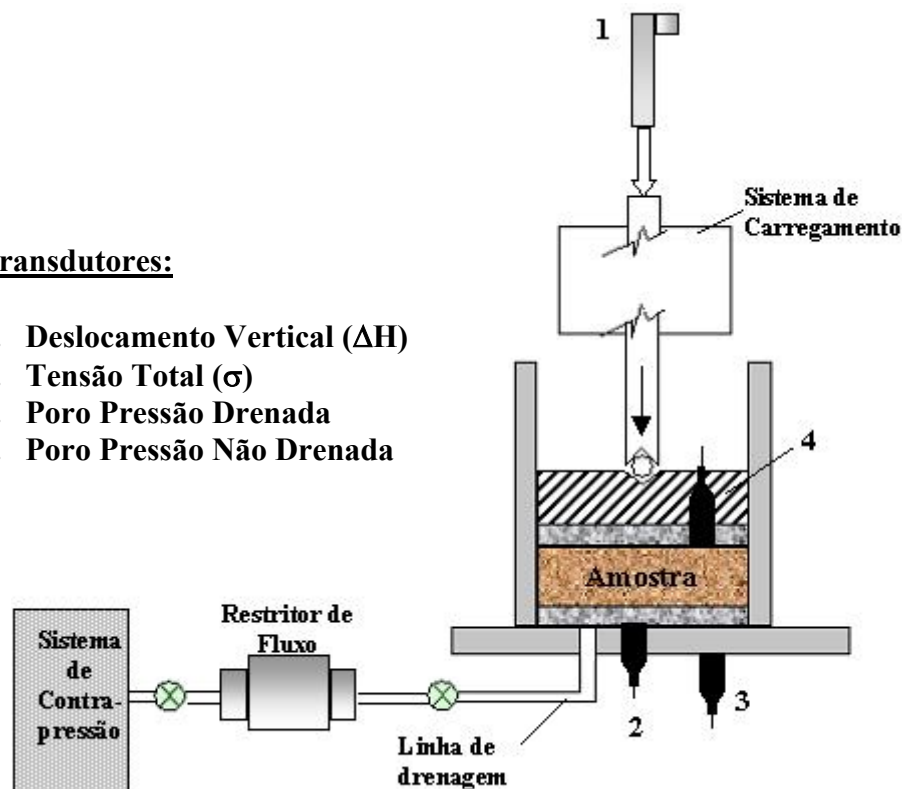
### 2.6.2.4 Ensaio de Fluxo Restringido

Segundo Sills et al. (1986), o ensaio de adensamento de fluxo restringido consiste na aplicação da pressão em um único incremento a uma amostra cuja face drenante é conectada a um dispositivo que restringe o fluxo d'água, conforme mostra a figura 2.6. Ao longo do desenvolvimento da drenagem, as poro pressões, nas faces drenada e não drenada do corpo de prova diminuem.

Transdutores conectados em cada uma das faces do corpo de prova são utilizados para o monitoramento das poro pressões.

#### Transdutores:

1. Deslocamento Vertical ( $\Delta H$ )
2. Tensão Total ( $\sigma$ )
3. Poro Pressão Drenada
4. Poro Pressão Não Drenada



**Figura 2.6 – Célula (de adensamento) para ensaio de Fluxo Restringido (adaptado de Head, 1986)**

As medições realizadas nesse ensaio são: poro pressão no topo (face não drenada), poro pressão na base (face drenada), pressão total na base do corpo de prova e deslocamento vertical.

O restritor de fluxo é um dispositivo fundamental do equipamento. Esse dispositivo consiste de uma série de filtros de papel muito finos do tipo “Millipore” comprimidos juntos em um cilindro de acrílico. O restritor de fluxo localiza-se na linha

de drenagem entre a amostra e o sistema de contra pressão. O grau de restrição depende do número de discos utilizados, cuja definição é, em geral, realizada por tentativas compatíveis com o tipo de solo a ser ensaiado, de forma a se alcançar valores de poro pressões na face drenada não muito diferentes entre si. A permeabilidade do restritor de fluxo deve ser muito menor do que a permeabilidade do solo.

Barbosa et al. (1993) descreveram princípios e equipamentos utilizados nos ensaios de fluxo restringido realizados na COPPE/ UFRJ. Os autores mostraram resultados dos ensaios de fluxo restringido de 24 horas de duração os quais são comparados com resultados de ensaios de adensamento convencionais de cerca de 10 dias de duração. Obtiveram-se boa concordância nas curvas índice de vazios *versus* tensão vertical efetiva dos dois tipos de ensaios. Valores de coeficientes de compressibilidade e tensão de pré-adensamento dos dois ensaios foram também próximos, confirmando, segundo Barbosa et al. (1993), ser o ensaio de fluxo restringido uma opção alternativa mais rápida que o ensaio convencional.

#### **2.6.2.4.1 Características do Ensaio de Fluxo Restringido**

Analisando alguns aspectos característicos do Ensaio de Fluxo Restringido, pode-se citar alguns considerados mais relevantes:

- a) O equipamento não apresenta complexidade e o ensaio é feito sem a necessidade de retroalimentação.
- b) O controle do restritor de fluxo apresenta certa dificuldade, o que pode ser citado como uma desvantagem do ensaio, pois a eficácia do restritor está diretamente relacionada à obtenção de bons resultados.
- c) Uma combinação de valores de poro pressão e tensão total pode ser usada para se atingir diferentes níveis de tensão efetiva, desde que a contrapressão seja aplicada em todo o estágio de carregamento.

A inexistência de critérios bem definidos para a escolha de um número de discos de papel-filtro compatível com o tipo de solo a ser ensaiado é um aspecto que requer cuidado no momento de quantificá-los.

## **2.7 Ensaio com Velocidade Controlada de Deformação – CRS**

Como o ensaio com velocidade controlada de deformação é o objeto principal de estudo dessa pesquisa, dar-se-á a ele maior enfoque.

### **2.7.1 Introdução**

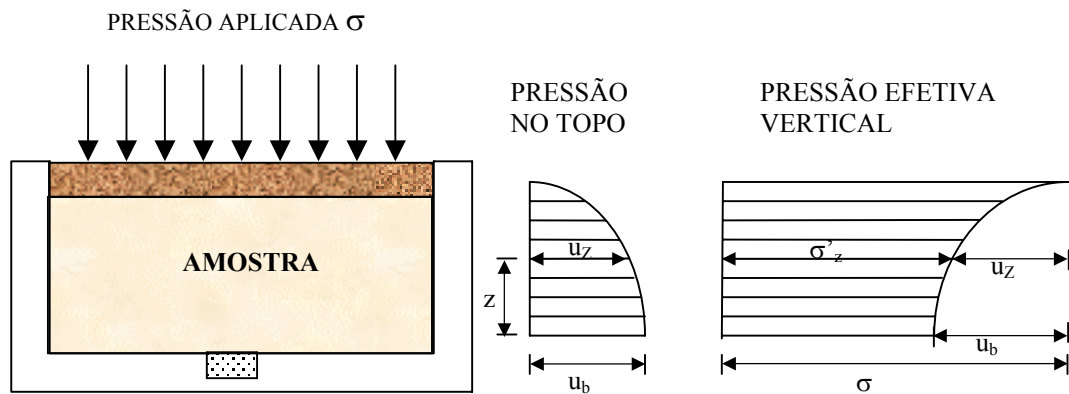
Os primeiros ensaios com velocidade controlada de deformação (CRS) apresentados na literatura foram propostos por Hamilton e Crawford (1959), tendo, originalmente, o objetivo de conferir rapidez à estimativa da tensão de pré-adensamento. A partir de então, foram criados diversos equipamentos e técnicas para sua execução e cálculo, devendo-se citar os trabalhos de Smith e Wahls (1969), Wissa et al. (1971) e Gorman et al. (1978). A partir daí, passaram, inclusive, a ser incorporados à prática geotécnica. Na Suécia, por exemplo, o ensaio CRS foi padronizado pelo Instituto Sueco de Geotecnia (SGI) em 1977. Nos Estados Unidos, o ensaio CRS foi padronizado pela ASTM (1982). Na Noruega, o ensaio é bastante utilizado e foi padronizado pelo Instituto Norueguês de Geotecnia (NGI).

O primeiro desenvolvimento teórico a respeito do ensaio foi apresentado por Smith e Wahls (1969) no qual propuseram uma formulação simplificada que levou em conta os conceitos de deformações finitas.

Uma proposta mais extensa e com uma análise mais completa foi apresentada por Wissa et al. (1971), na qual a formulação proposta pelos autores leva em consideração deformações infinitesimais.

### **2.7.2 Princípio do Ensaio CRS**

O ensaio CRS consiste essencialmente na aplicação gradual de carga na amostra, aumentando-se o deslocamento axial a uma taxa constante. As poro pressões são monitoradas na base (face não drenada), enquanto que a drenagem ocorre no topo, conforme mostra o esquema da figura 2.7.



**Figura 2.7 – Esquema do Ensaio CRS (adaptado de Almeida, 1988)**

Durante o ensaio, são efetuados registros contínuos da força aplicada ao corpo de prova, da poro pressão na base e do deslocamento da placa de topo, ou deformação axial além do tempo decorrido, para a obtenção dos parâmetros de cálculo.

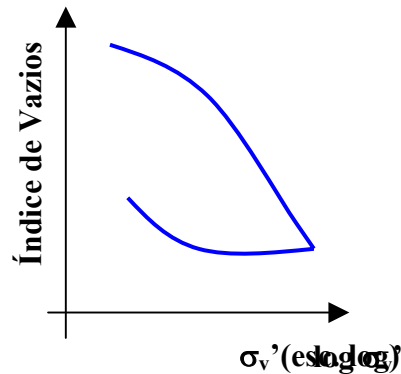
A tabela 2.1 mostra as leituras dessas grandezas com a unidade referente a cada uma de acordo com Head (1986).

**Tabela 2.1 – Leituras realizadas no ensaio CRS (Head, 1986)**

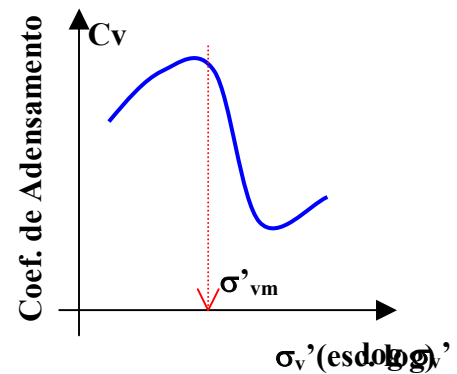
LEITURAS	VARIÁVEL	UNIDADE
Deformação Axial	$\Delta H$	mm
Carregamento Axial	P	N
Excesso de Poro Pressão	$\delta u$	kPa
Tempo Decorrido	t	minutos

Com base nessas leituras, calculam-se o coeficiente de adensamento ( $C_v$ ), o módulo edométrico (D), índice de vazios (e) e deformação específica vertical. Assim, são definidos os gráficos representativos do ensaio, plotando-se curvas melhor definidas, com um número suficiente de pontos para que haja uma melhor interpretação dos resultados. A figura 2.8 ilustra o traçado desses gráficos conforme Head (1986).

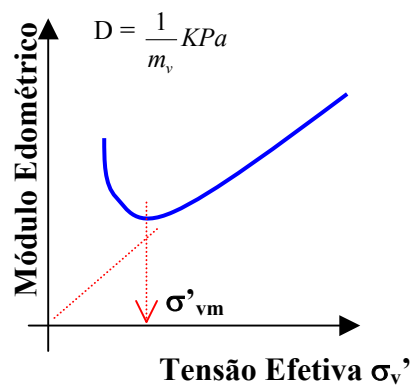
Índice de Vazios x Tensão Efetiva



Coef. de Adensamento x Tensão Efetiva



Módulo Edométrico x Tensão Efetiva



Porosidade x Tensão Efetiva

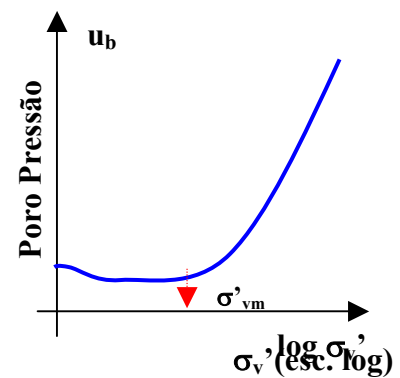


Figura 2.8 – Gráficos típicos obtidos no ensaio CRS (Head, 1986)

### 2.7.3 Histórico do Ensaio CRS

Conforme já citado anteriormente, Hamilton e Crawford (1959) foram os pioneiros no estudo do ensaio CRS. O estudo feito pelos autores objetivou avaliar discrepâncias existentes entre os recalques observados e os previstos para edificações construídas sobre a argila de Leda, no leste do Canadá. Os autores utilizaram ensaios de adensamento tipo CRS para uma velocidade de deformação situada na faixa de 0,0009 mm/min e 0,03 mm/min.

Os resultados obtidos mostraram que as velocidades de deformação específica mais elevadas correspondiam aos maiores valores de tensão de pré-adensamento.

Novos argumentos ao estudo da influência da velocidade de deformação foram apresentados por Crawford (1964). O estudo estruturou-se em dados provenientes de ensaios nos quais se adotaram valores de velocidade de deformação de 0,02 mm/min e 0,045 mm/min. A poro pressão atingiu valores máximos de 5% a 8% da tensão vertical e as curvas do gráfico “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram-se quase idênticas.

Crawford (1965), dando continuidade ao trabalho anterior, apresentou resultados de ensaios CRS nos quais a velocidade de deformação situou-se entre 0,0005 mm/min e 0,025 mm/min, com uma poro pressão máxima de 15% da tensão vertical aplicada. Com isso, o autor verificou uma diminuição de  $u_b$  com o decréscimo da velocidade de deformação.

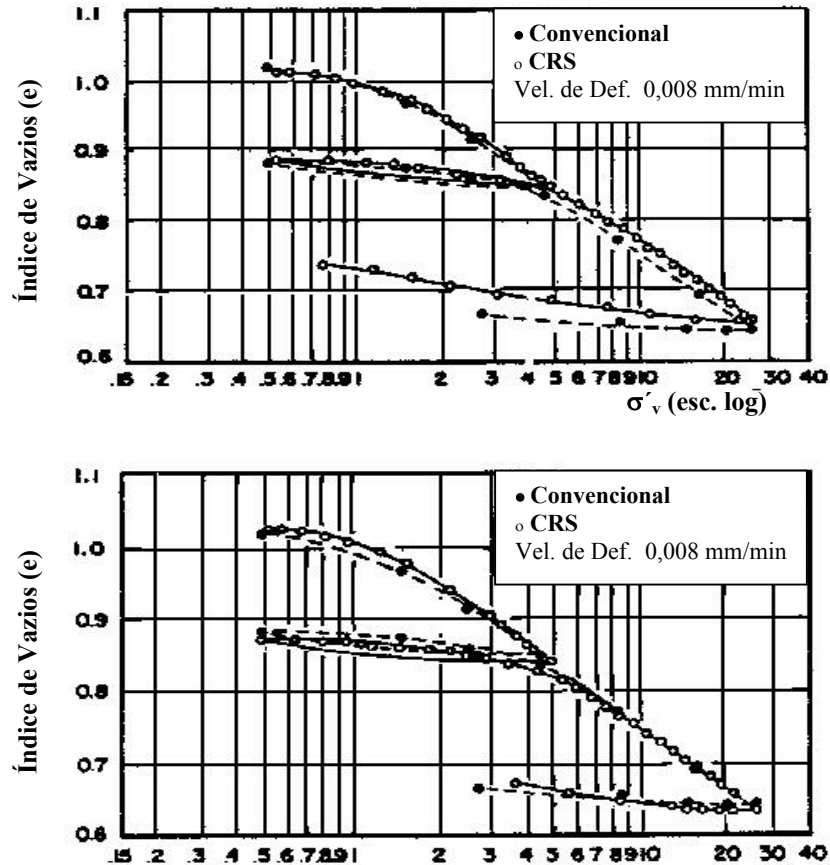
Ensaio CRS em amostras amolgadas foram realizados por Wahls e Degodoy (1965). No decorrer dos ensaios, foram medidas poro pressões máximas na base ( $u_b$ ) entre 25% e 75% da tensão vertical atuante, para uma velocidade de deformação aplicada na faixa de 0,01 mm/min a 0,045 mm/min.

Smith e Wahls (1969) analisaram resultados obtidos no ensaio em amostras de argilas reconstituídas em laboratório a uma velocidade de deformação que variou na faixa de 0,0005 mm/min a 0,05 mm/min. Segundo eles, para o tipo de material utilizado, o limite de  $u_b/\sigma'_v$  deveria ser estabelecido em 50%, pois, em um valor acima deste as poro pressões medidas na base são elevadas e não se pode afirmar uma distribuição aproximadamente uniforme da tensão efetiva ao longo do corpo de prova.

Os gráficos “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”, resultantes dos ensaios CRS, foram comparados com os obtidos no adensamento convencional. Através dessa análise, os autores concluíram que, para uma velocidade de deformação de valores mais baixos, houve boa concordância com os correspondentes aos do ensaio convencional.

Wissa et al. (1971) apresentaram um extenso estudo a respeito do ensaio CRS, no qual vários pesquisadores reconhecem a importância do trabalho realizado por esses autores. O material estudado foi a argila azul de Boston, nos Estados Unidos, reconstituída em laboratório. No ensaio, os corpos de prova, depois de saturados com uma contrapressão de 500 kPa, foram submetidos a uma velocidade de deformação que variou na faixa de 0,0025 mm/min a 0,009 mm/min, atingindo valores de tensões efetivas de até 2600 kPa.

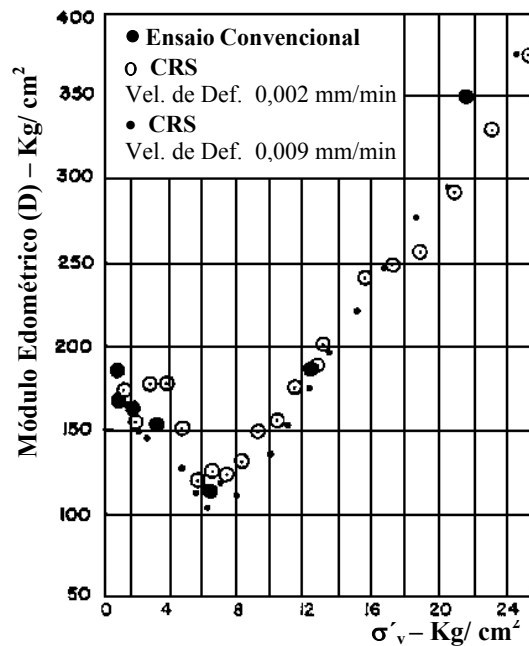
Os gráficos “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” foram comparados com os obtidos no adensamento convencional, assim como os realizados por Smith e Wahls (1969), apresentando boa concordância entre si, conforme mostra a figura 2.9.



**Figura 2.9 - Gráficos “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidos nos ensaios CRS comparados com os oriundos de ensaios convencionais (Wissa et al., 1971)**

Os valores do coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) mostram boa concordância com os valores obtidos pelos métodos de Taylor e Casagrande no ensaio de adensamento convencional. Os gráficos “ $D \times \sigma'_v$ ” mostraram não ser influenciados pela magnitude da velocidade de deformação. A figura 2.10 mostra essa situação, na qual são ilustradas três curvas; uma obtida no ensaio de adensamento convencional e duas no ensaio CRS com diferentes velocidades de deformação.

Wissa et al. (1971) recomendaram que a razão  $u_b / \sigma'_v$  não deveria resultar fora da faixa de 2% a 5%, para que a amostra não apresentasse elevados valores de gradientes hidráulicos.



**Figura 2.10 – Comparação das curvas Módulo Edométrico x Tensão Efetiva obtidas no ensaio convencional e no CRS (Wissa et al.,1971)**

Sällfors (1975), além de realizar ensaios com Gradiente Controlado de Poro Pressão (CG), utilizou o CRS para uma argila de Bäckebol, no qual adotou uma velocidade de deformação de 0,0007 mm/min a 0,02 mm/min. O autor utilizou duzentos pontos para traçar as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ ”, para que estas se apresentassem bem definidas.

Os ensaios de Sällfors (1975) mostraram que a tensão de pré-adensamento depende do tempo, tornando-se menor à medida que decresce a velocidade de deformação. Já as curvas “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram depender da velocidade de deformação, observando-se que, ao atingir a tensão de pré-adensamento, havia uma mudança brusca nessas curvas.

O módulo edométrico (D), para valores de tensões efetivas abaixo da tensão de pré-adensamento, aumentou com o acréscimo da velocidade de deformação, porém quando ultrapassada a tensão de pré-adensamento os valores de D parecem independem da velocidade de deformação.

Assim como Sällfors (1975), outros autores fizeram uso do ensaio CRS além do Ensaio com Gradiente Controlado de Poro Pressão (CG). Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Gorman et al. (1978) que realizaram pesquisas em solos do estado de Kentucky, nos Estados Unidos, com propriedades geotécnicas bem diversificadas, sendo divididos em três grupos, conforme mostra a tabela 2.2.



**Tabela 2.2 – Caracterização do material de estudo (Gorman et al., 1978)**

<b>Grupo</b>	<b>Variação das Profundidades (m)</b>	<b>Limite de Liquidez Médio (%)</b>	<b>Índice de Plasticidade Médio (%)</b>	<b>Umidade Natural Média (%)</b>
1	1,5 – 9,6	29	5,6	21,5
2	1,5 – 11,4	54	27	30
3	0,2 – 2,4	45	13	26

No ensaio CRS, os corpos de prova foram saturados com contrapressão de 69 kPa, variando a uma velocidade de deformação entre 0,0009 mm/min e 0,02 mm/min. A razão  $u_b/\sigma_v$  atingiu um valor máximo de 32%. Para Gorman et al. (1978), a razão  $u_b/\sigma_v$  deve concentrar-se entre 30% e 50%, para que a poro pressão gerada na base seja de, no mínimo, 7 kPa.

Quanto às tensões de pré-adensamento, os valores obtidos no CRS foram bastante discrepantes quando comparados com os convencionais, sendo alguns valores superiores nos CRS e outros nos convencionais, chegando a diferenças de até 300%.

Quanto à comparação dos resultados obtidos no CRS com os do adensamento convencional, os autores observaram boa concordância dos valores do coeficiente de adensamento ( $C_v$ ) para tensões efetivas acima da tensão de pré-adensamento.

A fim de determinar valores das tensões de pré-adensamento sob o centro de um aterro experimental de Gloucester, no Canadá, Leroueil et al. (1983) realizaram cinco modalidades de ensaios, além do convencional.

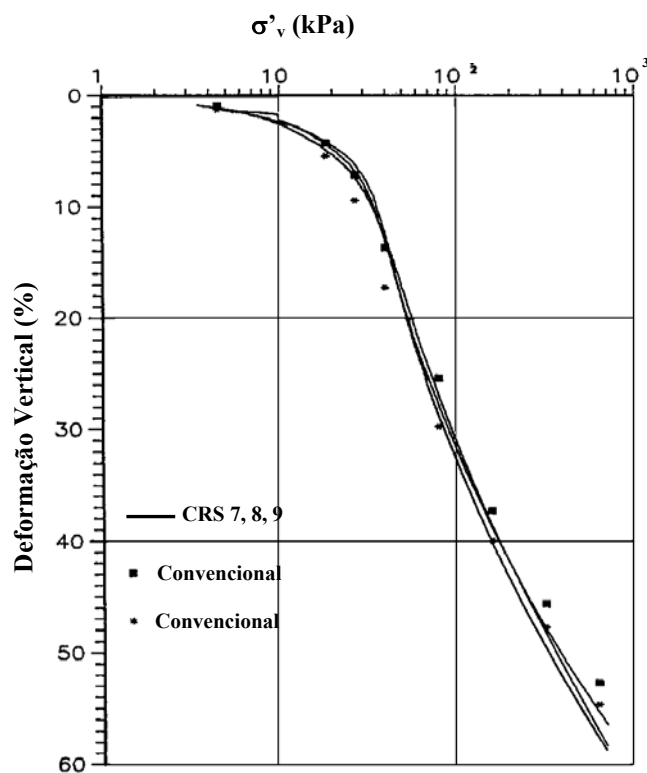
Os resultados encontrados no CRS mostraram que os efeitos do valor da velocidade de deformação aplicada sobre a compressibilidade não concordaram com o previsto por Sällfors (1975), que encontrou, para o trecho normalmente adensado, uma relação entre o aumento da compressibilidade e o decréscimo da velocidade de deformação.

No Brasil, a COPPE/ UFRJ introduziu no seu laboratório, em 1988, o equipamento para a realização do ensaio CRS, o que exigiu a confecção de um programa de aquisição e processamento automático de dados e um procedimento de experimentação adequado às condições peculiares da argila do Sarapuí, que foi o material utilizado na pesquisa. Carvalho (1989) apresentou detalhadamente este estudo.

O programa de experimentos feito pelo autor consistiu em cinco ensaios realizados no adensamento convencional e nove ensaios CRS dos quais quatro não chegaram a bons resultados devido a problemas apresentados no equipamento. A velocidade de deformação nos ensaios CRS variou na faixa de 0,002 mm/min a 0,01

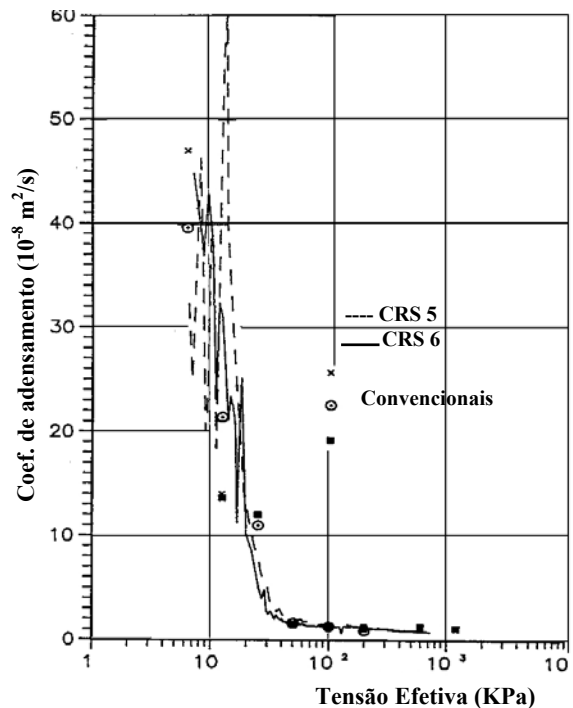
mm/min com duração entre 16 e 79 horas para cada ensaio. A utilização da contrapressão para a saturação dos corpos de prova não foi feita por duas razões: (a) o solo encontrava-se virtualmente saturado, (b) os ensaios CRS destinavam-se a comparações com ensaios de adensamento convencionais nos quais não se adotou saturação por contrapressão. A razão  $u_b/\sigma_v$  alcançou valores máximos de 32%, com um limite inferior de 10%. Houve uma boa concordância entre os resultados dos ensaios CRS e dos convencionais, como mostra a figura 2.11 para as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”.

As tensões de pré-adensamento determinadas pelo método de Casagrande para ensaios convencionais e CRS mostraram uma coerência significativa quando comparadas, apresentando valores de 28 a 38 kPa para os convencionais e 26 a 38 kPa para os ensaios CRS.



**Figura 2.11 – Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” dos ensaios n° 7, 8, 9 e do experimento convencional (prof. 5,0 a 5,5m), (Carvalho, 1989)**

Quanto ao coeficiente de adensamento, no trecho normalmente adensado, observa-se uma boa concordância dos resultados obtidos nos dois tipos de ensaios, enquanto que, para a faixa de tensão efetiva inferior a de pré-adensamento, ocorre acentuada dispersão, como mostra a figura 2.12.



**Figura 2.12 – Comparação dos valores de coeficientes de adensamento de ensaios CRS e convencionais (Carvalho, 1989)**

Sheahan e Watters (1996) realizaram ensaios CRS utilizando uma célula Rowe, que é uma célula utilizada para possibilitar o ensaio em amostras de grandes dimensões para o estudo da influência de caminhos preferenciais de drenagem em depósitos não uniformes (Rowe, 1972). A principal característica desse tipo de célula é a aplicação de pressão através de um sistema hidráulico. Foram feitos seis ensaios CRS, com duração entre 10 e 12 horas para cada um, na Argila Azul de Boston utilizando-se duas diferentes velocidades de deformação de 0,001 mm/min e 0,01 mm/min para cada três ensaios, sendo comparados com os resultados de quatro ensaios de adensamento convencional. A razão  $u_b/\sigma_v$  alcançou valores máximos de 21,8%.

Os valores médios das tensões de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ) obtidas foram de 94 kPa e 94,5 kPa nos ensaios CRS e adensamento convencional, respectivamente, o que mostrou uma boa aproximação entre os resultados. As curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram boa concordância para os diferentes ensaios, particularmente na reta de compressão virgem, conforme mostra a figura 2.13.

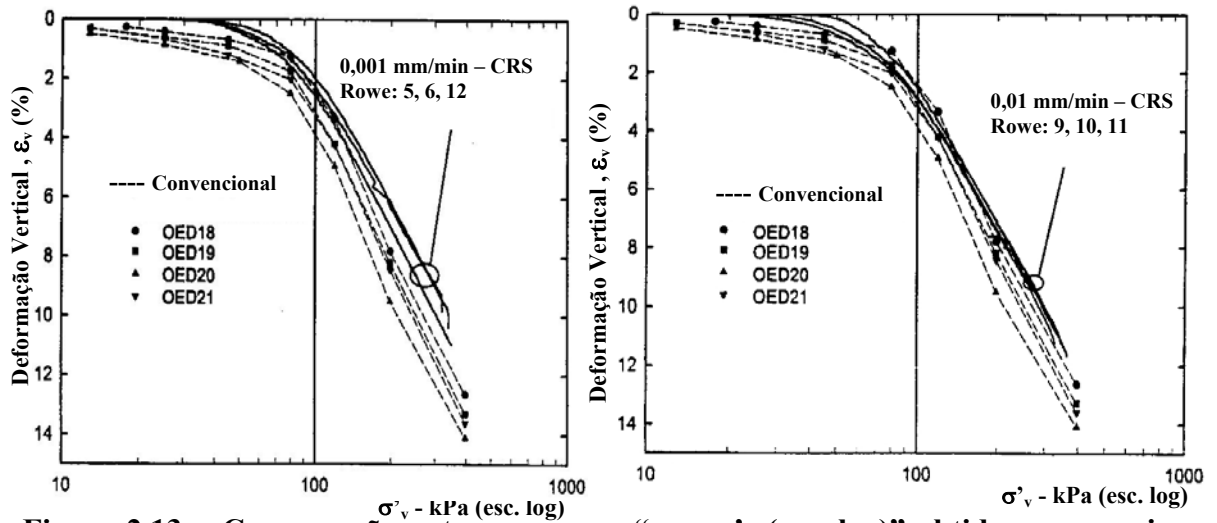


Figura 2.13 – Comparação entre as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS com célula Rowe comparadas com as do adensamento convencional (Sheahan e Watters, 1996)

Para os coeficientes de adensamento ( $C_v$ ) encontrados no CRS, os valores foram semelhantes aos verificados no adensamento convencional, o que comprovou o bom desempenho da utilização da célula Rowe para determinação desses parâmetros. Porém, os valores de  $C_v$  abaixo da tensão de pré-adensamento apresentaram-se bastante dispersos, justificados pelos autores com base no comportamento transiente da amostra. Após ultrapassar a tensão de pré-adensamento esses valores passaram a convergir apresentando concordância até o final dos ensaios, conforme mostra a figura 2.14.

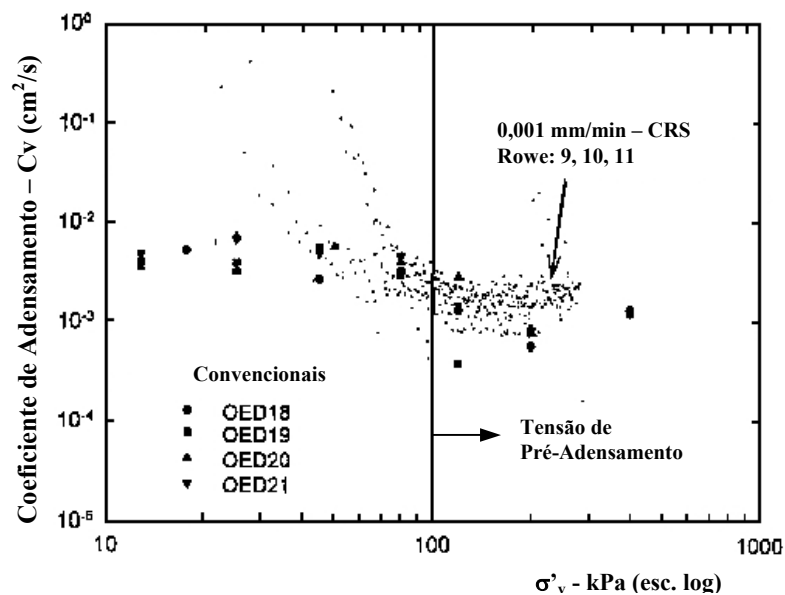
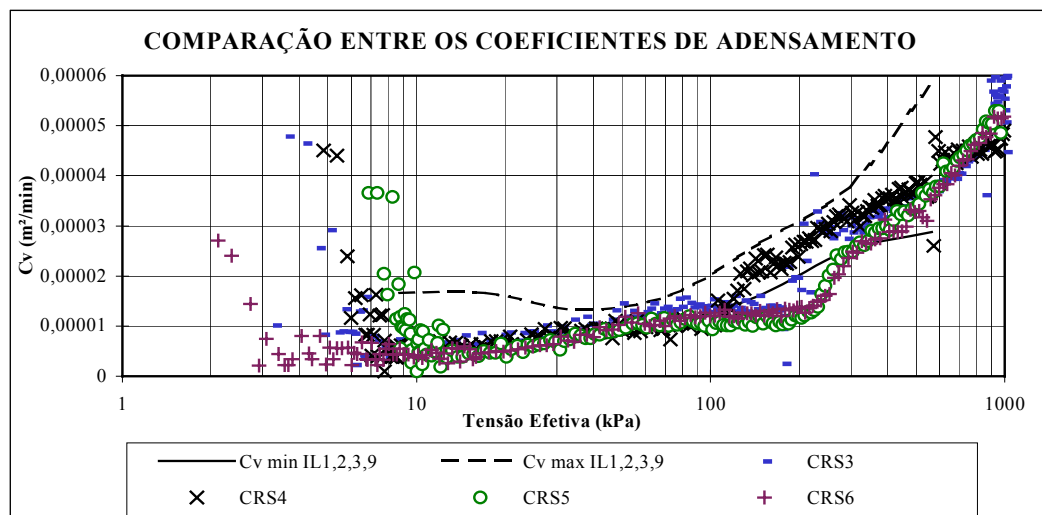


Figura 2.14 – Comparação entre as curvas “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS com célula Rowe comparadas com as do adensamento convencional (Sheahan e Watters, 1996)

Alborta (1997) realizou um estudo paramétrico no qual ensaios CRS foram feitos numa argila reconstituída de caolinita a fim de analisar alguns aspectos referentes a esses ensaios, como o efeito da velocidade de deformação, aplicação da contrapressão, obtenção da tensão de pré-adensamento, entre outros. Os resultados encontrados no CRS foram comparados com ensaios de adensamento convencionais. O material analisado apresentou valores médios do limite de liquidez de 48%, e 22,5% para a média dos valores do índice de plasticidade. A umidade natural encontrou-se na faixa de 35% e o índice de vazios inicial entre 0,90 e 1,03.

Dos nove ensaios do tipo CRS, seis deles foram feitos com o objetivo de analisar o efeito da velocidade de deformação aplicada. A experiência de outros autores já mostrou que a velocidade ideal de deformação depende, principalmente, das características do solo, e que velocidades mais baixas são mais adequadas quando a dissipação do excesso de poro pressão também é baixa. As velocidades de deformação aplicadas no estudo variaram de 0,001 mm/min a 0,01 mm/min.

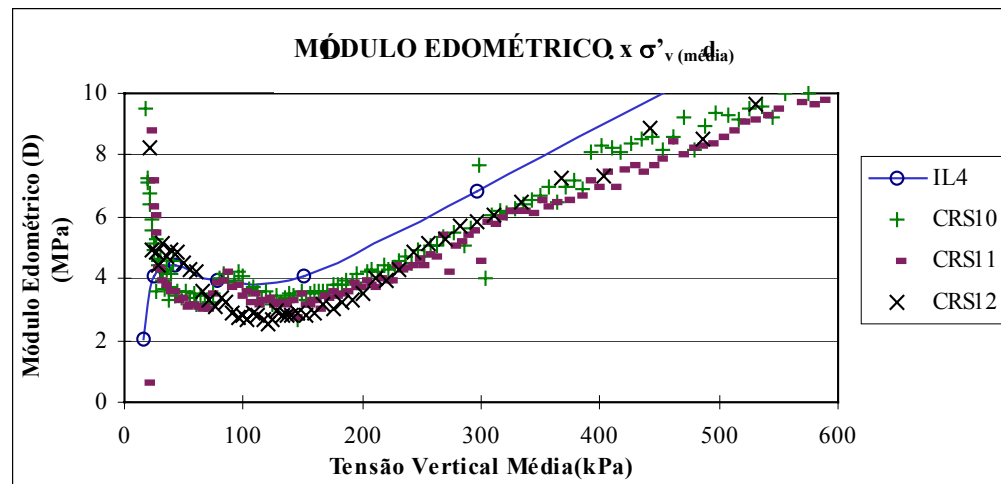
Em geral, os resultados encontrados no CRS foram compatíveis, ou seja, obtiveram boa concordância com os encontrados nos ensaios convencionais, embora estes tenham apresentados menores valores de  $C_v$ , (figura 2.15). Muito das dispersões encontradas nos ensaios de adensamento convencional foi devido à diferença de tamanho das amostras.



**Figura 2.15 – Curvas “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS e convencionais (IL 1, 2, 3, 9), (Alborta, 1997)**

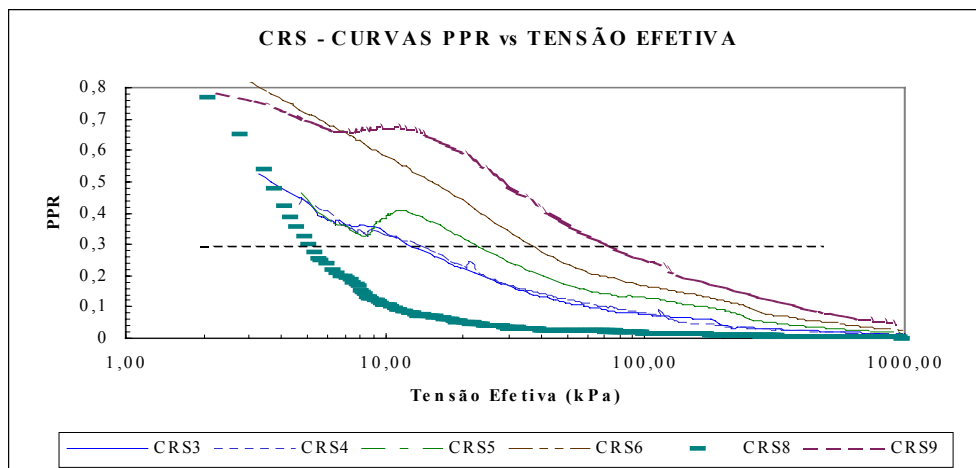
Após a análise realizada a respeito da velocidade de deformação, Alborta (1997) confirma a nova hipótese sugerida por Sheahan e Watters (1997) que para argilas reconstituídas há maior dependência da velocidade de deformação do que para argilas naturais, devido à cimentação entre as partículas ser menor, pois estas não apresentam um histórico de tensões. Porém, uma velocidade de deformação muito baixa ou muito alta compromete a qualidade dos resultados.

Quando os valores de  $\sigma'_v$  ultrapassaram a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_v$  entre 100 e 200kPa) há uma maior aproximação dos valores do módulo edométrico D encontrados nos quatro ensaios (3 deles do tipo CRS e 1 convencional), como mostra a figura 2.16.



**Figura 2.16 - Curvas “D x  $\sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS e convencional (IL 4), (Alborta, 1997)**

Para o autor, a sugestão de limitar a razão  $u_b/\sigma_v$  a uma taxa de 30%, como sugere a ASTM, parece muito conservadora, pois, segundo ele, a taxa deve variar de acordo com o tipo de solo testado e com seu histórico de tensões. Muitos dos ensaios desenvolveram elevadas variações entre  $u_b/\sigma_v$ , chamadas pelo autor de PPR (*Pore Pressure Ratio*), como mostra a figura 2.17 e, mesmo assim, mostraram bons resultados nos parâmetros de ensaio.



**Figura 2.17 – Curvas “PPR x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas no ensaio CRS, (Alborta, 1997)**

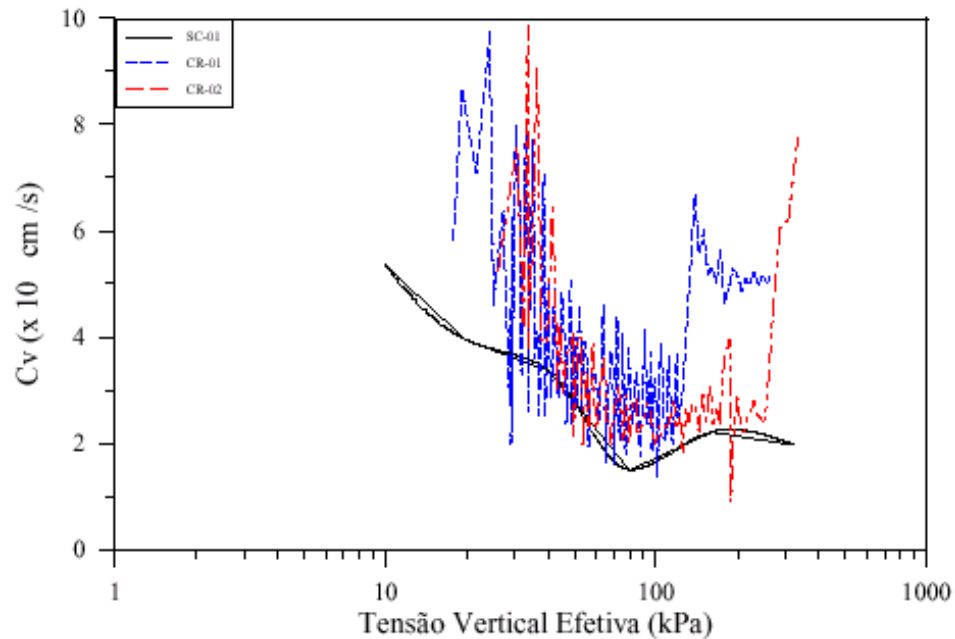
Baptista (1998) apresentou e discutiu as características geotécnicas do depósito de argila mole da enseada do Cabrito em Salvador, na Bahia, onde foi implantado um aterro, visando ao assentamento de famílias. A determinação das propriedades do solo foi feita através de ensaios geotécnicos de campo e de laboratório. Entre os ensaios de laboratório, o autor realizou ensaios CRS juntamente com adensamentos convencionais.

O material de estudo apresentou um teor de umidade médio de 81%, sendo este um pouco inferior ao limite de liquidez, que apresentou um valor médio de 90%. O índice de plasticidade médio do depósito é da ordem de 50%. O material possui compressibilidade elevada, apresentando valores médios de  $C_c$  entre 0,84 e 0,94 para os ensaios convencionais e CRS, respectivamente, apresentando índice de vazios iniciais na faixa de 1,70 a 2,83.

O equipamento CRS mostrou-se eficiente e confiável, permitindo a obtenção de resultados semelhantes aos conseguidos utilizando o ensaio convencional, com a geração de um maior número de pontos e com um tempo até 10 vezes menor que o convencional.

Foram encontrados para os ensaios de laboratório valores de  $C_v$  da ordem de  $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ . A velocidade de deformação variou na faixa de 0,0015 a 0,0090 mm/min.

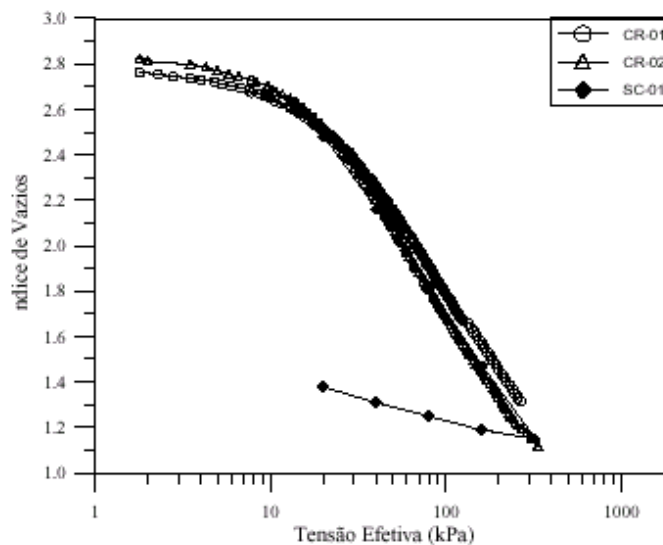
Na figura 2.18, está plotada a variação de  $C_v$ , nos ensaios de uma das amostras, com a tensão efetiva vertical. O gráfico indica uma tendência de concordância entre os ensaio CRS com o convencional para tensões maiores que  $\sigma'_{vm}$ .



**Figura 2.18 – Variação de  $C_v$  com  $\sigma'_v$  em dois ensaios CRS e um convencional (Baptista, 1998)**

Os altos valores de  $C_v$  observados no início dos ensaios CRS, possivelmente foram causados pelo baixo excesso de poro pressão registrado nos momentos iniciais dos ensaios, o que invalida estes pontos iniciais. Esta foi uma característica presente em todos os ensaios CRS realizados pelo autor. Segundo Baptista (1998), a fase inicial dos ensaios CRS se caracteriza por um fluxo transiente de água no interior do corpo de prova, o que pode explicar as baixas poro pressões desenvolvidas nesta fase.

A figura 2.19 mostra as curvas dos ensaios CRS e convencional realizados em uma das amostras, podendo-se observar uma boa concordância entre os ensaios utilizando as duas técnicas.



**Figura 2.19 – Curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” em ensaio convencional e CRS (Baptista, 1998)**



O ensaio CRS também foi utilizado em argila de caolinita estabilizada com cal. Kassin e Clarke (1999) utilizaram esse material para verificar a alteração das características de compressibilidade quando estabilizado com cal. Os autores utilizaram também o ensaio de adensamento convencional para fins comparativos e para verificar a eficácia do equipamento por eles utilizado.

A razão  $u_b/\sigma_v$  utilizada para a argila pura foi de 10% a uma velocidade de deformação de 0,03 mm/min e 0,05 mm/min, para um limite de liquidez menor que 60%, resultando em ensaios que duraram 145 e 75 minutos, respectivamente. A contrapressão aplicada para a saturação dos corpos de prova foi de 50 kPa. Os ensaios de estabilização foram realizados em argila acrescida de 6% de cal curada a 14 e 28 dias para fins de comparações entre os resultados, com velocidade de deformação de 0,065 mm/min com tempo de duração de 27 a 90 minutos.

Os resultados, como esperado, mostraram que a adição de cal e o tempo de cura resultaram na rigidez das amostras e mostraram boa similaridade, quando comparados entre os dois ensaios, o que comprovou o bom desempenho do equipamento utilizado pelos autores.

Leroueil e Hight (2002), ao analisarem o trabalho de Leroueil et al. (1985), mostram o efeito da velocidade de deformação na obtenção das curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”. Através dessa análise, os autores observaram que essas curvas são diretamente influenciadas pela velocidade de deformação, conforme já observado também por Crawford (1965), Sällfors (1975) e Leroueil et al. (1983). Logo, segundo Leroueil e Hight (2002), baseado no trabalho de Leroueil et al (1985), a tensão de pré-adensamento tem relação direta com a velocidade de deformação utilizada no ensaio CRS, ou seja, para maiores velocidades de deformação, maior a estimativa da tensão de pré-adensamento.

A implicação do efeito da velocidade de deformação foi descrita detalhadamente por Leroueil et al. (1985), Leroueil (1988) e Leroueil (1996) e apenas o principal aspecto é discutido por Leroueil e Hight (2002). Assumindo que o adensamento primário é completado depois de 24 horas em cada estágio de carregamento no ensaio de adensamento convencional, a velocidade de deformação no final do período de carregamento pode ser associada à curva de compressão, e é dada pela seguinte equação (Leroueil, 1988):

$$v_{24hs}(s^{-1}) = 2 \times 10^{-7} \frac{Cc}{1 + e_0} \quad (2.9)$$

Esta velocidade de deformação é menor do que as velocidades comumente utilizadas nos ensaios CRS, segundo Leroueil e Hight (2002). Com isso, a tensão de pré-adensamento e a tensão efetiva medidas nos ensaios CRS são maiores que as medidas nos convencionais.

Uma reunião de resultados realizada por Leroueil (1996) para variadas argilas de diferentes países indica que as tensões de pré-adensamento verificadas nos ensaios CRS são, em geral, 25% maiores que nos ensaios de adensamento convencionais. A tabela 2.3 mostra os valores da relação  $\sigma'_{vmCRS}/\sigma'_{vmCONV}$  obtidos através dessa reunião de resultados realizada por Leroueil (1996).

**Tabela 2.3 - Valores da relação  $\sigma'_{vmCRS}/\sigma'_{vmCONV}$  obtidos através de uma reunião de resultados realizada por Leroueil (1996)**

Local	$\sigma'_{vmCRS}/\sigma'_{vmCONV}$	Referência
Quebec, Canadá	1,28	Lerouiel et al. (1983)
Finlândia (1 depósito)	1,16	Kolisoja et al. (1989)
Osaka, Japão	1,3 – 1,5	Hanzawa et al. (1990)
Fucino, Itália	1,2	Burghignoli et al. (1991)
Ariake e Kuwana, Japão	1,3 – 1,4	Hanzawa (1991)
Yokohama, Japão	1,25	Okumura e Suzuki (1991)
Finlândia (três depósitos)	1,3	Hoikkala (1991)
Japão (várias argilas)	1,18	Mizukami e Motoyashiki (1992)
Bothkennar, Reino Unido	1,33	Nashi et al. (1992)

#### 2.7.4 Cálculo dos parâmetros obtidos no ensaio CRS segundo Wissa et al. (1971)

A formulação teórica proposta por Wissa et al. (1971) considera que as deformações são infinitesimais na interpretação do ensaio com velocidade controlada de deformação. A análise teórica está fundamentada na Teoria de Terzaghi que apresenta como válidas as seguintes hipóteses: (a) o solo está completamente saturado; (b) os grãos de solo e o fluido intersticial são incompressíveis; (c) o solo é homogêneo; (d) a drenagem é unidimensional; (e) é válida a Lei de Darcy para o escoamento do fluido intersticial; (f) as deformações só ocorrem na direção vertical; (g) os fenômenos observados em pequenas massas de solo podem ser estendidos às grandes; (h) certas propriedades do solo (módulo edométrico e permeabilidade) permanecem invariáveis durante todo o processo de adensamento; (i) a tensão total se mantém constante ao

longo do tempo; (j) há uma relação linear entre as variações da tensão efetiva e do índice de vazios.

As três últimas hipóteses não são aceitas por Wissa et al. (1971). Além disso, consideram que o coeficiente de adensamento  $C_v$  é constante e não impõem a  $k$  ou  $m_v$  qualquer relação particular com as tensões e deformações.

Baseado nessa teoria, na obtenção dos resultados do ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação, são utilizadas as seguintes expressões:

a) Poro Pressão

Como na face drenante ( $z=0$ ) a poro pressão é igual a zero, a distribuição das poro pressões é dada pela seguinte equação:

$$u = \frac{v \cdot \gamma_a \cdot H}{K} \left[ z - \frac{z^2}{2H} \right] \quad (2.10)$$

b) Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica ( $m_v$ )

Para  $m_v$  considerado constante, a distribuição das poro pressões é independente do tempo, logo o coeficiente de compressibilidade volumétrica é dado por:

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma_v} = v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_v} \quad (2.11)$$

c) Coeficiente de Adensamento ( $C_v$ )

$$C_v = 0,263 \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta t} \cdot \frac{\bar{H}^2}{u_b} \quad (2.12)$$

d) Tensão Efetiva Vertical Média

A deformação específica vertical média  $\varepsilon_v = v \cdot t$  corresponde à tensão efetiva média que é dada por:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (2.13)$$

Este valor médio de  $\sigma'_v$  é o utilizado no traçado gráfico da curva tipo “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” ou “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”, assim como os valores obtidos para  $C_v$ ,  $u_b$  e  $m_v$ , já ilustrado na figura 2.8.

### 2.7.5 Determinação da Velocidade no Ensaio CRS

Para determinar a velocidade adequada a ser utilizada no ensaio, deve-se levar em consideração os seus objetivos, além das limitações teóricas para a análise dos resultados. Portanto, a velocidade deve atingir um determinado valor no qual a poro pressão gerada na base atinja um valor mínimo para a obtenção de bons resultados de coeficientes de adensamento, definido pela eficácia das leituras do transdutor que mede as poro pressões, e também um valor máximo no qual a relação tensão-deformação atinja um limite sem que os resultados possam ser questionáveis.

Há uma certa diversidade de critérios para a seleção da velocidade no ensaio CRS encontrados na literatura, como os propostos por: Smith e Wahls (1969), Wissa et al. (1971), Gorman et al. (1978), Armour e Drnevich (1986), além do critério da ASTM (*American Society of Testing and Materials*).

Verifica-se que a maioria deles prescreve diretamente a velocidade com a razão  $u_b/\sigma_v$ , entre a poro pressão e a tensão vertical total, ou então associam essas duas condições.

#### 2.7.5.1 Critério da ASTM (*American Society of Testing and Materials*)

A norma ASTM D4186 / 98 propõe que a velocidade do ensaio está correlacionada com o limite de liquidez do solo, de acordo com a tabela 2.4. A ASTM D4186 / 98 sugere que a razão  $u_b/\sigma_v$  atinja o limite de 30%.

**Tabela 2.4 – Velocidades de ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/ 98 (ASTM, 1998)**

Faixa de Limites de Liquidez, LL (%)	Velocidade de Deformação (%/ min)
Até 40	0,04
40 a 60	0,01
60 a 80	0,004
80 a 100	0,001
100 a 120	0,0004
120 a 140	0,00001

### 2.7.5.2 Critério de Armours e Drnevich (1986)

A proposta apresentada por Armours e Drnevich (1986) parte do desenvolvimento teórico de Wissa et al. (1971), no qual chegaram à seguinte equação empírica para a determinação da velocidade de deformação:

$$v = \frac{-C.Pa.K_i}{\gamma_a.H_i^2} \log[1 - (u_b / \sigma_v)_{\max}] \quad (2.14)$$

Onde,

C= coeficiente intrínseco que depende do limite de liquidez do solo;

Pa= pressão atmosférica;

$k_i$ = condutividade hidráulica inicial;

$u_b / \sigma_v$ = máximo valor da razão poro pressão/ tensão total desejada.

Com base em ensaios em três solos com umidades  $w$  iniciais diferentes, o coeficiente C foi definido por:

$$C (\%) = \exp (8 - 3IL) \quad (2.15)$$

Onde exp é a base dos logaritmos naturais e IL o índice de liquidez:

$$IL = (w - LP) / (LL - LP) \quad (2.16)$$

Para a definição de  $k_i$ , os autores sugeriram que esse parâmetro deve ser medido no próprio equipamento de ensaio. O valor da razão  $u_b / \sigma_v$ , máximo admissível, deve ser de 40% a 50%.

Na tabela 2.5, são apresentados, resumidamente, outros critérios para determinação de velocidades de deformação utilizadas no ensaio CRS propostos na literatura.

**Tabela 2.5 – Critérios para determinação de velocidades de deformação utilizadas no ensaio CRS**

Critérios	Razão $u_b / \sigma_v$	Observação
Smith e Wahls (1969)	Máxima de 50%	Os autores propuseram a seguinte equação empírica para determinação da velocidade: $v = \frac{C_v \cdot C_c}{m^2 H (1 + e_0)} \left[ \frac{u_b / \sigma_v}{1 - 0,7(u_b / \sigma_v)} \right]$ onde m= coef. de proporcionalidade que corresponde à porcentagem de H (altura do corpo de prova) encontrada no momento de valor máximo de $u_b / \sigma_v$ (0,6 a 0,8). Impondo-se um valor de $u_b / \sigma_v$ , estima-se v pela seleção dos valores de $C_v$ , $C_c$ e m.
Wissa et al. (1971)	2% a 5%	A razão $u_b / \sigma_v$ proposta visa à determinação de uma poro pressão na base que permita a obtenção da curva “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” e calcular $C_v$ de uma forma segura, porém, acarreta velocidades de deformação muito reduzidas para argilas muito plásticas.
Gorman et al. (1978)	30 a 50%	O valor mínimo da poro pressão durante o ensaio deveria ser de 7 kPa, pois abaixo desse valor a obtenção de $C_v$ não seria satisfatória.
Larsson e Sällfors (1986)	Máxima de 15%	Utilizado para as argilas da Suécia. O valor limite da velocidade de deformação é padronizado, em 0,012 mm/min.
Sandbraekken et al. (1986)	5% a 10%	Utilizado pelo Instituto de Geotecnia da Noruega (NGI). O valor da velocidade de deformação varia de 0,083 mm/min a 0,166 mm/min.
Carvalho et al. (1993)	Máxima de 30%	Método simples que se baseia em um estágio do ensaio convencional (com duração de no máximo duas horas) onde se estima a razão $u_b / \sigma_v$ esperada durante o experimento. Para a argila do Sarapuí, no Rio de Janeiro, que foi o material de estudo, se a tensão efetiva do estágio do ensaio convencional de referência estiver situada no trecho normalmente adensado e se o valor de U pertencer ao intervalo entre 75% e 90%, o critério de velocidade proposto pelos autores dá bons resultados.

### **3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO**

O objetivo desse capítulo é caracterizar o material ensaiado através de resultados de ensaios de caracterização (Limites de Atterberg e Granulometria), que possibilitem identificar as propriedades do material, além de classificá-lo e de situar o local em que se procedeu a amostragem.

As informações referentes aos ensaios de caracterização são bastante úteis para a utilização dos critérios de determinação da velocidade utilizada nos ensaios com velocidade controlada de deformação (CRS).

#### **3.1 Local de Extração das Amostras**

As amostras são provenientes de dois locais distintos. Duas amostras foram extraídas das fundações do aterro hidráulico da Via Expressa Sul em Florianópolis localizado na região dos bairros da Costeira do Pirajubaé e Saco dos Limões.

As outras três amostras são oriundas do município de Joinville, extraídas de um terreno de uma grande indústria do município, junto à Baía da Babitonga.

As amostras indeformadas foram coletadas através de amostradores tipo shelby de 4" com pistão estacionário.

#### **3.2 Aspectos Geológicos**

A região costeira de Santa Catarina engloba áreas de maior elevação e declividade, que correspondem a solos residuais de rochas pré-cambrianas e áreas de baixada, correspondentes a solos sedimentares quaternários. A partir de investigações geológico-geotécnicas disponíveis, observa-se que a espessura dos sedimentos quaternários da região é maior nas proximidades do litoral, e vai se reduzindo nas áreas mais elevadas onde ocorrem solos residuais.

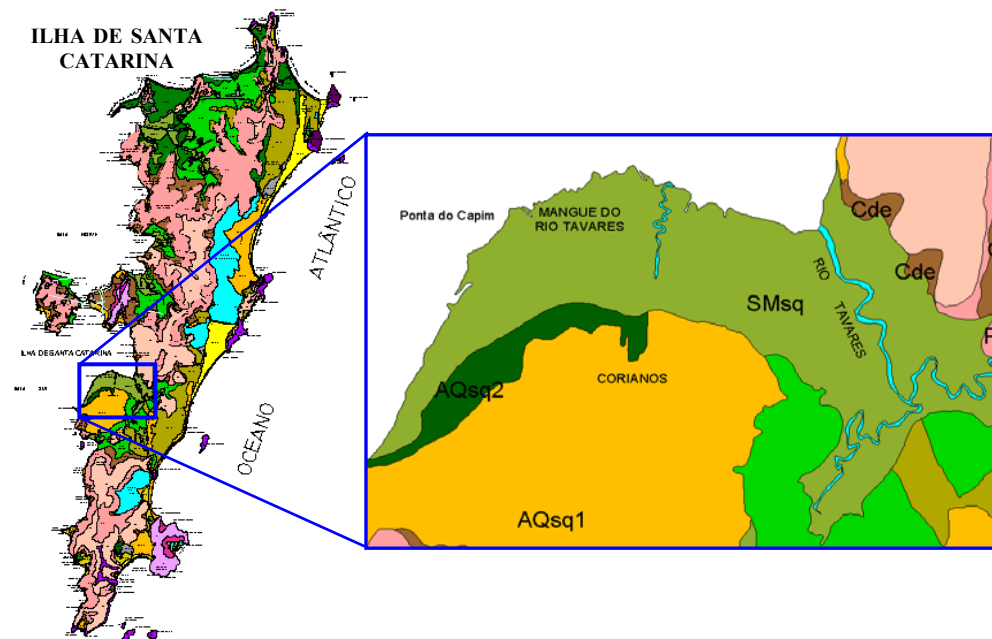
As áreas de planície tiveram sedimentação controlada pelas flutuações do nível do mar durante a Era Quaternária, quando ocorreram processos transgressivos e regressivos. Segundo Massad (1999), este processo é o principal mecanismo de formação dos sedimentos marinhos das planícies costeiras brasileira, promovendo a

sedimentação dos depósitos, com alteração das tensões efetivas atuantes no solo. Esse autor apresenta a oscilação do nível do mar como um dos importantes mecanismos de sobre-adensamento das argilas marinhas, além do envelhecimento e da erosão. A partir desses fatores, pode-se entender porque sedimentos com características sedimentológicas semelhantes podem apresentar comportamentos geotécnicos diferenciados.

### 3.3 Pedologia

Com a utilização da classificação sistemática de perfis superficiais de solos, a pedologia trabalha com dados significativos sobre composição, gênese, substrato, características físicas, morfológicas e ambientais do solo.

Pelo mapa geotécnico de Florianópolis elaborado por Santos (1997), o solo dessa região pertence à unidade geotécnica classificada como Solo de Mangue com substrato sedimentos quaternários (SMsq), como mostra a figura 3.1.



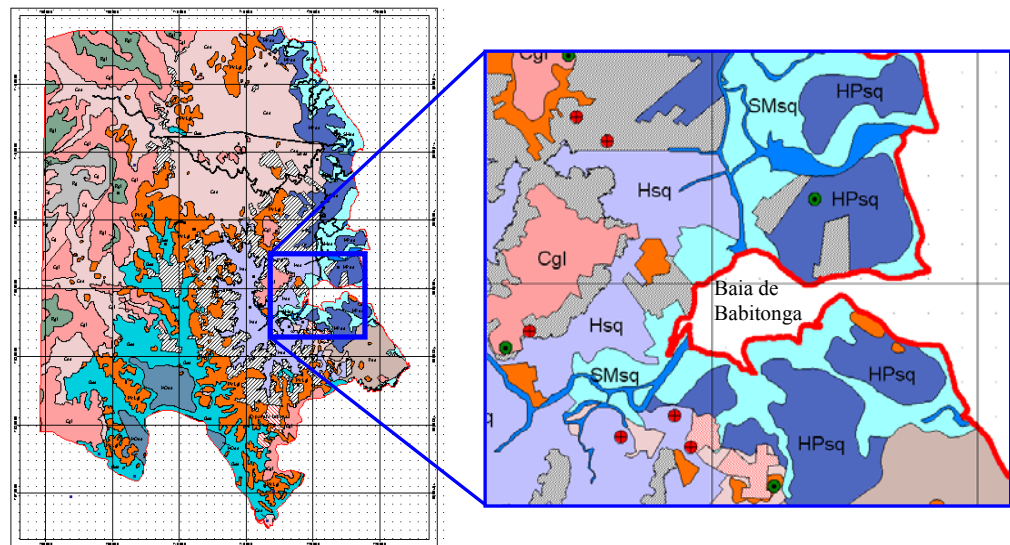
**Figura 3.1 – Mapa Geotécnico de Florianópolis com a localização das amostras extraídas do aterro da Via Expressa Sul (Santos, 1997)**

Segundo Santos (1997), os Solos de Mangue são considerados mais como tipo de terreno do que como classe de solo. São predominantemente halomórficos (salinos), alagados, ocorrendo nas partes baixas do litoral que se localizam nas proximidades da desembocadura dos rios, nas reentrâncias da costa e margens das lagoas, diretamente



influenciados pelo movimento das marés. Suas principais características geotécnicas são: solos impermeáveis, hidromórficos, lençol freático próximo à superfície, sem capacidade de suporte, representada pelo índice de resistência à penetração próximo de zero.

O solo vindo do município de Joinville pertence também à unidade geotécnica classificada como Solo de Mangue com substrato sedimentos quaternários (SMsq), segundo o mapa geotécnico elaborado por França Júnior (2002), como mostra a figura 3.2.



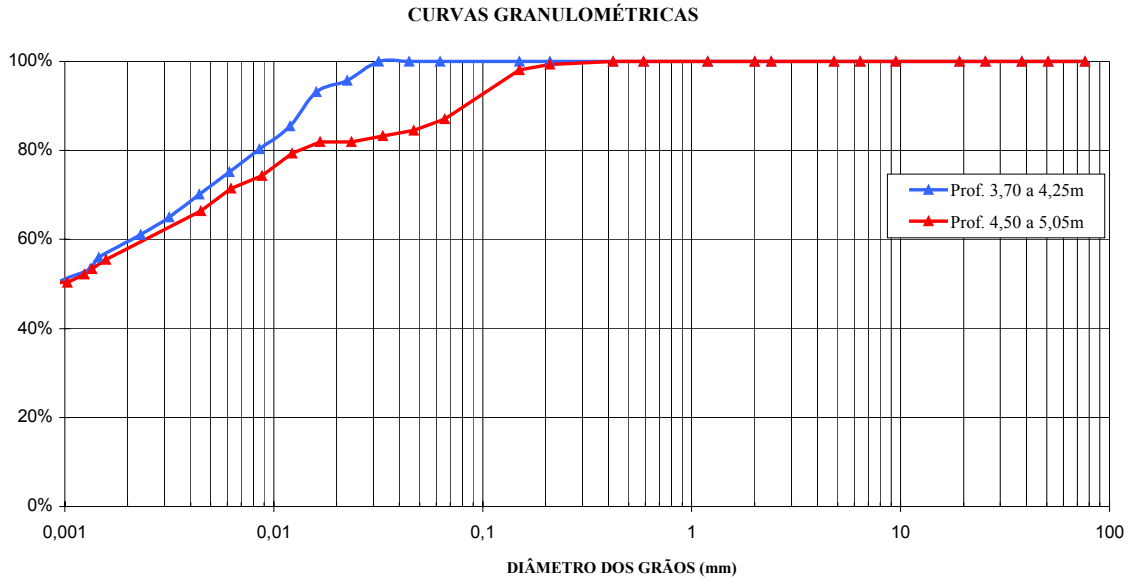
**Figura 3.2 – Mapa Geotécnico da área urbana de Joinville com a localização das amostras extraídas (França Júnior, 2002)**

### 3.4 Ensaios de Caracterização

O programa de ensaios de caracterização consistiu na análise granulométrica e na determinação dos Limites de Atterberg.

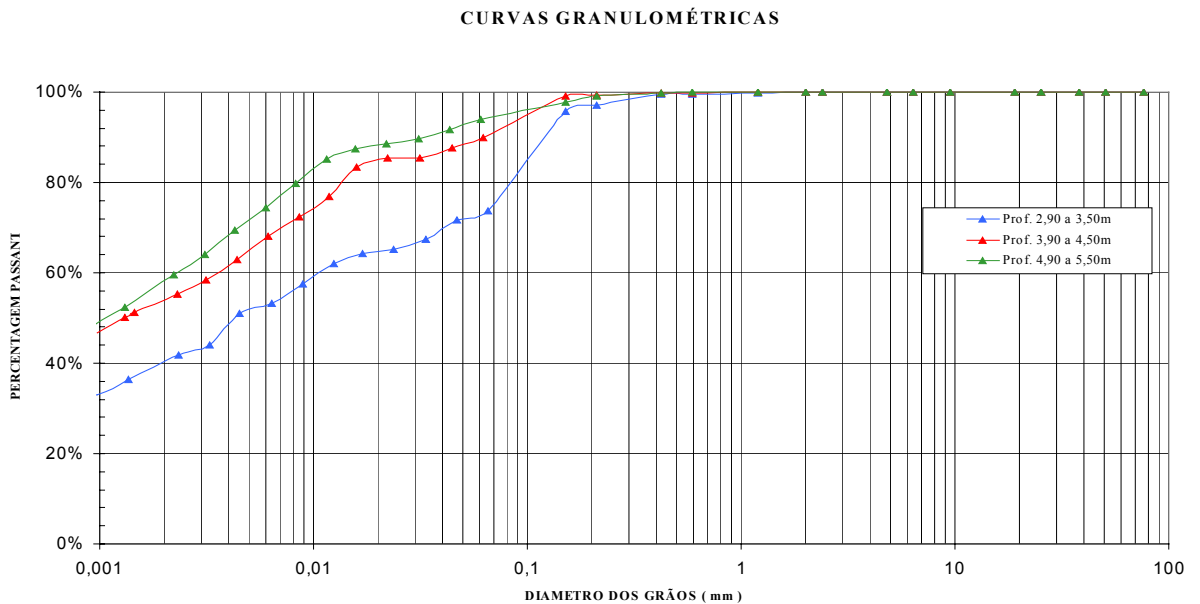
#### 3.4.1 Análise Granulométrica

Foi realizada a análise granulométrica por sedimentação e peneiramento do solo ensaiado, usando como defloculante o hexametáfosfato de sódio, segundo o método da NBR 7181/84. A figura 3.3 mostra as curvas granulométricas obtidas para os solos de Florianópolis em função da profundidade.



**Figura 3.3 – Curvas Granulométricas dos solos de Florianópolis**

Através da análise das curvas granulométricas, para os solos de Florianópolis, pode-se observar que mais de 90% dos grãos são constituídos de silte e argila. Já para os solos de Joinville essa porcentagem fica, em média, em 95%, baseado nas curvas mostradas na figura 3.4.



**Figura 3.4 – Curvas Granulométricas dos solos de Joinville**

A tabela 3.1 mostra cada uma das frações granulométricas extraídas das curvas obtidas para os solos de Florianópolis e Joinville.

**Tabela 3.1 – Distribuição Granulométrica**

Local	Prof. (m)	Sondagem	(%)			
			Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
Florianópolis	3,70 a 4,25	I-04	-	8,13	32,65	59,22
Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04	-	6,18	36,76	57,06
Joinville	2,90 a 3,50	SH-T-19	2,90	11,35	45,81	39,94
Joinville	3,90 a 4,50	SH-T-07	0,68	4,20	41,34	53,78
Joinville	4,90 a 5,50	SH-T-12	0,94	1,21	39,98	57,87

Baseado na classificação HRB (*Highway Research Board*), que classifica os solos visando ao seu emprego para fins rodoviários, estes solos são classificados como A-7-5, ou seja, são solos argilosos com mau desempenho como subleito. Pela classificação unificada (USCS), os solos são classificados como OH, ou seja, argilas orgânicas de média a alta plasticidade. Por fim, com base na classificação trilinear, que considera somente a granulometria, os solos são classificados, simplesmente, como argila.

### 3.4.2 Propriedades Físicas

Os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP) do material de estudo foram determinados de acordo com a ABNT (NBR 6459/84 e NBR 7180/84, respectivamente). Os valores do peso específico aparente na umidade natural foram obtidos de corpos de prova preparados para a realização de ensaios de adensamento convencionais. Essas propriedades físicas são apresentadas na tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Propriedades físicas do material ensaiado**

Local	Prof. (m)	Sondagem	Peso Esp. Natural (kN/m <sup>3</sup> )	(%)			
				LL	LP	IP	w <sub>nat</sub>
Florianópolis	3,70 a 4,25	I-04	13,99	106	34	72	145,2
Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04	14,00	100	33	67	147,5
Joinville	2,90 a 3,50	SH-T-19	15,60	61	33	28	92,4
Joinville	3,90 a 4,50	SH-T-07	15,58	64	30	34	86,7
Joinville	4,90 a 5,50	SH-T-12	15,83	81	37	44	87,7

Observa-se que o limite de liquidez (LL), para os solos de Florianópolis, apresentou valores de 100% e 106% para as profundidades de 4,50 a 5,05 m e 3,70 a

4,25 m, respectivamente, com um teor de umidade de 145,2% e 147,5%. Da mesma forma, o índice de plasticidade (IP) verificado foi de 67% e 72%.

Já para os solos de Joinville, os resultados, tanto de LL como de IP, foram inferiores em relação aos de Florianópolis, apresentando valores de LL variando de 61% a 81% e IP na faixa de 28% a 44%. O teor de umidade natural encontrou-se na faixa de 86,7% a 92,4%.

Os valores de  $\gamma_{\text{nat}}$  para os solos de Florianópolis foram praticamente iguais (13,99 kN/m<sup>3</sup> e 14 kN/m<sup>3</sup>). Para os solos de Joinville os valores de  $\gamma_{\text{nat}}$  encontraram-se entre 15,58 kN/m<sup>3</sup> e 15,83 kN/m<sup>3</sup>.

Os valores do grau de saturação (S) de todas as amostras encontraram-se, praticamente, muito próximos a 100%. Devido a essa similaridade de valores, não foram inclusos na tabela 3.2.

## 4 METODOLOGIA

O objetivo desse capítulo é apresentar a metodologia empregada para a realização dos ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação - CRS, desde a montagem do equipamento, desenvolvimento do *software* de aquisição e processamento dos dados e de seu funcionamento propriamente dito.

### 4.1 Apresentação do Equipamento

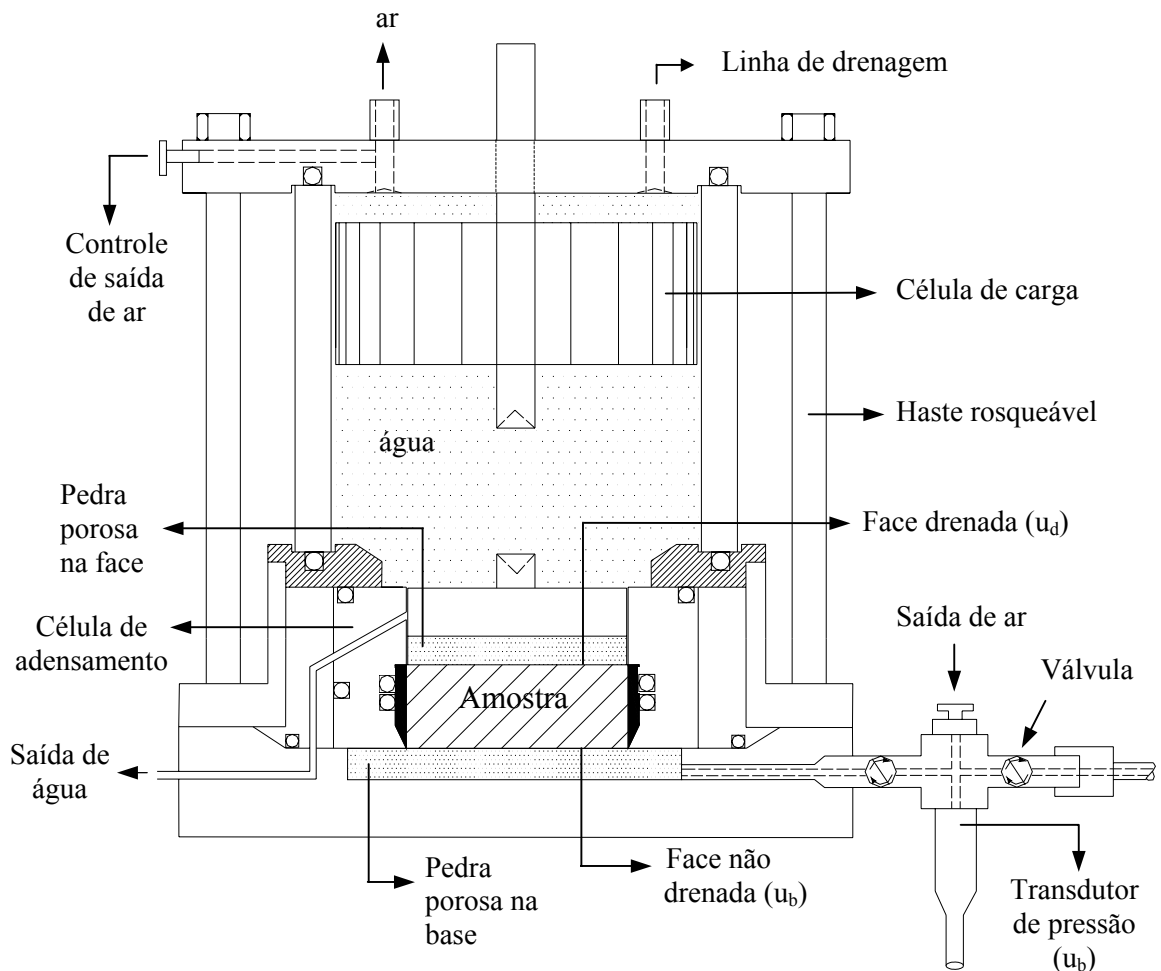
O equipamento utilizado foi montado e adaptado no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC exclusivamente para a realização de ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação. A figura 4.1 mostra uma visão geral do equipamento.



**Figura 4.1 – Vista geral do equipamento**

Este equipamento consta basicamente de uma prensa universal de deformação controlada, fabricada pela *Wykeham Farrance Engineering LTD.*, (*5 ton Compression Machine*) e da câmara de ensaio. Esta é formada pela combinação de uma célula de adensamento na base e por uma câmara triaxial (cilindro acrílico e topo). A célula de carga utilizada é a mesma comumente usada para a realização de ensaios triaxiais. Além desses elementos, compõem o equipamento um sistema de válvulas, que controlam a água vinda do reservatório conectada à linha de drenagem, e um sistema de potes de mercúrio, conforme descrito por Bishop e Henkel, (1962) para aplicação de contrapressão constante.

Um perfil da seção transversal do equipamento com seus componentes foi esquematizado para uma melhor visualização, mostrado na figura 4.2.

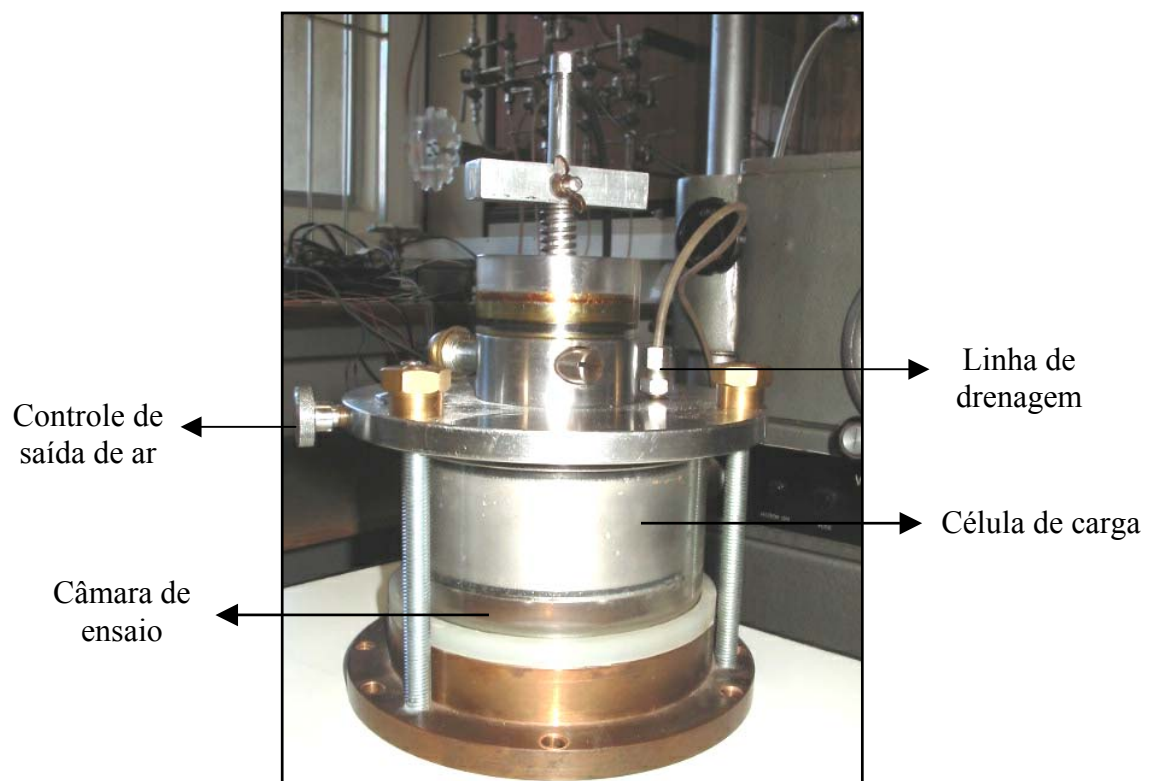


**Figura 4.2 – Perfil esquemático do equipamento utilizado para a realização dos ensaios CRS**

#### 4.1.1 Célula de Carga e Câmara de Ensaio

Na parte superior do equipamento, encontra-se a câmara de ensaio, que é semelhante às usadas em ensaios triaxiais, com uma célula de carga interna. Essa câmara é composta de uma tampa superior com um furo central, um colar inferior preso à tampa por três barras rosqueadas e, entre as duas peças, um cilindro acrílico transparente que permite a visualização interna. No topo da câmara, há um suspiro para controle da saída de ar e uma conexão da linha de drenagem para preenchimento com água.

A célula de carga utilizada possui capacidade de carga de 1000 N (100 kg). Essa célula é instrumentada com extensômetros elétricos resistivos (*strain gages*). Uma célula de carga similar à utilizada nesse trabalho foi descrita por Head (1986). O sistema de aplicação de carga vertical consiste em deslocar-se a câmara de ensaio, a qual contém o corpo de prova, contra a célula de carga fixa na tampa superior a uma velocidade de deformação constante aplicada pela prensa universal. A figura 4.3 mostra uma visão geral da câmara de ensaio juntamente com a célula de carga.



**Figura 4.3 – Câmara de ensaio e célula de carga**

#### 4.1.2 Célula de Adensamento

A célula de adensamento encontra-se na base da câmara de ensaio. Esses dois componentes são conectados entre si por meio de seis parafusos.

O anel tem diâmetro de 70 mm e altura de 20 mm, apresentando uma área de  $38,50 \text{ cm}^2$ , sendo que uma das suas faces é biselada para facilitar a moldagem do corpo de prova. A figura 4.4 mostra a célula de adensamento juntamente com o corpo de prova.



**Figura 4.4 – Vista superior e frontal da célula de adensamento juntamente com o corpo de prova**

O isolamento da poro pressão do topo com a base do corpo de prova se dá através de vários anéis de borracha. Desta maneira, a pressão do topo (face drenada) permanece constante, variando somente a pressão na base (face não drenada) que é lida pelo transdutor de pressão.

No topo do corpo de prova, é colocada uma placa de carga com uma pedra porosa que fica em contato direto com ele. No centro da superfície superior dessa placa de carga, encontra-se uma esfera metálica que tem como objetivo funcionar como rótula, proporcionando a distribuição uniforme de pressão em todo o corpo de prova.

Subjacente à célula de adensamento, encontra-se uma pedra porosa incrustada na superfície da base (figura 4.5) que se apoia sobre um suporte metálico.

Nessa parte inferior, onde se apoia a célula de adensamento, há um sistema de canais nos quais estão conectados dois componentes: uma válvula para o escoamento da água da câmara de ensaio e o transdutor de poro pressão (válvula vermelha).





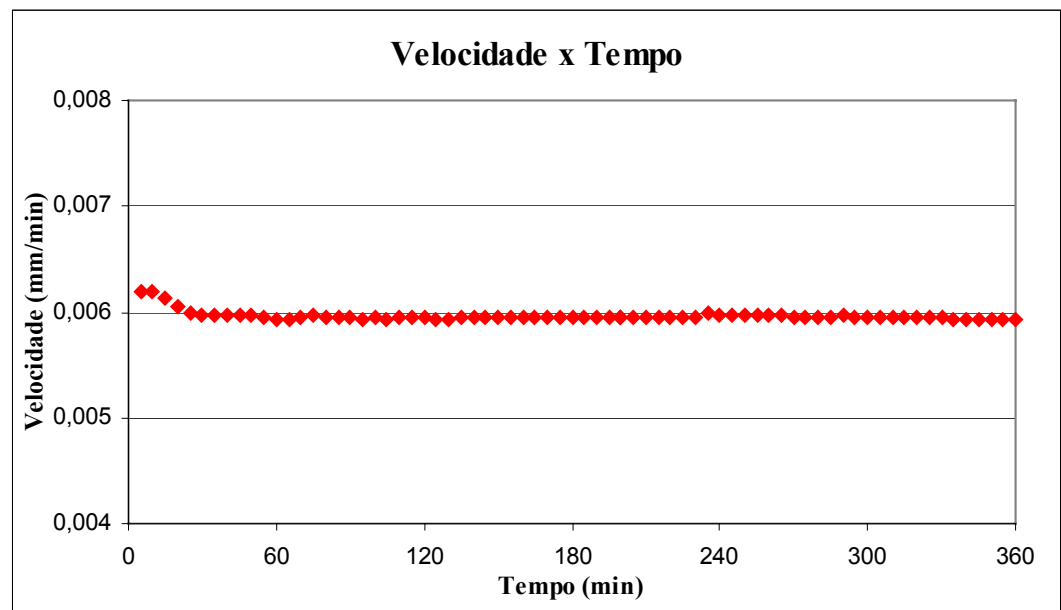
**Figura 4.5 – Pedra porosa incrustada na superfície da base**

#### **4.2 Velocidade de Deformação**

A prensa universal de deformação controlada conta com um sistema de engrenagens através do qual uma combinação delas determina a velocidade a ser utilizada no ensaio.

No total, podem ser utilizadas 30 velocidades diferentes que variam de 0,0006 a 7,60 mm/min.

Para a verificação da acurácia da velocidade de deformação aplicada pela prensa, foi realizado um teste com duração de 360 minutos. Para isso, foi utilizado um extensômetro analógico de grande precisão (0,001 mm). As leituras de deformação foram verificadas manualmente quando aplicada uma velocidade nominal de 0,006 mm/min. Os resultados mostraram um bom comportamento na geração da velocidade aplicada pela prensa, mostrando que a velocidade nominal descrita no equipamento foi equivalente às obtidas no teste de verificação, como ilustra a figura 4.6.



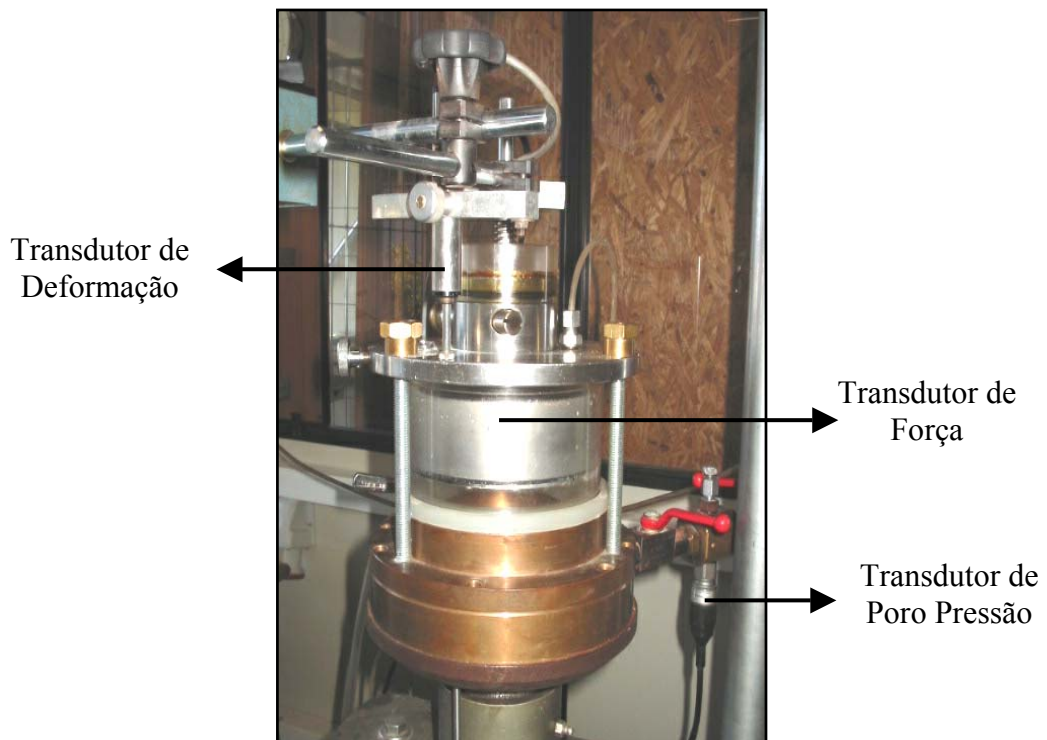
**Figura 4.6 - Verificação da velocidade aplicada pela prensa**

Pode-se observar pelo gráfico da figura 4.6 que a variação ocorrida foi pequena, quando verificada a velocidade da prensa, sendo praticamente constante. Os valores iniciais apresentaram uma pequena dispersão devido à sensibilidade do extensômetro, podendo ser desconsiderados.

### 4.3 Instrumentação

Para as medições e aquisições das grandezas necessárias obtidas no ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação, foram utilizados três transdutores elétricos: transdutor de força, de poro pressão e de deformação. Esse último é um transdutor da marca Sodmex tipo HPI – 2310 e apresenta um curso linear de 25 mm. O transdutor de poro pressão empregado foi produzido pela *Wykeham Farrance Engineering LTD.*, modelo HS 25. A figura 4.7 mostra uma visão geral dos três transdutores elétricos.

A calibração é um procedimento fundamental para o uso dos instrumentos, devendo ser cuidadosamente realizada para ter-se confiança nos resultados obtidos dos ensaios. Para a calibração desses transdutores, foi utilizado o *software* de aquisição e processamento automático dos dados.

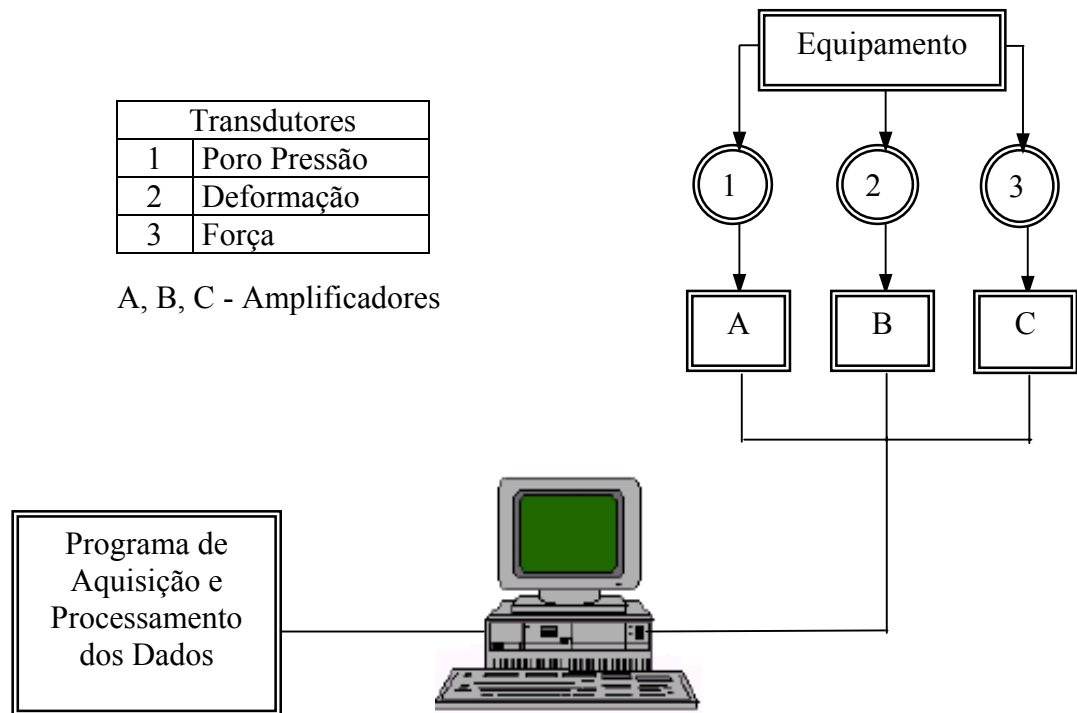


**Figura 4.7 – Vista dos transdutores**

#### **4.4 Desenvolvimento do *Software* e Sistema Automático de Aquisição de Dados**

Como o ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação é um ensaio totalmente automatizado, houve a necessidade de desenvolver um programa dedicado somente ao experimento em questão. Logo, o monitoramento e a aquisição automática dos dados gerados nos ensaios realizados nesse trabalho foram feitos através de um *software* no qual fez-se uso da linguagem *Visual Basic*. Esse *software* foi desenvolvido com o intuito de comandar e controlar as leituras de três canais (provenientes de três transdutores) em intervalos de tempo previamente fixados.

A aquisição automática dos dados permite a realização de ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação sem a presença de um operador, exceto para iniciar e interromper o ensaio. A figura 4.8 mostra um perfil esquemático desse sistema automático de aquisição dos dados.



**Figura 4.8 – Sistema automático de aquisição dos dados no ensaio CRS**

#### 4.4.1 Funcionamento do *Software*

Para o início do ensaio é necessário lançar no programa os dados necessários para o cálculo dos parâmetros de adensamento. Esses dados são: altura inicial, área, volume e peso do corpo de prova, densidade real dos grãos, teor de umidade, velocidade que será adotada no ensaio, além dos dados referentes à origem da amostra como: profundidade, data e local. A figura 4.9 ilustra esse procedimento.

Amostra:		Teor Umidade	
Altura inicial [mm]:	20,0	Caps Nro.:	10
Area Inicial [cm2]:	38,50	Peso Caps.[g]:	21,90
Vol Inicial [cm3]:	77,00	Caps+Solo Umid.[g]:	159,7
Velocid. [mm/min]:	0,0060	Caps+Solo Seco[g]:	98,6
Peso Amostra [g]:	119,8	Teor Umidade [%]:	79,7
Dens. Amost[kN/m3]:	26,5000		
Profundidade [m]:	3,9		
Data:	2/10/03	Local:	Joinville
Obra:	Disserta		

**Figura 4.9 – Dados iniciais lançados no programa**

O monitoramento das leituras dos três transdutores é muito importante, antes de dar início ao ensaio, por duas razões: (a) detectar a ocorrência de alguma dispersão muito grande que possa vir a afetar a acurácia dos resultados dos parâmetros de ensaio, (b) verificar alguma eventual falha no sistema elétrico do equipamento. A figura 4.10 mostra esse monitoramento inicial das leituras dos transdutores.

Carga [N]	0,15
Pressão Neutra [kPa]	92,53
Altura[mm]	2,37

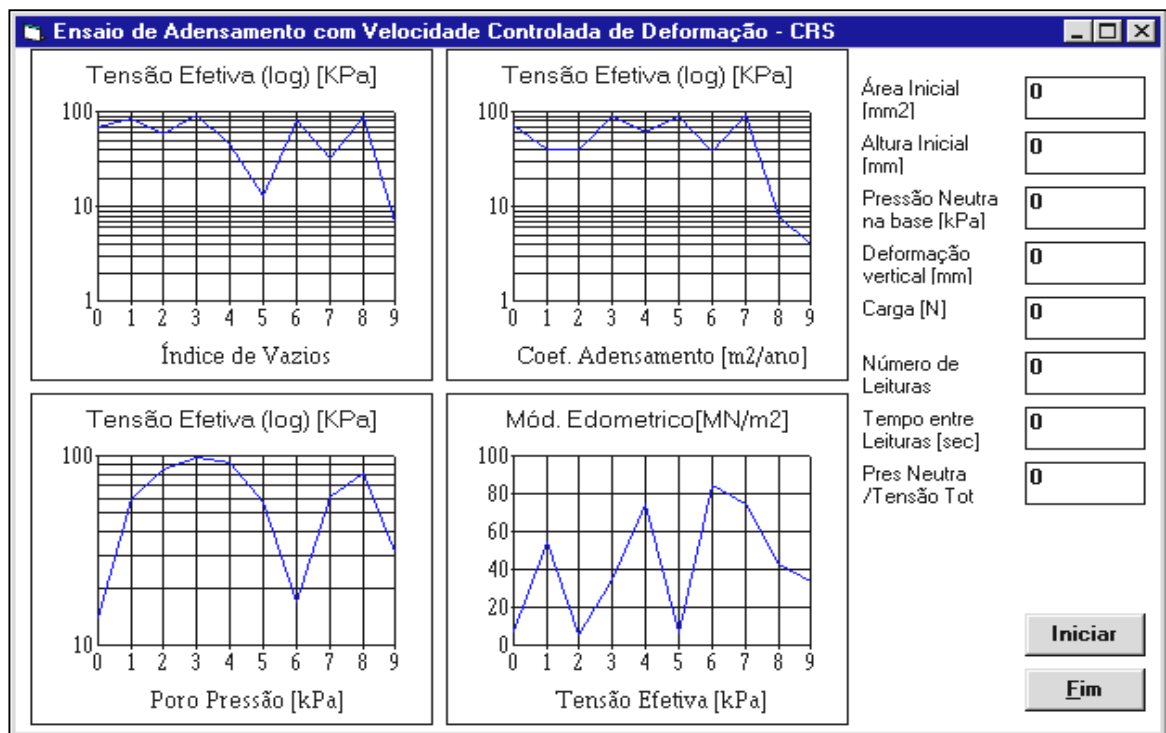
**Figura 4.10 – Monitoramento inicial das leituras dos três transdutores**

O valor da contrapressão aplicada para a saturação do corpo de prova é descontado automaticamente pelo programa para que os valores lidos pelo transdutor de

pressão, durante o andamento do ensaio, sejam somente os correspondentes ao do excesso de poro pressão gerado na base do corpo de prova quando iniciada a aplicação da sobrecarga.

Uma vez que o ensaio é começado, o *software* permite fixar o intervalo de tempo entre as leituras, acompanhando o número total dessas leituras como: deformação vertical do corpo de prova, poro pressão na base e a carga que está sendo aplicada ao longo do ensaio e os valores da relação  $u_b/\sigma_v$ . O *software* não só monitora os dados, mas também calcula os parâmetros de ensaio como  $C_v$ ,  $D$ ,  $e$ ,  $\sigma'_v$ , etc.

À medida que são feitas as leituras dos transdutores, os gráficos “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”, “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” e “ $D \times \sigma'_v$ ” são, simultaneamente, plotados e projetados na tela, permitindo que o usuário tenha uma avaliação completa e atualizada do comportamento do adensamento no decorrer de todo o ensaio, ilustrado na figura 4.11. Os gráficos mostrados na figura 4.11 não são das curvas representativas obtidas no ensaio. Essa tela é gerada antes do início de cada ensaio.



**Figura 4.11 – Gráficos plotados simultaneamente no decorrer do ensaio após cada leitura**

Todos os dados adquiridos durante a realização do ensaio são armazenados para, se necessário, serem tratados e verificados posteriormente.

## **4.5 Ensaio Preliminares**

Alguns ensaios preliminares foram realizados com o propósito de verificar possíveis problemas apresentados durante o andamento dos ensaios, como alguma falha mecânica no equipamento, como também na sua parte elétrica e no *software* de aquisição e processamento dos dados.

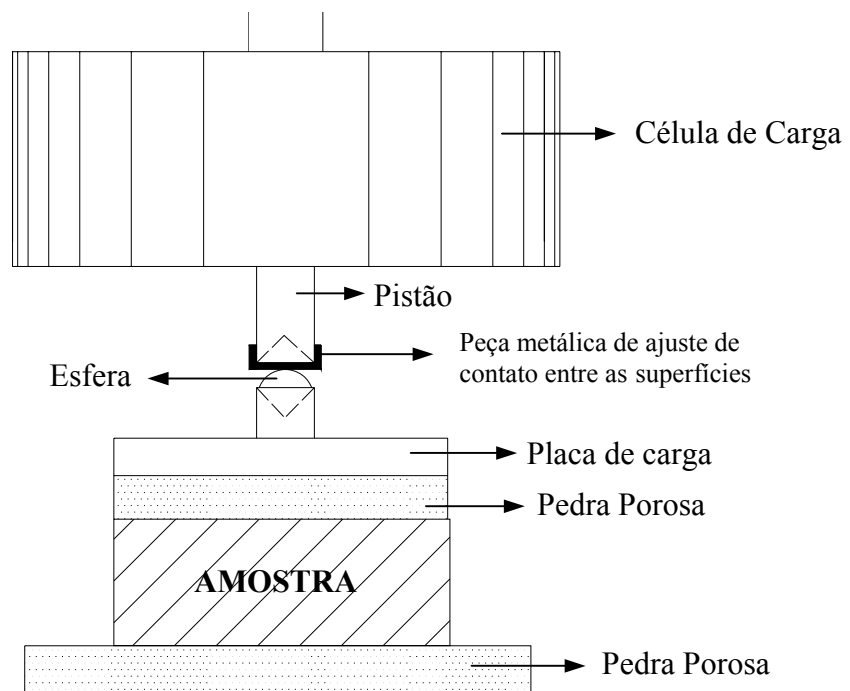
### **4.5.1 Problemas Verificados**

A partir dos ensaios iniciais preliminares, conforme já esperado, foram verificados alguns problemas que, ao longo das experimentações, foram solucionados realizando-se os aperfeiçoamentos necessários, até atingir-se um método definitivo de ensaio, além de obter parâmetros de adensamento confiáveis e curvas representativas do material ensaiado. Dentre os principais problemas encontrados, vale salientar os mais significativos, relatados nos itens subsequentes.

#### **4.5.1.1 Assentamento do Pistão com a Placa de Carga**

Quando era montada a câmara de ensaio, o pistão da célula de carga não se alinhava perfeitamente com o topo da placa de carga que fica em contato com a superfície do corpo de prova. Dessa forma, quando se iniciava a aplicação de sobrecarga não havia uma distribuição uniforme de pressão em toda a amostra. Outra dificuldade encontrada foi a respeito do contato do pistão com a esfera que se encontra na placa de carga. Esse contato era feito através de encaixe, o que causava muita dúvida quanto ao exato momento em que ocorreria o encaixe perfeito desse dois componentes, devido a difícil visualização, logo o início físico propriamente dito do ensaio e das deformações reais que estariam ocorrendo no corpo de prova não seria preciso.

A solução encontrada foi colocar uma peça na extremidade do pistão que evitasse esse encaixe (figura 4.12). Através dessa técnica, evitaram-se também os problemas de desalinhamento entre as superfícies de contato.



**Figura 4.12 – Modificação realizada no terminal do pistão**

#### 4.5.1.2 Vedação do Corpo de Prova

A vedação total do topo com a base do corpo de prova inicialmente se dava através de apenas um anel de borracha para que a poro pressão do topo (face drenada) permanecesse constante, variando somente o excesso de poro pressão gerado na base (face não drenada). Esse anel de borracha não estava desempenhando bem essa função, logo, a poro pressão no topo era igual a da base, o que não pode ocorrer durante o ensaio.

Para solucionar esse problema, foi colocado outro anel de borracha de vedação entre a célula e o anel de adensamento (modificação efetuada na oficina mecânica da UFSC), apresentando bom desempenho nos ensaios seguintes.

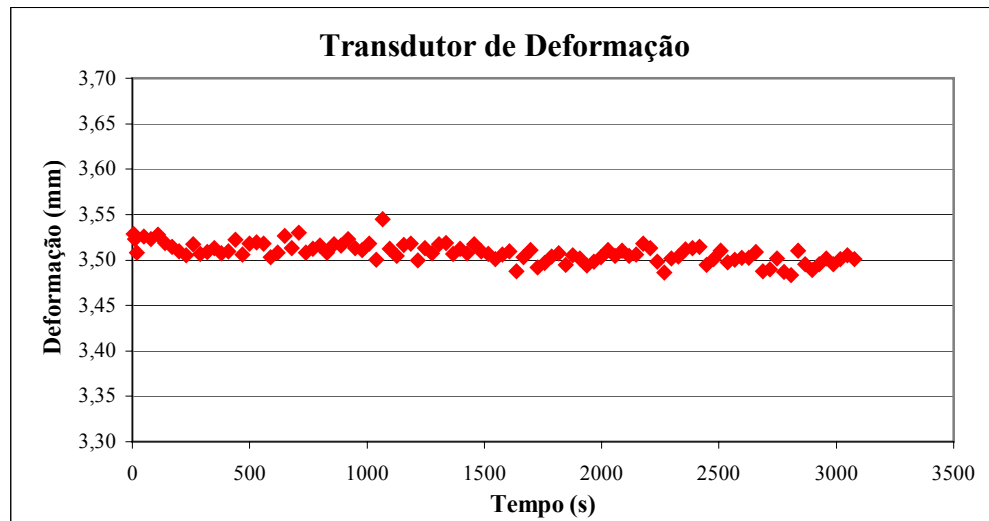
#### 4.5.1.3 Dispersões nas Leituras dos Transdutores

O maior problema detectado durante os ensaios preliminares foi a ocorrência de dispersões muito altas nas leituras dos três transdutores, afetando diretamente as reais grandezas dos parâmetros obtidos no ensaio.



### a) Transdutor de Deformação

Para achar a possível causa da ocorrência dessas dispersões, foi trocado o transdutor de deformação com seu respectivo amplificador. A partir desse experimento, as dispersões diminuíram consideravelmente. A figura 4.13 mostra a dispersão nas leituras do transdutor de deformação através desse procedimento.

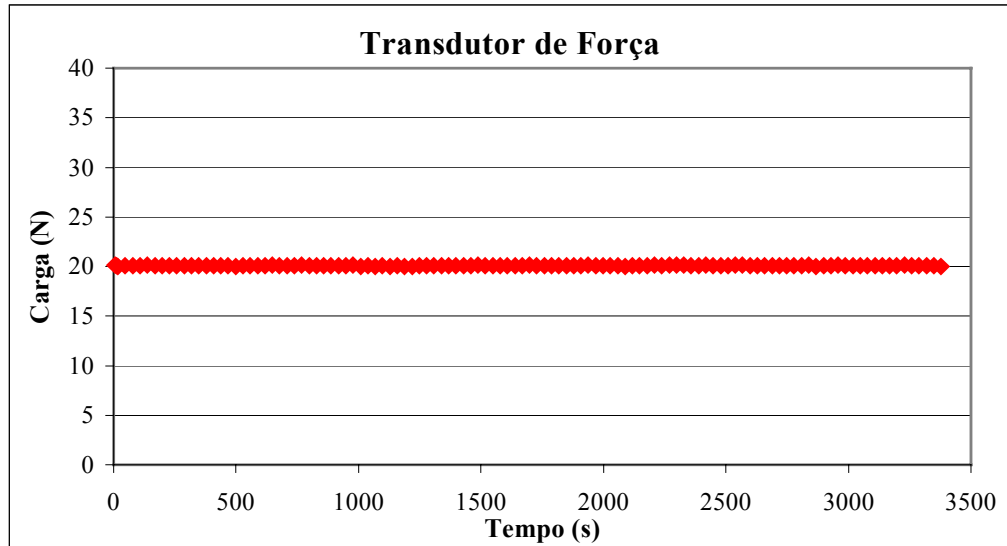


**Figura 4.13 – Dispersão verificada com a troca do amplificador e do transdutor de deformação**

A dispersão apresentada antes da troca era de 0,20 mm, sendo que, quando se utilizou o segundo transdutor com outro amplificador, a dispersão caiu para, aproximadamente, 0,03 mm, que para um curso linear de 25 mm representa, 0,12%, podendo-se considerar uma dispersão pequena e aceitável.

### b) Transdutor de Força

A maior dispersão encontrada nos ensaios foi verificada no transdutor de força, que apresentou uma variação de 40 N (4 kg), com alguns pontos ultrapassando esse valor, o que é considerada uma variação muito alta. Através de um teste realizado com a célula de carga, observou-se o pleno funcionamento desta, verificando-se, portanto, uma possível falha no amplificador. Em um dos ensaios realizados, esse equipamento simplesmente não respondeu a nenhum sinal do transdutor, o que comprovou a sua total falta de eficiência e aplicabilidade. A dispersão apresentada nas leituras do transdutor de deformação após a troca do amplificador é mostrada na figura 4.14.

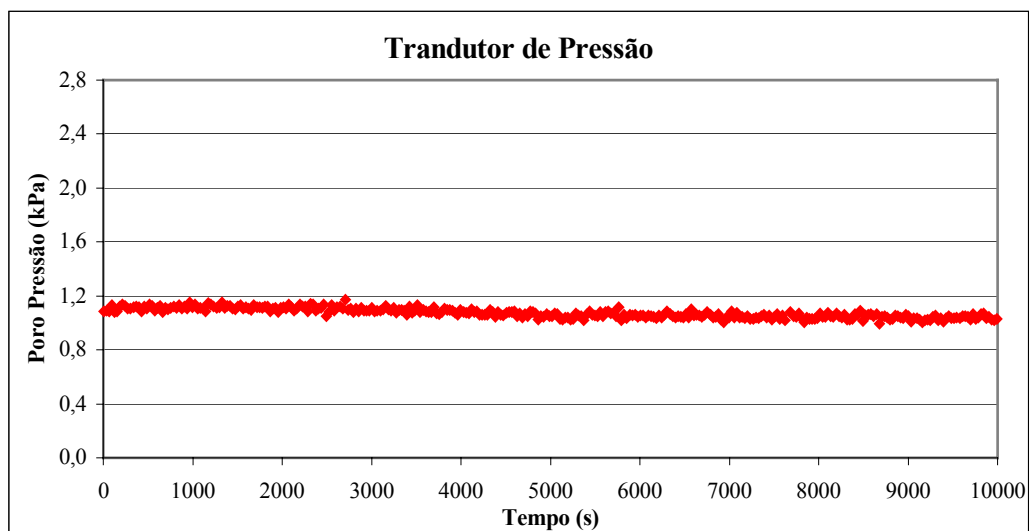


**Figura 4.14 – Dispersão verificada no transdutor de força depois da troca do amplificador**

Após realizar a troca do amplificador do transdutor de força, a dispersão caiu para 1 N (0,1 kg), que corresponde, para uma escala de trabalho da célula de carga de zero a 1000 N, a uma dispersão de 0,1%.

### c) Transdutor de Pressão

Quanto ao transdutor de pressão, primeiramente, este apresentou uma dispersão de cerca de 3 kPa, o que é, uma dispersão muito alta para a obtenção de resultados confiáveis. Posteriormente, para a realização dos ensaios finais e definitivos (capítulo 5), disponibilizou-se de um transdutor de pressão com dispersões bem mais baixas e aceitáveis, como mostra a figura 4.15.



**Figura 4.15 – Dispersão verificada no transdutor de pressão utilizado nos ensaios finais**

Através da figura 4.15, verifica-se que, após a troca do instrumento, foi observada uma redução bastante significativa na dispersão, caindo para variações que se encontraram na faixa de 0,20 kPa.

A utilização de um transdutor de pressão eficaz, com baixas dispersões é essencial para a realização de ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação. Dispersões muito altas afetam diretamente a obtenção dos parâmetros de ensaio, principalmente os coeficientes de adensamento. Esse tópico será apresentado e discutido no capítulo 5.

#### **4.6 Funcionamento do Equipamento e Procedimentos de Ensaio**

Nesse item, serão apresentadas, de maneira sucinta, as etapas de execução adotadas para o ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação para um melhor entendimento dos procedimentos práticos de realização desse ensaio.

As etapas que compõem os procedimentos de execução do ensaio são divididas em três fases: preparação e montagem do equipamento, procedimentos iniciais para o início do ensaio e seu início propriamente dito.

##### **4.6.1 Preparação e Montagem do Equipamento**

Nesse subitem, são descritas as etapas de preparação e montagem do equipamento desde a preparação do corpo de prova, sua colocação na célula de adensamento e montagem da câmara de ensaio.

##### **a) Preparação do Corpo de Prova**

Os procedimentos de preparação do corpo de prova são semelhantes aos utilizados para realização de ensaios de adensamentos convencionais.

A amostra é extraída do tubo shelby, utilizando-se um extrator vertical, seguindo o mesmo sentido da amostragem em campo durante a extração. O anel com uma das faces biselada é cravado lentamente no trecho da amostra recém extraída. O solo em volta do anel é cuidadosamente removido com um fio de aço esticado. Em seguida, o corpo de prova é rasado e pesado e as sobras restantes da moldagem são utilizadas para determinação do teor de umidade do material.

### **b) Montagem do Corpo de Prova na Célula de Adensamento**

O anel contendo o corpo de prova é lubrificado externamente para que não se precise usar uma força maior no momento do encaixe desse com a célula de adensamento (minimizar o atrito molde – anel de borracha). É importante a verificação da ocorrência do encaixe perfeito para se ter certeza que os dois anéis de borracha existentes entre a parede interna da célula e o anel estejam realizando o isolamento total entre o topo e a base do corpo de prova. Recomenda-se que a face biselada do anel deva ficar voltada para a pedra porosa de topo.

A célula de adensamento é colocada sobre a superfície da base onde se encontra a pedra porosa incrustada, ficando em contato direto com a base do corpo de prova e, finalizando, coloca-se a placa de carga com a pedra porosa no topo desse corpo de prova.

### **c) Montagem da Câmara de Ensaio**

Para finalizar essa etapa de montagem do equipamento, é colocada a câmara de ensaio completando a montagem do sistema. Com o uso de uma chave de fenda, faz-se a ligação da câmara com a base do sistema (que se dá por meio de seis parafusos) fazendo tantas operações de aperto e afrouxamento quantas forem necessárias para evitar a ocorrência de possíveis vazamentos.

## **4.6.2 Procedimentos Iniciais para Execução do Ensaio**

Concluída a fase de preparação e montagem do equipamento será descrito nesse subitem o procedimento inicial para a execução do ensaio.

### **a) Preenchimento da Câmara de Ensaio com Água**

Para a execução dessa etapa, abrem-se as válvulas do sistema de drenagem para permitir o preenchimento da câmara de ensaio através da linha de drenagem no sentido topo-base. Durante esse processo, deixa-se o suspiro do topo sempre aberto. Quando o volume da câmara estiver totalmente preenchido, fecha-se esse suspiro. Em seguida, posiciona-se o transdutor de deformação.

## **b) Aplicação da Contrapressão**

O processo de aplicação da contrapressão, para que ocorra a total saturação da amostra (tempo de aplicação varia em, aproximadamente, 24 horas), é feito pelo sistema de pressão constante com potes de mercúrio. O valor aplicado é verificado por um manômetro e também pela leitura do transdutor de pressão. A contrapressão é mantida constante durante as fases subseqüentes do ensaio.

## **c) Determinação da Velocidade de Ensaio**

Determinando-se a velocidade de deformação que se utilizará no ensaio, deve-se ajustar as engrenagens correspondentes, verificando sempre se a combinação dessas engrenagens equivale à velocidade nominal a ser utilizada.

## **d) Software de Aquisição e Processamento dos Dados**

Através do *software* de aquisição e processamento automático de dados, são verificadas várias leituras dos três transdutores elétricos para detectar alguma possível falha do sistema. Os passos subseqüentes referentes ao *software* já foram descritos no item 4.4.1. A partir desse momento, o programa passa a controlar, monitorar e processar todos os dados referentes ao ensaio.

### **4.6.3 Início do Ensaio**

Para dar início ao ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação, algumas observações importantes devem ser levadas em consideração:

- através das manivelas de ajuste, fazer o ajuste grosso, levantando a câmara de ensaio e o ajuste fino fazendo o contato da bilha com a célula de carga;
- fechar a válvula de aplicação de contrapressão conectada à base para criar um único caminho de drenagem pelo topo do corpo de prova;
- manter a válvula da base sempre fechada;
- verificar se todos os dados iniciais do programa estão corretos;
- fazer as últimas verificações como: possíveis vazamentos, linha de drenagem, conexões, etc.

Tomando-se esses cuidados, aciona-se a prensa, dando início ao ensaio.

Ao finalizar o ensaio, desliga-se a prensa, e retira-se toda a água da câmara de ensaio. Desmonta-se a célula de adensamento, e limpa-se todas as peças.

#### 4.7 Ensaio de Adensamento Edométrico Convencionais para fins comparativos

Foram realizados cinco ensaios de adensamento edométrico convencionais em amostras indeformadas, seguindo os métodos de ensaios regidos pela ABNT (NBR 12007/ 90) para fins comparativos aos ensaios com velocidade controlada de deformação. Para um melhor entendimento, a tabela 4.1 mostra a nomenclatura de cada ensaio, assim como o local de origem e profundidade.

**Tabela 4.1 – Nomenclatura atribuída aos ensaios de adensamento convencionais**

<b>Ensaio</b>	<b>Origem</b>	<b>Profundidade (m)</b>	<b>Sondagem</b>
CONV1	Joinville	3,90 a 4,50	SH-T-07
CONV2	Joinville	2,90 a 4,50	SH-T-19
CONV3	Joinville	4,90 a 5,50	SH-T-12
CONV4	Florianópolis	3,70 a 4,25	I-04
CONV5	Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04

Os ensaios de adensamento convencionais foram realizados em prensas do tipo Bishop, como mostra a figura 4.16.



**Figura 4.16 - Ensaio de Adensamento Convencionais**

Os anéis metálicos utilizados para a moldagem dos corpos de prova tinham 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura. O material restante da moldagem dos corpos de

prova foi utilizado para a determinação da umidade natural. O incremento de carga utilizado para cada estágio era igual a carga anterior ( $\Delta p/p=1$ ).

Para os ensaios CONV 01, CONV 02, CONV 03, CONV 04 e CONV 05 foram aplicados e monitorados seis estágios de carregamentos verticais de 5 kPa, 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa, 80 kPa, 160 kPa, sendo cada estágio de carga mantido constante por 24 horas.

O monitoramento das deformações verticais, ao longo do tempo, foi feito através de extensômetros mecânicos com precisão de 0,01 mm.

## **5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação realizados utilizando a metodologia apresentada no capítulo 4. Para fins comparativos a esses resultados obtidos no novo equipamento, são apresentados também os dados provenientes dos ensaios de adensamento convencionais incrementais descritos no item 4.7.

### **5.1 Programa de Ensaios**

O programa de ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação contou, no total, com 9 ensaios. Desses 9 ensaios, os dois primeiros foram ainda experimentais, denominados Ensaios Exploratórios. Esses tiveram como objetivo a verificação final do funcionamento do novo equipamento, após vencidas as dificuldades encontradas, discutidas no capítulo 4. Tanto nessa última fase de ensaios experimentais como na fase final e definitiva, foram utilizados os solos descritos no capítulo 3.

#### **5.1.1 Ensaios Exploratórios**

Não havendo experiência anterior a respeito do ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, houve a necessidade da realização de alguns ensaios exploratórios. O objetivo desses ensaios foi verificar a tendência que as curvas de cada gráfico iriam seguir e se essas curvas seriam representativas do solo que estava sendo ensaiado. Outra decisão a ser tomada era a respeito das velocidades de deformação a serem adotadas, sendo que as únicas referências eram os trabalhos encontrados na literatura, porém não havia nenhuma bibliografia referente a esse ensaio com solos de Santa Catarina.

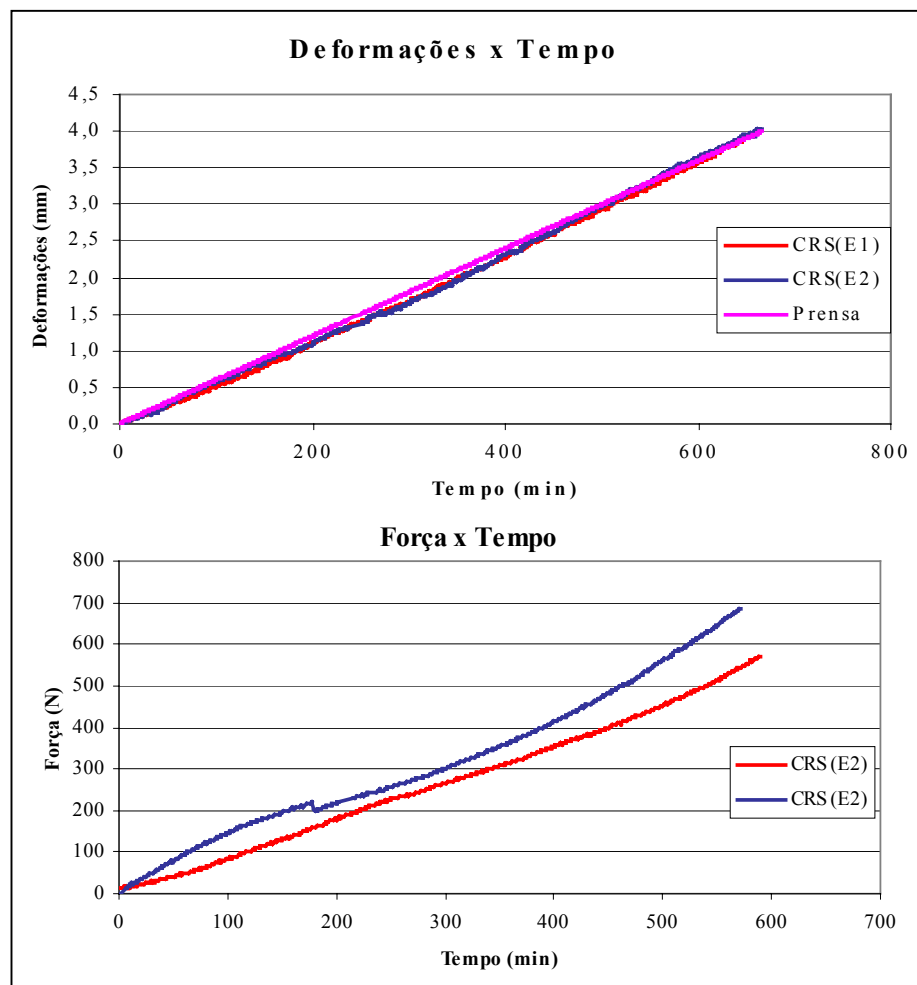
Foram realizados dois ensaios, denominados de CRS(E1) e CRS(E2). Para ambos foram utilizadas amostras do município de Joinville, da profundidade de 3,90 a 4,50m. Para a saturação do corpo de prova foi utilizada contrapressão de 100 kPa para os dois ensaios, que tiveram duração aproximada de 10 horas cada um, atingindo



deformações verticais específicas próximas de 20%, a uma velocidade de deformação de 0,006 mm/min.

### 5.1.1.2 Leitura dos Transdutores

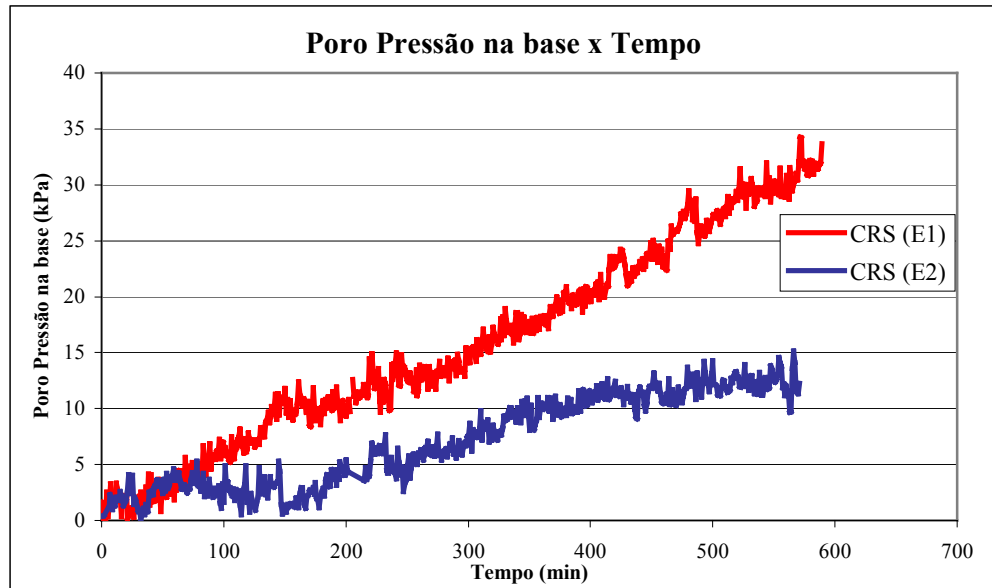
Conforme descrito e comentado no capítulo 4 (item 4.5.1.3), tanto o transdutor de força como o de deformação apresentaram, relativamente, baixas dispersões (0,1% o primeiro e 0,12% para o segundo). Através de uma análise gráfica das leituras desses transdutores ao longo do tempo durante todo o ensaio, pode-se comprovar essa situação, através da figura 5.1, por meio dos gráficos “Deformação x Tempo” e “Força x Tempo”. Estão plotados também no gráfico “Deformação x Tempo” os valores das deformações a uma velocidade constante de 0,006 mm/min, que é a velocidade nominal aplicada pela prensa utilizada nos dois ensaios.



**Figura 5.1 – Leitura dos transdutores de deslocamento e força ao longo dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)**

Pode-se perceber pelo gráfico “Deformação x Tempo” que as deformações verificadas nos dois ensaios foram semelhantes às deformações decorrentes da velocidade nominal da prensa.

Já o transdutor de poro pressão na base apresentou dispersões maiores em relação aos outros dois e, mesmo assim, apresentou curvas com tendências claras, como mostra a figura 5.2.

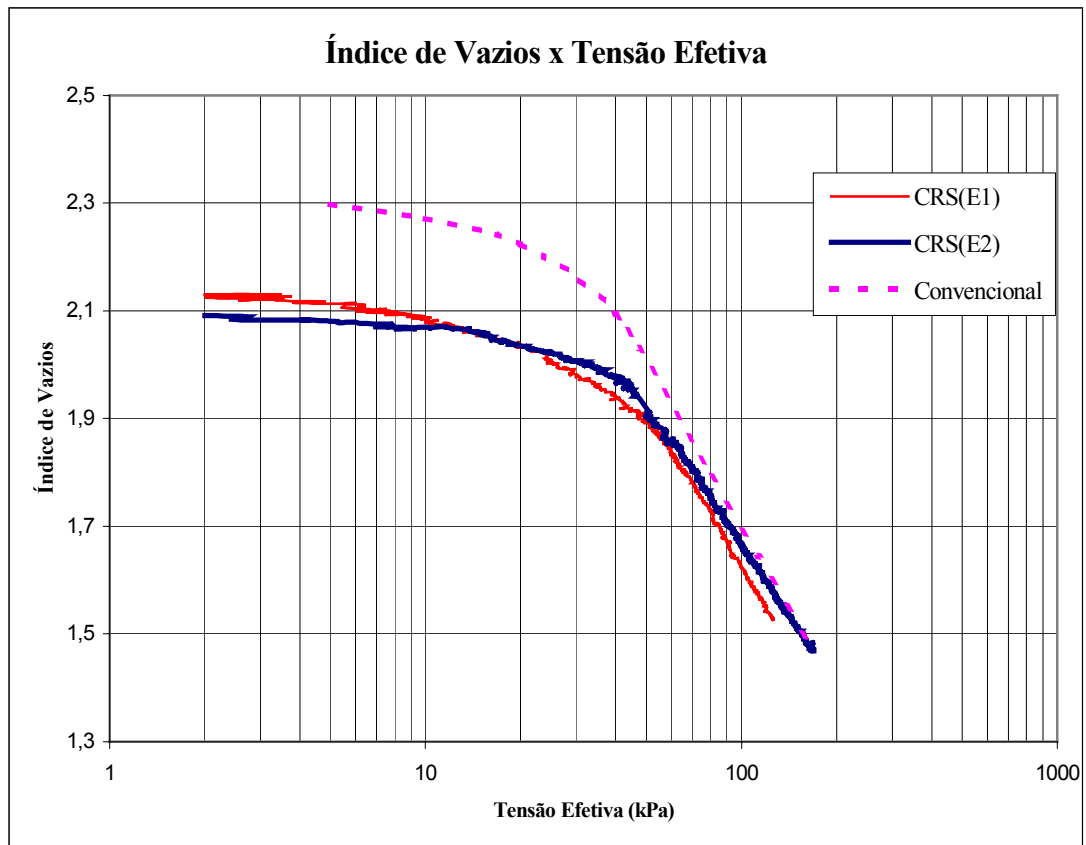


**Figura 5.2 - Leitura do transdutor poro pressão ao longo dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)**

As leituras do transdutor de pressão apresentadas na figura 5.2 são do primeiro transdutor utilizado, antes da troca desse instrumento comentado no item 4.5.1.3.

### 5.1.1.3 Curvas “ $e$ x $\sigma'_v$ (esc. log)”

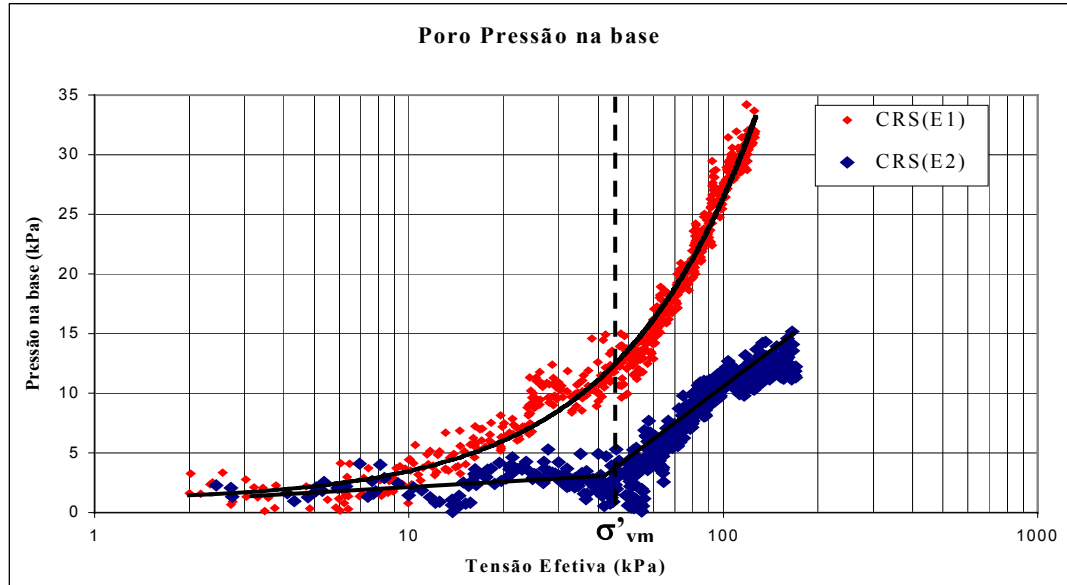
Os resultados dos ensaios exploratórios mostraram uma boa definição das curvas “ $e$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)”, como mostra a figura 5.3. Na mesma figura encontra-se a curva correspondente ao ensaio de adensamento convencional. Apesar da diferença do índice de vazios inicial dos ensaios CRS para o convencional, percebe-se uma convergência, especialmente, para tensões maiores que a tensão de pré-adensamento ( $\sigma'_{vm}$ ). Essa apresentou valores de 45 kPa para ambos os ensaios CRS. Já no ensaio convencional o valor de  $\sigma'_{vm}$  foi de 35 kPa.



**Figura 5.3 – Curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” dos ensaios CRS(E1) e CRS(E2) e do Convencional**

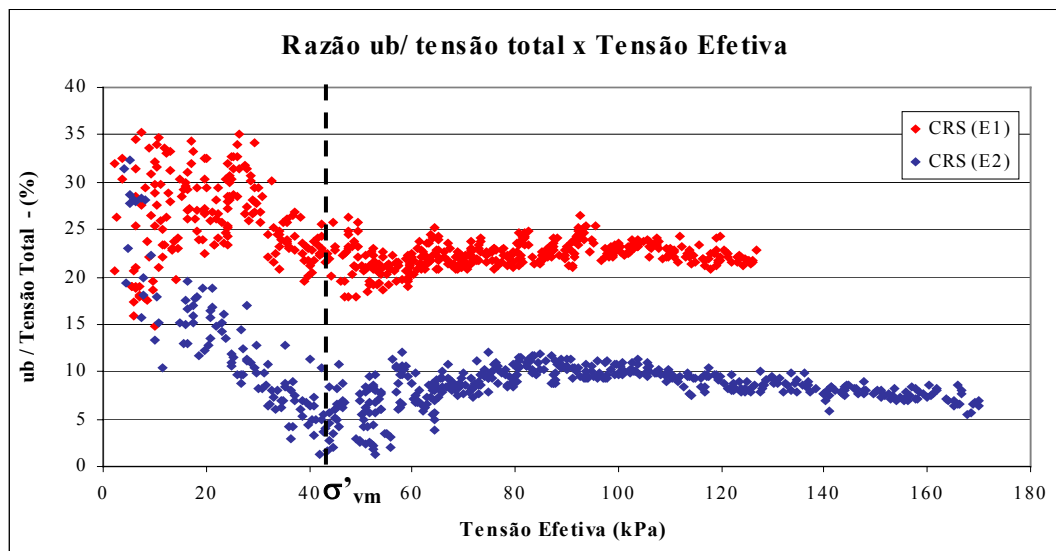
#### 5.1.1.4 Curvas “ $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log)”

A curva “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” do ensaio CRS(E1) mostrou uma curvatura mais suave, onde foram geradas poro pressões que alcançaram valores de 35 kPa final do ensaio. Já no ensaio CRS(E2), houve uma dissipação maior de poro pressão. A curva “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)”, para esse ensaio, demonstra uma maior ascendência ao nível de tensões efetivas próximo a tensão de pré-adensamento (45 kPa) ocorrendo um aumento gradual de pressão até a faixa de 15 kPa. A figura 5.4 ilustra essa situação juntamente com a linha de tendência gerada para as duas curvas mostrando uma definição clara de ambas.



**Figura 5.4 - Curvas “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2) e suas respectivas linhas de tendência**

Para ambos os ensaios a razão  $u_b / \sigma'_v$  alcançou valores máximos próximos a 35% no início dos ensaios. Para o ensaio CRS(E1), essa razão, em função do tempo, manteve-se, em média, na faixa de 20% a 25% quando ultrapassado um nível de tensões efetivas próximas de  $\sigma'_{vm}$ . Já para o ensaio CRS(E2), a partir do mesmo nível de tensões do anterior os valores mantiveram-se entre 8% e 10%, como mostra a figura 5.5.



**Figura 5.5 – Variação da razão  $u_b / \sigma'_v$  com  $\sigma'_v$  nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)**

Nos dois ensaios a dispersão apresentada antes de  $\sigma'_{vm}$  é bem mais acentuada que a dispersão apresentada para tensões na reta virgem.

### 5.1.1.5 Curvas “ $C_v \times \sigma'_v$ (esc. log)”

Os ensaios exploratórios mostraram curvas “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mal definidas, sem uma tendência clara, com valores bastante dispersos e altos para níveis de tensões efetivas mais baixos.

Para verificar a causa desse fato, buscou-se, através dos resultados obtidos nos ensaios exploratórios, analisar qual dos fatores (força, excesso de poro pressão na base ou deformação vertical) influenciavam, de maneira mais significativa, na ocorrência dessa dispersão, através da análise da equação que determina os valores de  $C_v$  para os ensaios CRS:

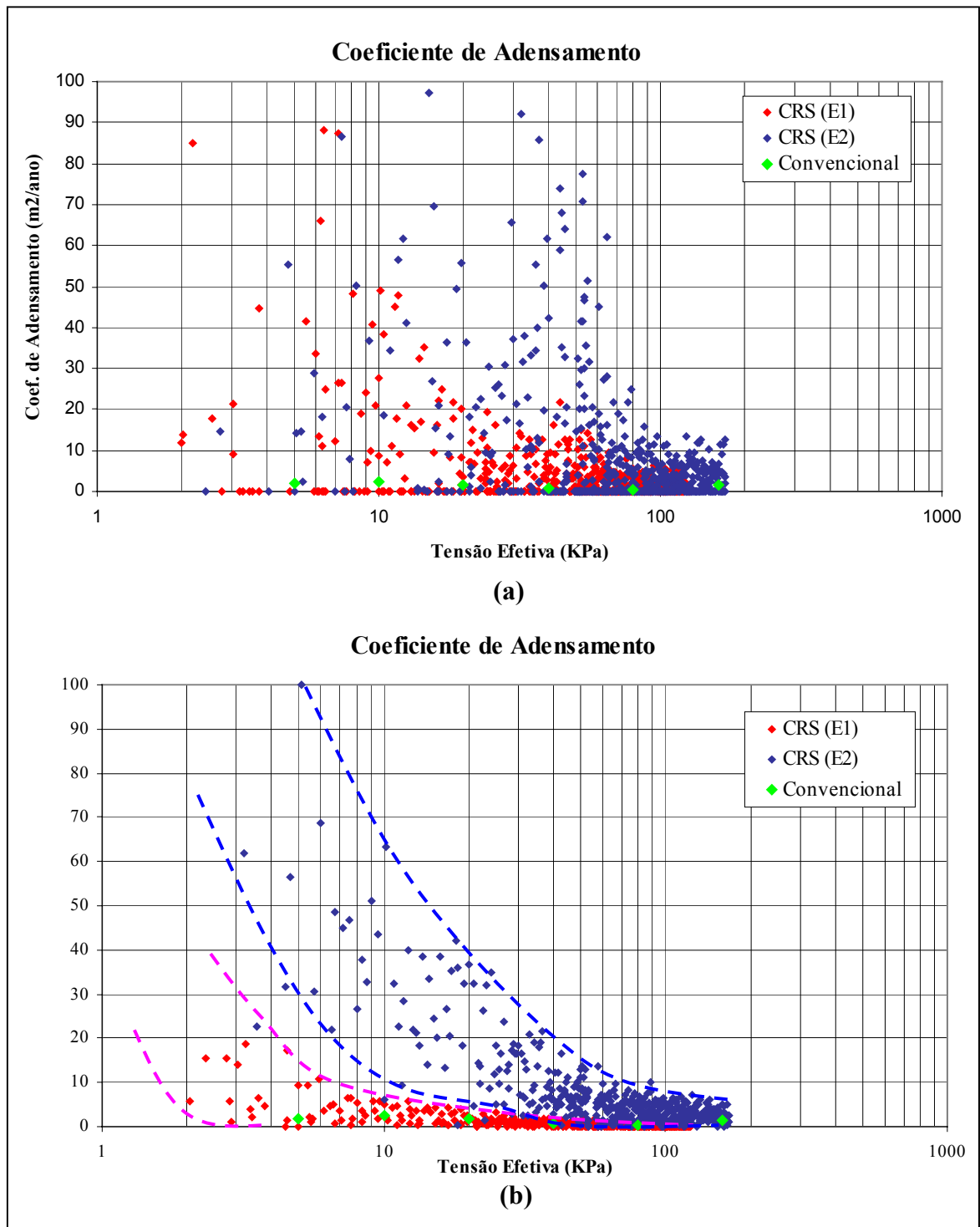
$$C_v = 0,263 \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta t} \cdot \frac{\bar{H}^2}{u_b} \text{ (m}^2\text{/ano)} \quad (2.12) \text{ (bis)}$$

Pela equação 2.12 pode-se observar que há três fatores que dependem diretamente das leituras obtidas pelos transdutores elétricos durante o ensaio: variação de tensão efetiva ( $\Delta\sigma'_v$ ), altura média do corpo de prova de prova ( $\bar{H}^2$ ) e poro pressão na base ( $u_b$ ).

As dispersões observadas no transdutor de deformação (extensômetro) são aceitáveis, conforme já discutido no capítulo 4. Além disso, como as leituras dos transdutores são realizadas de minuto em minuto, as deformações ocorridas, nesse intervalo de tempo, são extremamente pequenas, pois as velocidades utilizadas nos ensaios são muito baixas. Em consequência disso, ocorrem variações muito pequenas na altura do corpo de prova, o que não afeta, significativamente, os valores obtidos de  $C_v$ . Porém, a equação 2.12 mostrou ser extremamente sensível às dispersões ocorridas nas leituras do transdutor de poro pressão. Como se pode observar, um dos fatores dessa equação, ( $u_b$ ), depende diretamente dessas leituras. Outro fator que depende dessas leituras, mesmo sendo de forma indireta, é a variação de tensão efetiva ( $\Delta\sigma'_v$ ), como se pode constatar pela equação que determina essa variável:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \text{ (kPa)} \quad (2.13) \text{ (bis)}$$

Essa justificativa se torna bem clara através da análise gráfica dos valores de  $C_v$ , como mostra a figura 5.6.



**Figura 5.6 – Influência da dispersão da poro pressão na obtenção dos gráficos “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”**

No gráfico obtido nos dois experimentos, mostrado na figura 5.6a, estão plotados os valores verificados durante todo o ensaio. Fica clara a ocorrência de

dispersões consideráveis até mesmo após o nível de tensões efetivas correspondente a  $\sigma'_{vm}$  para ambos os ensaios.

Observando o gráfico da figura 5.6b, percebe-se uma redução significativa na dispersão em relação ao primeiro. Nos valores de  $C_v$  obtidos no gráfico da figura 5.6b, a poro pressão na base verificada pelo transdutor foi totalmente corrigida através das linhas de tendência apresentadas pelos gráficos “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)”, mostrados na figura 5.4. Os valores corrigidos foram inseridos na equação 2.12 através das variáveis “ $u_b$ ” e “ $\Delta\sigma'_v$ ”. A partir desse procedimento, as curvas mostraram, visivelmente, dispersões bem menores, embora, ainda, significativas, além de apresentar uma tendência mais clara, demonstrada através das linhas tracejadas, principalmente no ensaio CRS(E1). Nos dois ensaios, os valores passam a convergir a partir dos níveis de tensões de 45 kPa ( $\sigma'_{vm}$ ), apresentando gráficos típicos de “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidos para ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação (CRS). Pode-se observar também uma melhor concordância entre os valores do CRS com os obtidos no ensaio edométrico convencional, quando ultrapassado o valor de  $\sigma'_{vm}$ .

Porém, há a ocorrência de variações bem representativas nos valores de  $C_v$  no início dos ensaios quando os valores de tensões efetivas são ainda baixos. Isso é verificado tanto nos ensaios realizados para esse trabalho como nos encontrados na literatura, conforme os gráficos apresentados no capítulo 2, (figuras 2.12, 2.14, 2.15 e 2.18).

#### **5.1.1.6 Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ”**

As curvas obtidas para o Módulo Edométrico ( $D$ ) nos ensaios mostraram bons resultados. Obteve-se boa convergência de valores quando ultrapassada a tensão de pré-adensamento. Ambas as curvas apresentaram uma mesma tendência, ocorrendo uma boa concordância quando comparadas ao ensaio convencional, como mostra a figura 5.7.

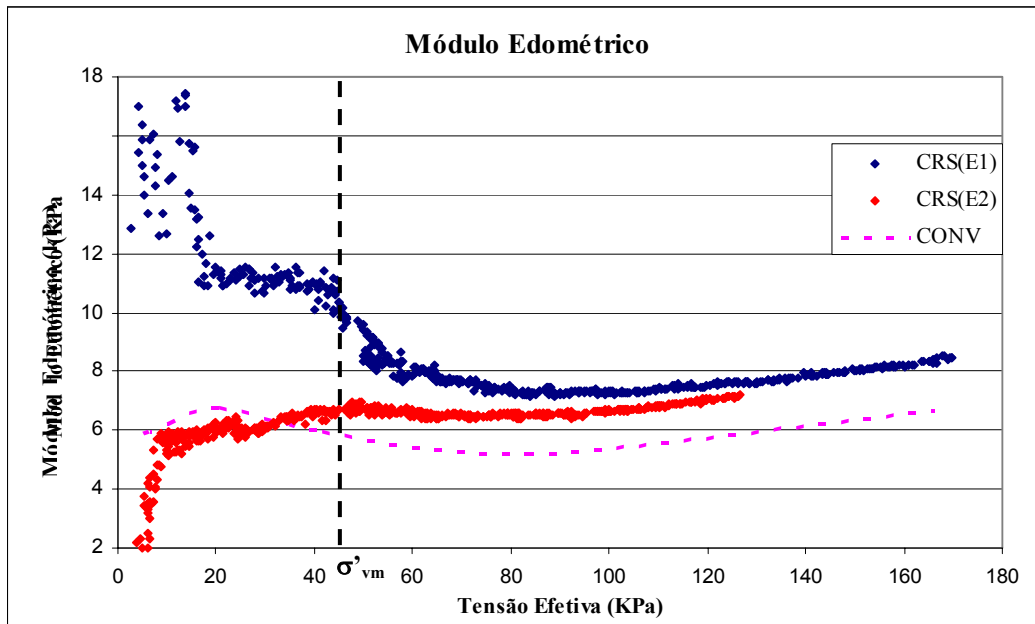


Figura 5.7 - Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS(E1) e CRS(E2)

#### 5.1.1.7 Ajuste Final

Através da análise dos resultados obtidos nos ensaios exploratórios houve a necessidade de realizar um ajuste final para proceder ao programa de ensaios finais e definitivos, com a obtenção de resultados confiáveis.

Como descrito no item 5.1.1.5 foi comprovado que os gráficos “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” foram diretamente afetados pela dispersão apresentada pelo transdutor de pressão, mostrando a influência que  $u_b$  apresenta na obtenção de bons resultados nos ensaios CRS. Com isso, houve a necessidade de realizar a troca desse instrumento juntamente com o respectivo amplificador, conforme descrito no capítulo 4, item 4.5.1.3.

Em síntese, para a realização dos ensaios definitivos, as dispersões verificadas pelos transdutores foram as seguintes:

- Transdutor de Força: 1 N (0,1%);
- Transdutor de Deformação: 0,03 mm (0,12%);
- Transdutor de Pressão: 0,20 kPa.

#### 5.1.2 Ensaios Definitivos

Após as análises realizadas através dos resultados obtidos nos ensaios exploratórios chegou-se a um procedimento definitivo para a realização do programa de ensaios finais no novo equipamento.



O programa experimental final contou, no total, com 7 ensaios, sendo que 3 deles foram realizados com o objetivo de verificar a influência da velocidade de deformação na obtenção dos parâmetros de ensaio. A tabela 5.1 mostra a nomenclatura atribuída a cada ensaio, assim como o local de origem e profundidade, além do respectivo ensaio convencional.

**Tabela 5.1 – Nomenclatura atribuída aos ensaios CRS**

CRS	Edométrico Convencional	Origem	Profundidade (m)	Sondagem
CRS1	CONV1	Joinville	3,90 a 4,50	SH-T-07
CRS2	CONV2	Joinville	2,90 a 3,50	SH-T-19
CRS3	CONV3	Joinville	4,90 a 5,50	SH-T-12
CRS4	CONV4	Florianópolis	3,70 a 4,25	I-04
CRS5	CONV5	Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04
CRS6	-	Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04
CRS7	-	Florianópolis	4,50 a 5,05	I-04

#### 5.1.2.1 Velocidades de Ensaio

As velocidades utilizadas nos ensaios podem ser denominadas de duas maneiras distintas: (a) velocidade nominal, no qual é o valor aplicado pela prensa através da combinação das engrenagens e (b) velocidade média, cujo valor é dado pelas leituras do transdutor de deformação com o respectivo tempo. A tabela 5.2 mostra os valores das velocidades nominais e médias nos ensaios realizados.

**Tabela 5.2 – Comparação entre as velocidades nominais e médias verificadas nos ensaios**

Ensaio	Velocidade Nominal (mm/min)	Velocidade Média (mm/min)
CRS1	0,0060	0,0058
CRS2	0,0060	0,0058
CRS3	0,0060	0,0059
CRS4	0,0060	0,0058
CRS5	0,0060	0,0058
CRS6	0,0090	0,0087
CRS7	0,0150	0,0145

Através das leituras do transdutor de deformação realizadas nos ensaios CRS1, CRS2, CRS3, CRS4, CRS5, CRS6 e CRS7 observou-se que as velocidades médias obtidas em todos os ensaios foram, aproximadamente, 3% inferiores às velocidades nominais da prensa, mostrando uma boa concordância entre os dois tipos de velocidades.

### 5.1.2.1.2 Critérios de Determinação da Velocidade

Como exposto no capítulo 2, vários são os critérios para determinação da velocidade no ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação propostos na literatura. Nos subitens a seguir é realizada uma comparação das velocidades de ensaio através dos principais critérios descritos no item 2.7.5.

#### a) Critério de Smith e Wahls (1969)

Os autores propuseram a seguinte equação para determinação da velocidade:

$$v = \frac{C_v \cdot C_c}{m^2 H(1 + e_0)} \left[ \frac{u_b / \sigma_v}{1 - 0,7(u_b / \sigma_v)} \right] \quad (5.1)$$

Aplicando-se a equação 5.1 e adotando-se os seguintes parâmetros:

$C_v = 3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ;  $C_c = 1,12$ ;  $e_0 = 2,18$ ;  $m = 0,6$  e  $u_b / \sigma_v = 0,41$  (baseado no ensaio CRS1), estima-se a velocidade de deformação por esse critério como sendo de 0,050 mm/min.

Baseado nos ensaios realizados, a previsão de velocidade fornecida por esse método seria relativamente alta, correndo-se o risco de não se encontrar bons resultados para os coeficientes de adensamento e boa concordância em relação às curvas tensão-deformação. Para a aplicação desse critério, o material ensaiado precisa ser bem conhecido, logo, seria necessário a realização de um ou mais ensaios de adensamento convencionais para a obtenção dos valores de  $C_v$  e  $C_c$ . Para tanto, haveria a necessidade de ter-se um tempo disponível maior para a obtenção desses parâmetros, o que tornaria desvantajoso a utilização desse critério, tendo em vista que uma das principais vantagens da realização do ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação é a redução do tempo.

#### b) Critério de Wissa et al. (1971)

Com base nas propostas apresentadas por outros autores, o critério de Wissa et al. (1971) propõe uma estimativa de valores da razão  $u_b / \sigma_v$  bastante distante, com valores muito inferiores em relação às demais. Esses valores encontram-se na faixa de 2% a 5%, como exposto na tabela 2.4. Nos ensaios obtidos nesse trabalho obteve-se

valores máximos dessa razão que variaram de 15% a 50% chegando-se a bons resultados tendo em vista a boa concordância desses resultados obtidos, tanto para o menor valor da razão  $u_b/\sigma_v$  quanto para o maior.

### c) Critério da ASTM (*American Society of Testing and Materials*)

A utilização da tabela da ASTM D4186/ 98 que simplesmente correlaciona a determinação da velocidade de deformação com o limite de liquidez do material ensaiado tornaria simplesmente inviável a realização do ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação. A tabela 5.3 mostra os valores das correlações de LL com as velocidades de deformação, em mm/min, para corpos de prova de 20 mm de altura, utilizados nesse trabalho.

**Tabela 5.3 – Velocidades de ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/ 98 para corpos de prova de 20 mm de altura (ASTM, 1998)**

Faixa de Limites de Liquidez, LL (%)	Velocidade de Deformação (mm/min)
Até 40	0,008
40 a 60	0,002
60 a 80	0,0008
80 a 100	0,0002
100 a 120	0,00008
120 a 140	0,00002

Para um solo com LL= 106%, como apresenta uma das amostras de Florianópolis, para que a deformação vertical atinja uma faixa de 40%, o tempo estimado do ensaio seria, aproximadamente, de 69 dias, o que é impraticável. Para um dos solos de Joinville que apresenta LL= 81%, para atingir-se uma deformação vertical em torno de 25%, o tempo estimado de ensaio seria, aproximadamente, de 17 dias, que também é um contrasenso. Logo, para ambos os casos, a adoção desse critério seria totalmente inadequada.

### d) Critério de Armours e Drnevich (1986)

Através das equações 2.14, 2.15 e 2.16 determina-se a velocidade de deformação pelo critério de Armours e Drnevich (1986) que, de maneira simplificada, é dada pela equação:

$$v = \frac{-[\exp(8 - 3IL)]Pa.K_i \cdot \log[1 - (u_b / \sigma_v)_{\max}]}{\gamma_a.H^2} \quad (5.2)$$

Adotando-se os parâmetros  $h = 78,8\%$ ;  $LL = 64\%$ ;  $LP = 30\%$ ;  $k_i = 1 \times 10^{-5}$  cm/s;  $u_b / \sigma_v = 0,41$  (CRS1) e aplicando à equação 5.2 obtém-se uma velocidade de deformação igual a 0,009 mm/min.

A proposta de Armours e Drnevich (1986) é a que mais se aproxima dos valores reais de velocidades utilizadas nos ensaios, mostrando ser, no caso desse estudo, a mais racional na determinação da velocidade no ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação. A racionalidade do uso desse método também foi relatada por Almeida (1988).

Para a utilização desse critério, é de real interesse ter conhecimento de alguns parâmetros do material a ser ensaiado, como índice de liquidez (que depende diretamente dos valores do limite de liquidez e plasticidade) e também da condutividade hidráulica, haja vista a importância do conhecimento desses valores na aplicação da equação 5.2 e obtenção da velocidade a ser utilizada no ensaio.

A tabela 5.4 mostra uma síntese das velocidades de deformação e dos valores máximos da razão  $u_b / \sigma_v$  encontrados na literatura, juntamente com os verificados neste trabalho. Através dessa tabela, pode-se observar a ampla faixa de variação de velocidades aplicadas assim como da razão  $u_b / \sigma_v$  verificadas na prática pelas pesquisas anteriores.

**Tabela 5.4 – Valores de velocidades de deformação aplicadas e razão  $u_b / \sigma_v$  máxima encontrada em ensaios CRS**

Referência	Velocidades de Deformação (mm/min)	Razão $u_b / \sigma_v$ máxima (%)
Crawford (1964)	0,02 e 0,045	5 a 8
Crawford (1965)	0,0005 e 0,025	15
Wahls e Degodoy (1965)	0,01 a 0,045	25 e 75
Smith e Wahls (1969)	0,0005 a 0,05	50
Wissa et al. (1971)	0,0025 a 0,009	5
Gorman et al. (1978)	0,0009 a 0,02	32
Carvalho (1989)	0,002 a 0,01	32
Sheahan e Watters (1996)	0,001 e 0,01	21,8
Alborta (1997)	0,001 a 0,01	80
Baptista (1998)	0,0015 a 0,0090	Não Especificado
Kassin e Clarke (1999)	0,03 e 0,05	10
Presente Trabalho	0,006 a 0,015	50

### 5.1.2.2 Curvas Índices de Vazios x Tensão Efetiva

Os gráficos “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidos para os ensaios CRS mostraram uma boa definição, tendo em vista o número de pontos obtidos para o traçado dessas curvas.

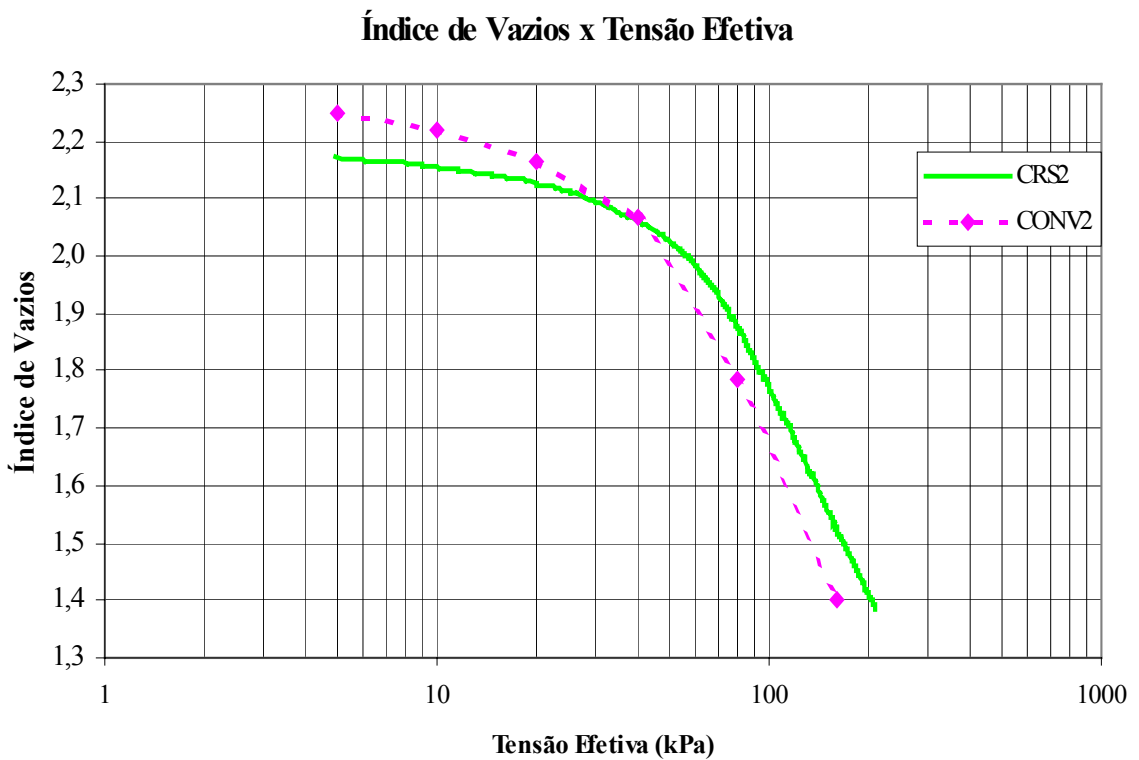
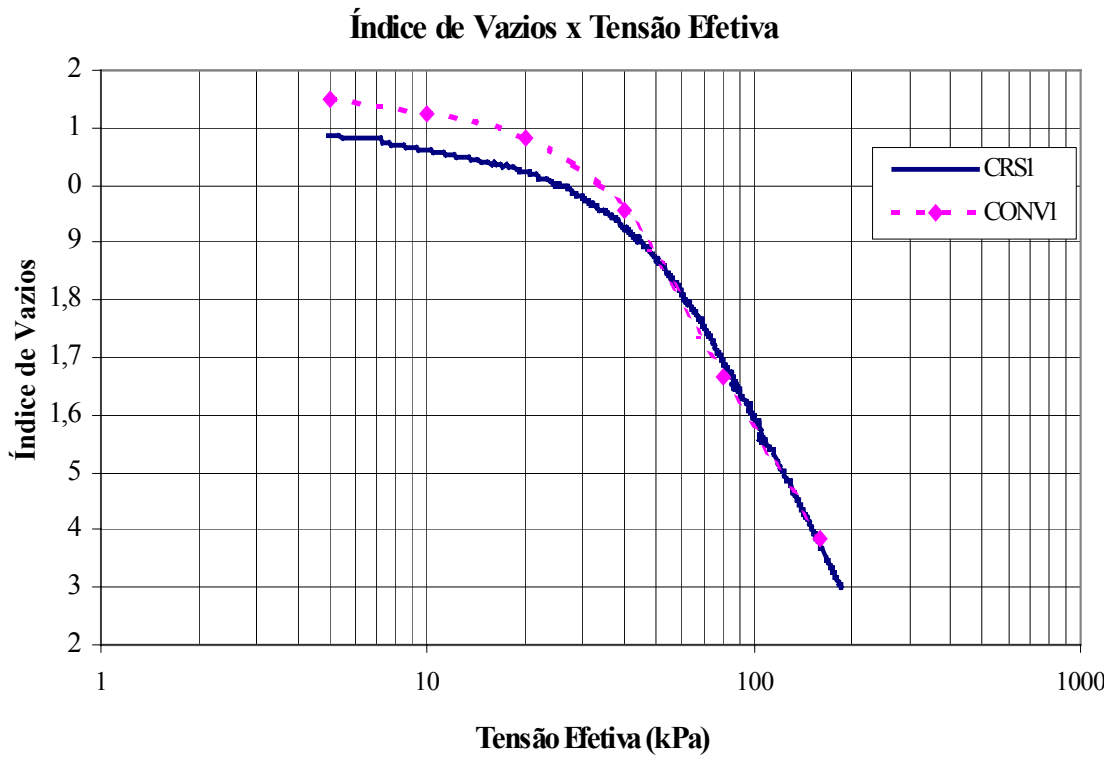
Uma peculiaridade percebida em todos os ensaios CRS, quando comparados com os convencionais, foi a diferença entre os índices de vazios iniciais, os quais apresentaram valores inferiores para os ensaios CRS. A causa dessa diferença pode ser atribuída às umidades naturais verificadas nas amostras dos ensaios convencionais e CRS. Para os solos de Joinville (CRS1, CRS2 e CRS3), as umidades obtidas foram, em média, 10% inferiores às do convencional. Já para os solos de Florianópolis (CRS4, CRS5, CRS6 e CRS7), a média encontrou-se na faixa de 15% menores para o CRS. Essa perda de umidade das amostras ocorreu num intervalo de tempo de, aproximadamente, 5 meses, que foi a diferença de tempo de realização entre os ensaios convencionais e os CRS, mesmo estando os tubos sheldies bem acondicionados em câmara úmida.

A tabela 5.5 mostra os valores das umidades naturais e dos índices de vazios encontrados em todos os ensaios.

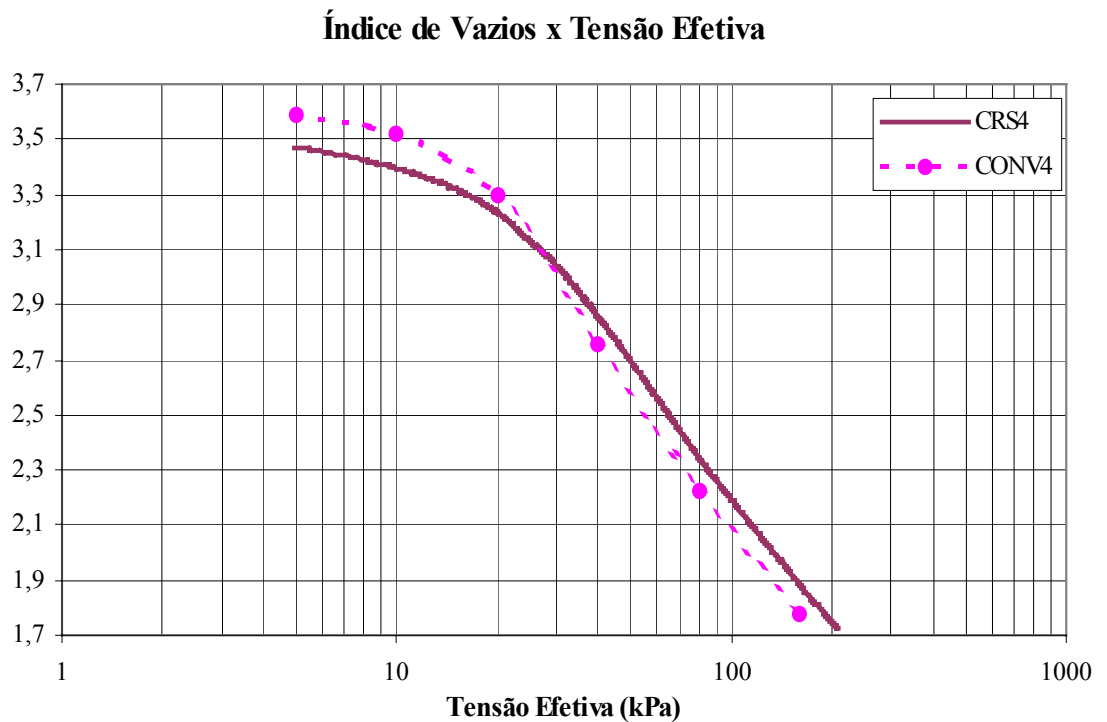
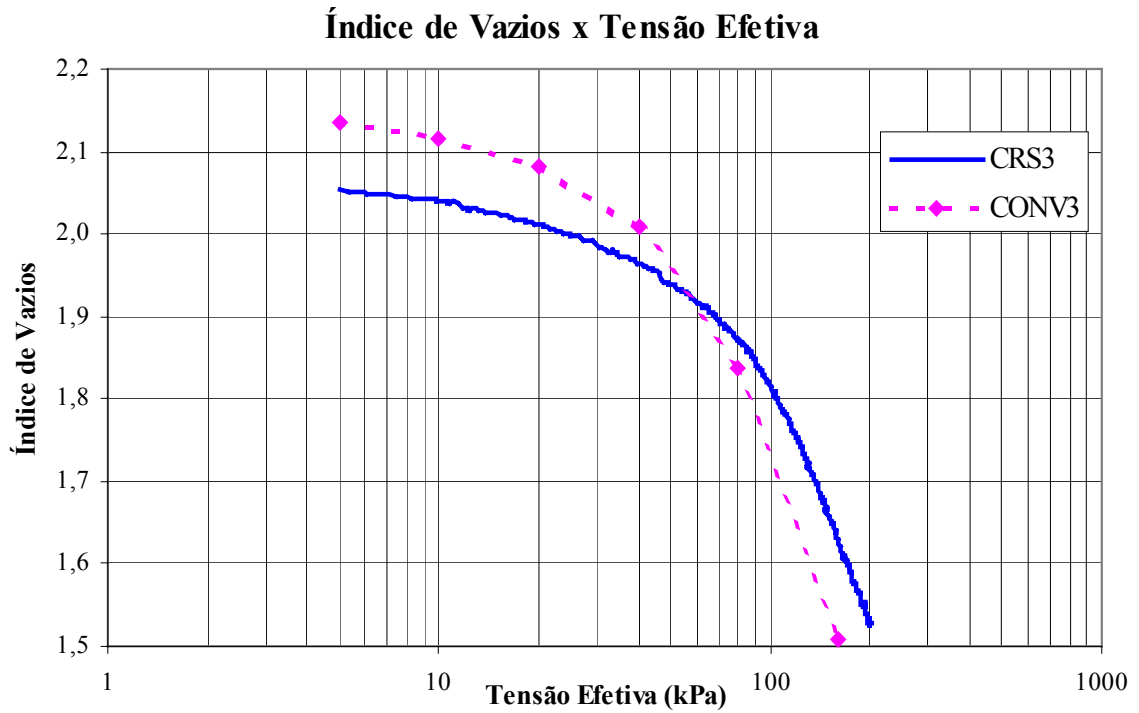
**Tabela 5.5 – Teores de umidades naturais e índices de vazios iniciais verificados nos ensaios CRS e convencionais**

Ensaio	$e_0$	w(%)	Ensaio	$e_0$	w(%)
CRS1	2,09	78,8	CONV1	2,18	86,7
CRS2	2,19	83,9	CONV2	2,27	92,4
CRS3	2,06	78,3	CONV3	2,14	87,7
CRS4	3,52	133,5	CONV4	3,65	145,2
CRS5	3,45	132,8	CONV5	3,61	147,5
CRS6	3,41	133,3	-	-	-
CRS7	3,42	132,9	-	-	-

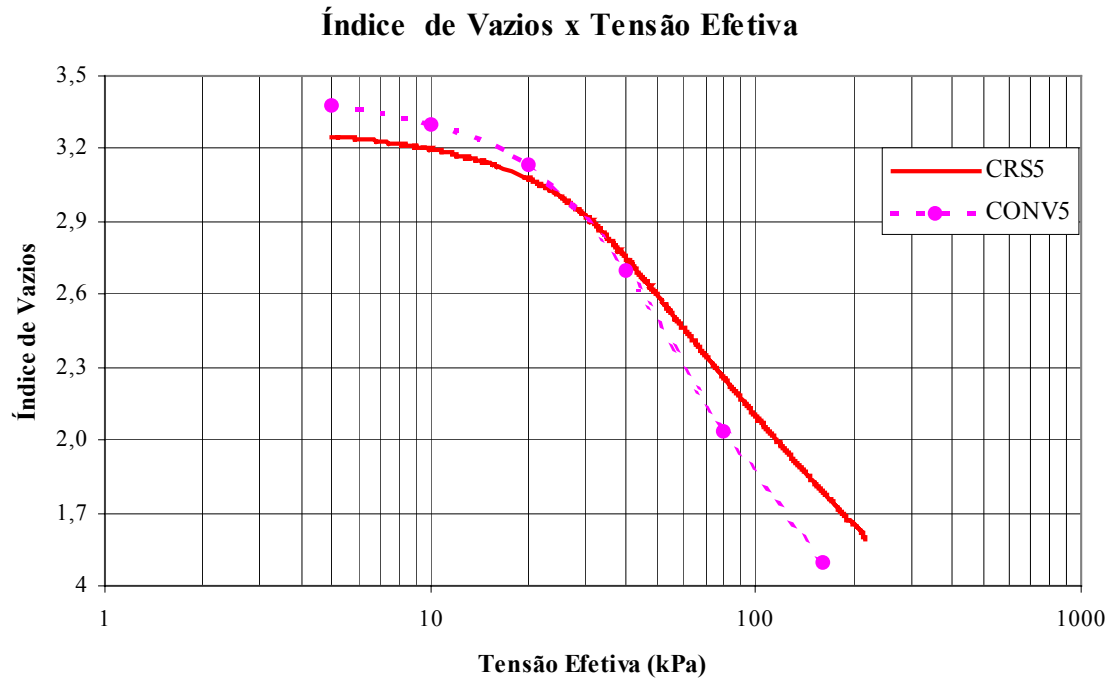
A ocorrência dessas diferenças não invalida, em hipótese alguma, as curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)”, pois como mostram as figuras 5.8, 5.9 e 5.10, essas apresentam mesmas tendências e também há uma boa concordância entre elas, especialmente para tensões maiores que a tensão de pré-adensamento.



**Figura 5.8 – Curvas “ $e$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2, CONV2**



**Figura 5.9 – Curvas “ $e$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS3, CONV3 e CRS4, CONV4**



**Figura 5.10 – Curva “ $e$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtida no ensaio CRS5 e CONV5**

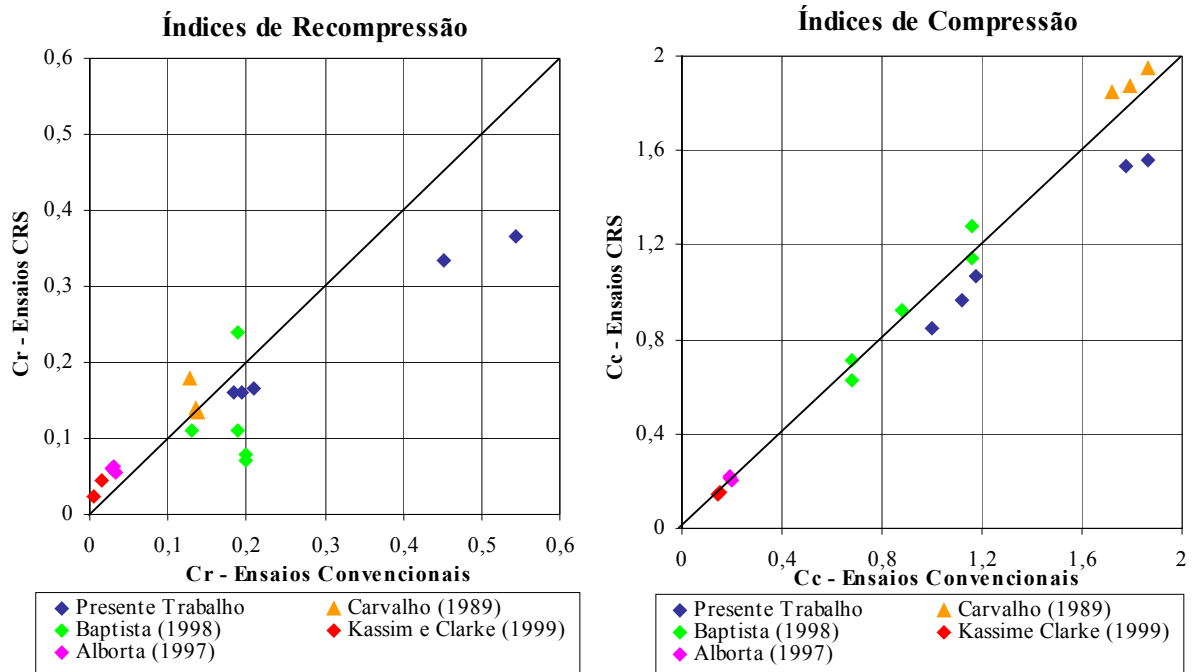
Os valores, tanto de  $C_r$ , como de  $C_c$ , foram superiores em todos os ensaios convencionais, como mostra a tabela 5.6.

**Tabela 5.6 – Valores de  $C_r$  e  $C_c$  verificados nos dois tipos de ensaios**

Ensaio	$C_r$	$C_c$	Ensaio	$C_r$	$C_c$
CRS1	0,160	0,967	CONV1	0,194	1,120
CRS2	0,167	1,068	CONV2	0,209	1,179
CRS3	0,160	0,850	CONV3	0,185	1,000
CRS4	0,333	1,533	CONV4	0,451	1,775
CRS5	0,365	1,562	CONV5	0,543	1,861

Através da tabela 5.6, observa-se que os valores de  $C_r$  foram, em média, 20% superiores para os três primeiros ensaios convencionais quando comparados com os CRS. Para os demais (CONV4 e CONV5), essa média foi 40% superior em relação aos respectivos CRS. Quanto aos valores de  $C_c$ , esses foram, em média, 15% superiores nos ensaios CONV1, CONV2 e CONV3. Para os ensaios CONV4 e CONV5, os valores de  $C_c$  foram, em média, 17% superiores em relação aos CRS. A figura 5.11 mostra essa situação, para uma melhor visualização, através da plotagem desses valores em forma gráfica, juntamente com valores encontrados por outros autores.





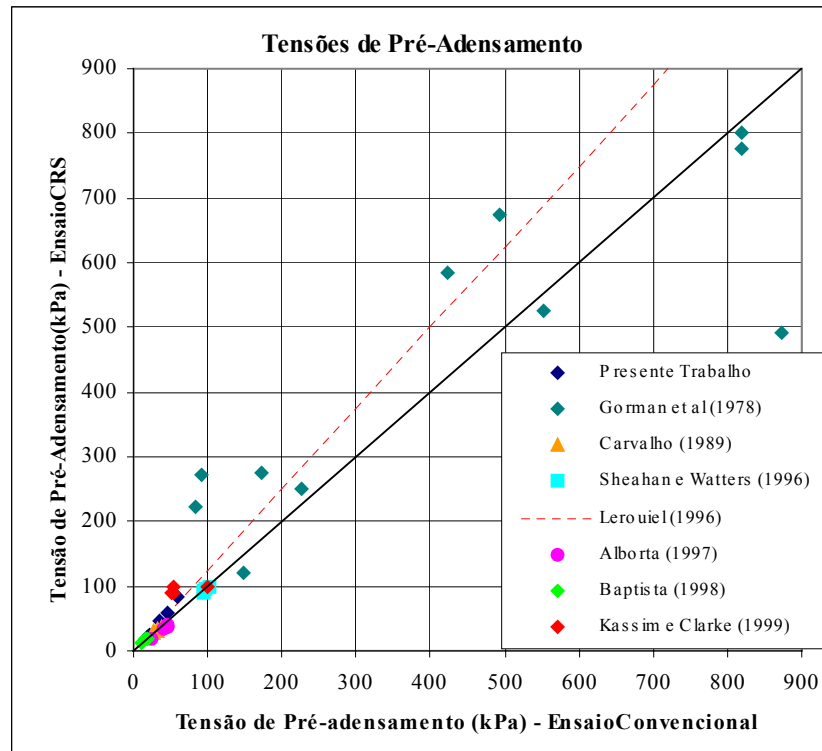
**Figura 5.11 – Valores de Cr e Cc verificados nos ensaios CRS e convencionais**

Os valores de Cr e Cc encontrados pelos autores citados na figura 5.11, com exceção de Baptista (1998), foram extraídos das curvas “ $\epsilon \times \sigma'_v$  (esc. log)” apresentadas em seus trabalhos, estando, portanto, suscetíveis a erros por essas curvas não apresentarem uma escala gráfica tão adequada para esse fim.

#### 5.1.2.2.1 Tensão de Pré-Adensamento ( $\sigma'_{vm}$ )

Vários são os autores que obtiveram boa concordância entre as curvas “ $\epsilon \times \sigma'_v$  (esc. log)” e também para as curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” nos ensaios CRS e convencionais com estimativas de  $\sigma'_{vm}$  diferentes para os dois tipos de ensaios.

Na literatura não se encontra sempre uma mesma tendência de valores de tensões de pré-adensamento estimadas nos dois ensaios. Alguns autores (e.g. Sheahan e Watters (1996), Alborta (1997)) encontraram valores de  $\sigma'_{vm}$  maiores nos ensaios convencionais que nos CRS. Já Kassim e Clarke (1999) encontraram valores de  $\sigma'_{vm}$  superiores em seus ensaios CRS quando comparados com os convencionais, assim como Carvalho (1989) e Baptista (1998) que, em apenas um dos ensaios CRS, estimaram um valor de  $\sigma'_{vm}$  menor em relação ao convencional. A figura 5.12 mostra os valores de  $\sigma'_{vm}$  encontradas por esses autores juntamente com as verificadas nesse trabalho.

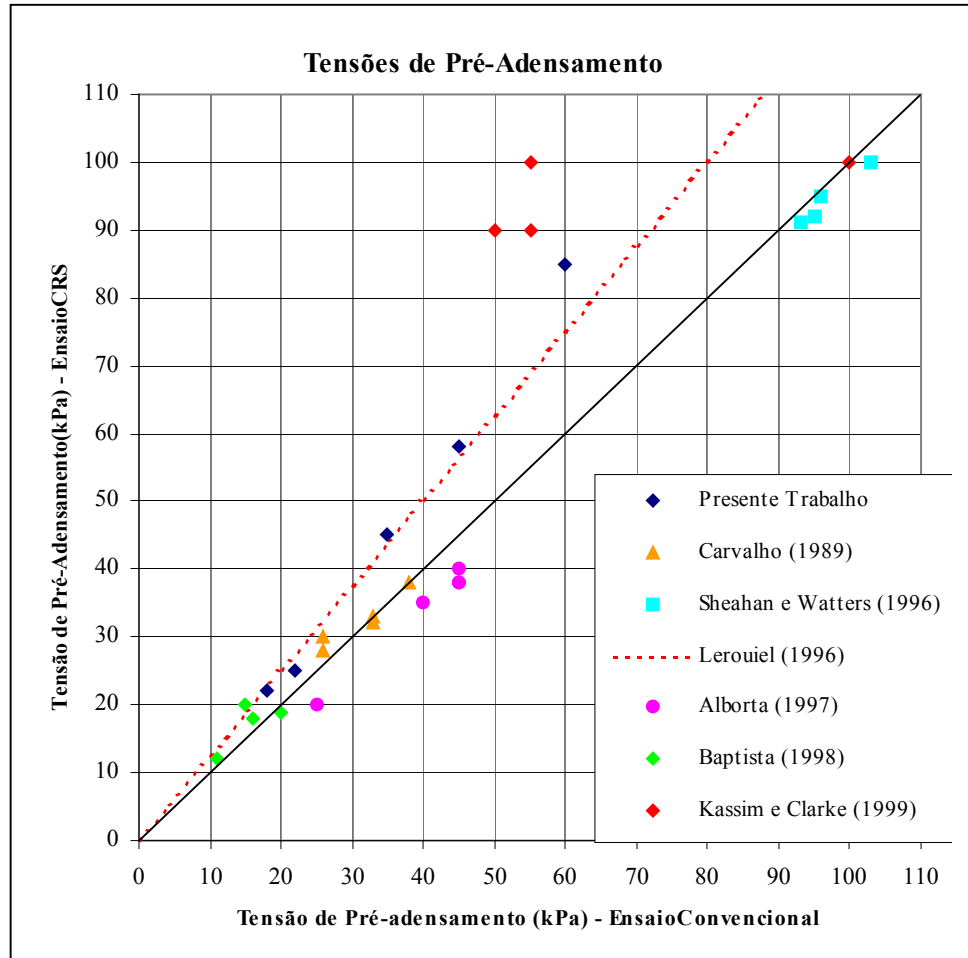


**Figura 5.12 – Tensões de Pré-Adensamento verificadas em ensaios CRS e convencionais**

A linha tracejada mostrada na figura 5.12 é uma linha de tendência da relação  $\sigma'_{vmCRS}/\sigma'_{vmCONV}$  ao longo da qual situam-se os valores de  $\sigma'_{vm}$  para os dois tipos de ensaios citados por Lerouiel (1996), que foram mostrados na tabela 2.3.

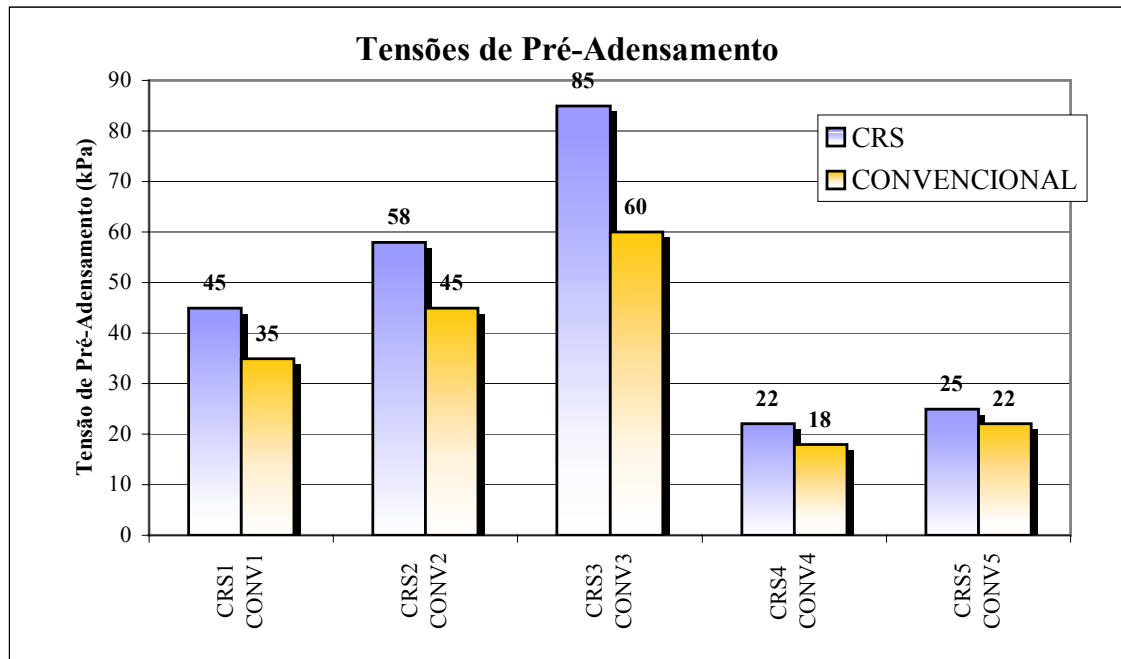
Conforme descrito no capítulo 2, Gorman et al. (1978) verificaram, para as tensões de pré-adensamento, valores obtidos no CRS bastante discrepantes quando comparados com os convencionais. As diferenças verificadas chegaram, em alguns casos, até a 300%, sendo alguns valores superiores nos CRS e outros nos convencionais, como pôde-se observar através da figura 5.12.

Por questões de escala gráfica, a fim de gerar uma melhor visualização, a figura 5.13 mostra os valores de  $\sigma'_{vm}$  de todos os autores citados, com exceção de Gorman et al. (1978).



**Figura 5.13 – Tensões de Pré-Adensamento verificadas em ensaios CRS e convencionais para valores de até 110 kPa**

Através de uma reunião de resultados realizadas para variadas argilas de diferentes países feita por Leroueil (1996) indicam uma estimativa de tensão de pré-adensamento nos ensaios CRS, em geral, 25% maiores que nos ensaios convencionais (capítulo 2). As tensões de pré-adensamento estimadas nos ensaios CRS realizados nesse presente estudo seguiram essa tendência, sendo superiores às dos ensaios convencionais. A figura 5.14 apresenta os valores de  $\sigma'_{vm}$  verificados nos ensaios CRS juntamente com os convencionais, determinados através do método de Pacheco Silva.



**Figura 5.14 - Tensões de Pré-Adensamento verificadas nos ensaios CRS e convencionais**

Através da figura 5.14 verifica-se valores de  $\sigma'_{vm}$  22% maiores nos ensaios CRS1 e CRS2, quando comparados com os convencionais. No ensaio CRS3, esse valor foi 29% superior. Para os solos que apresentaram valores de  $\sigma'_{vm}$  mais baixos, como os de Florianópolis, a diferença obtida entre os diferentes ensaios foi menor. Para o ensaio CRS4, o valor de  $\sigma'_{vm}$  verificado no CRS foi 18% superior em relação ao convencional e, para o CRS5, a diferença foi de 12% superior também para o CRS.

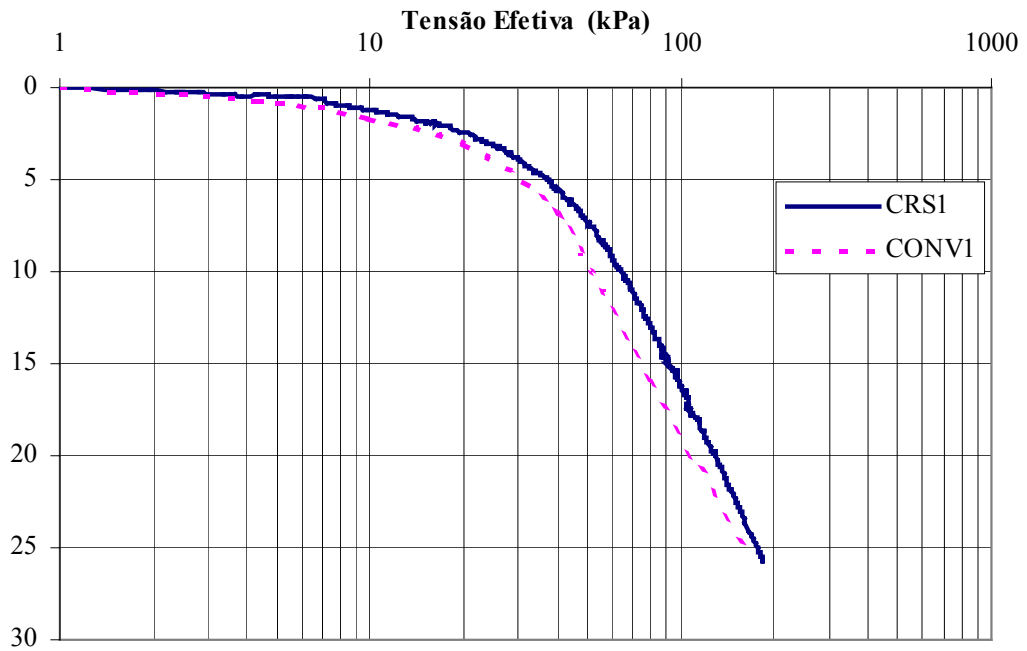
### 5.1.2.3 Curvas Deformação Vertical x Tensão Efetiva

Analisando os gráficos “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, através das figuras 5.15, 5.16 e 5.17, observa-se uma boa concordância entre as curvas obtidas nos ensaios CRS quando comparadas às obtidas no ensaio convencional.

Os resultados comprovam a boa eficácia do ensaio CRS na obtenção das relações “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, mostrando curvas de boa qualidade e bem definidas.

Nos ensaios CRS1 e CRS2 as deformações verticais alcançaram valores acima de 25% para um nível de tensões efetivas próximo de 200 kPa, com um tempo de duração de, aproximadamente, 14 horas para cada um. Nos ensaios convencionais correspondentes verificaram-se deformações verticais semelhantes para um nível de tensões de 160 kPa.

### Deformação x Tensão Efetiva



### Deformação x Tensão Efetiva

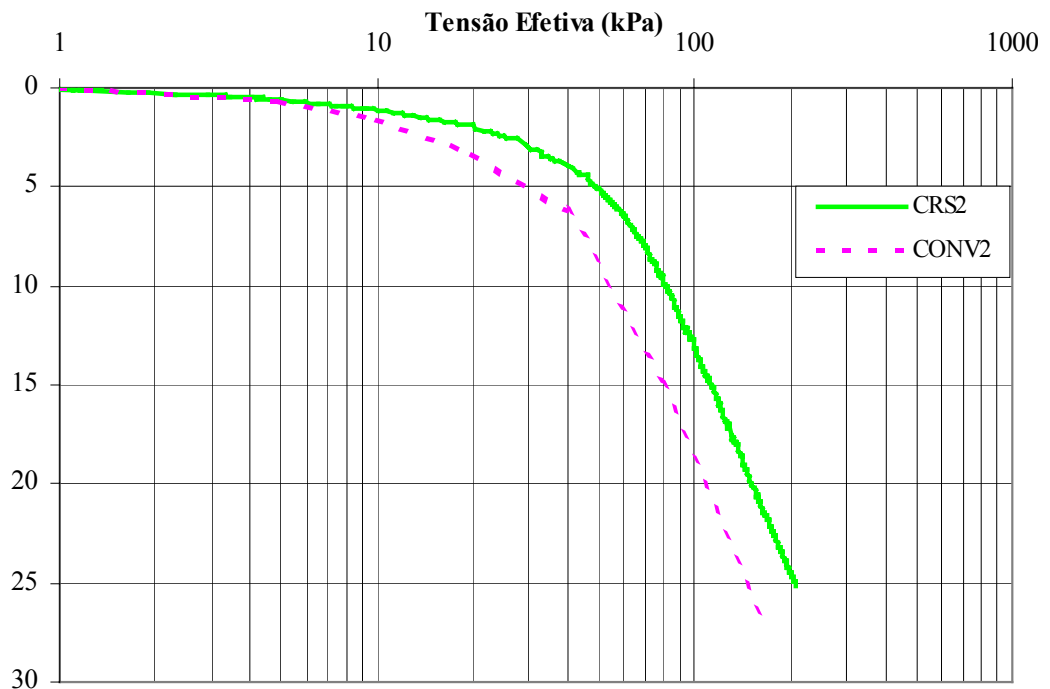
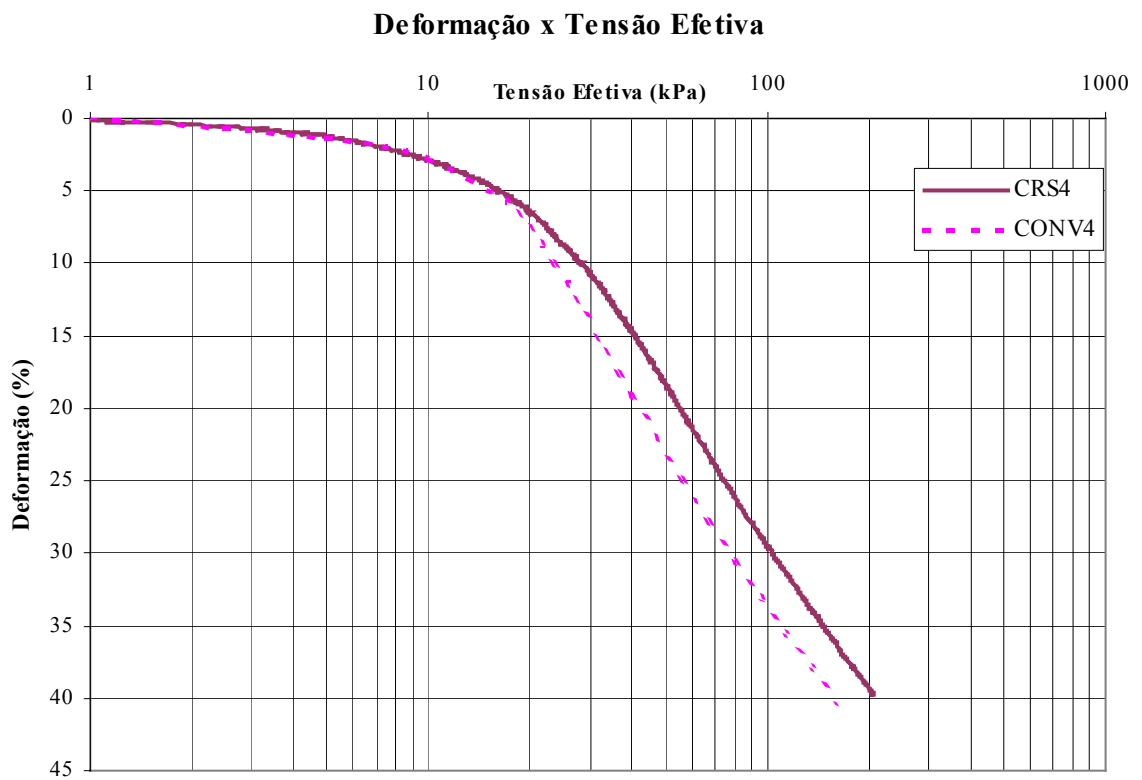
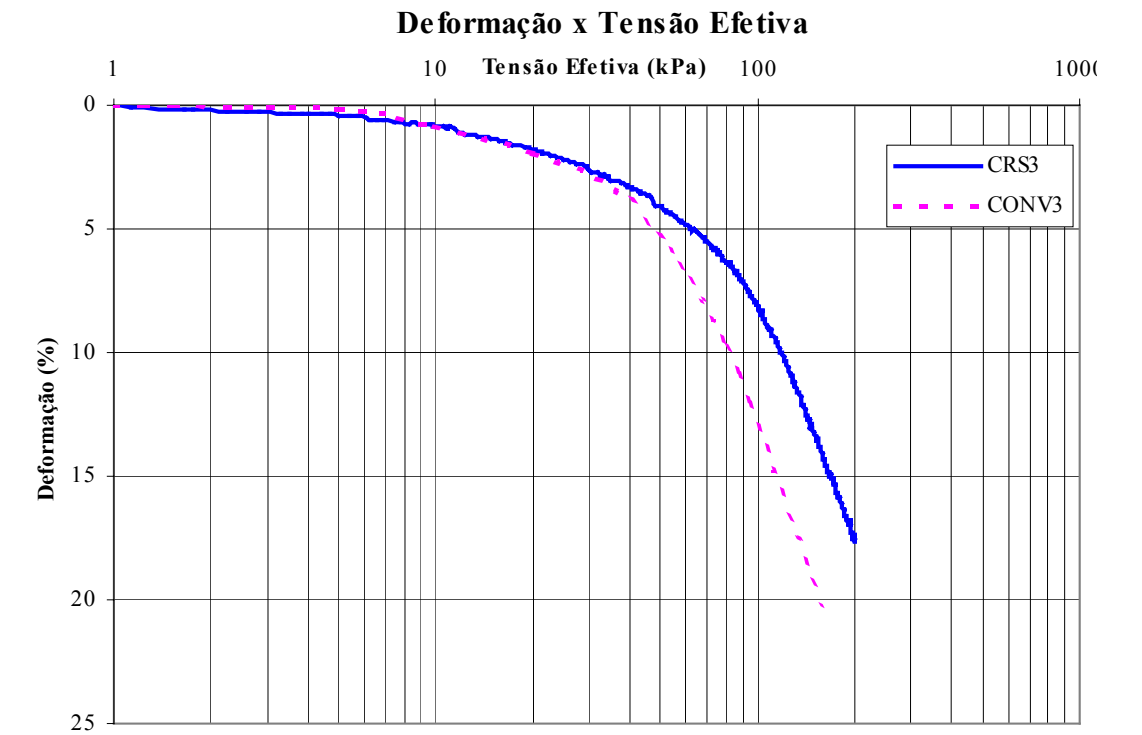
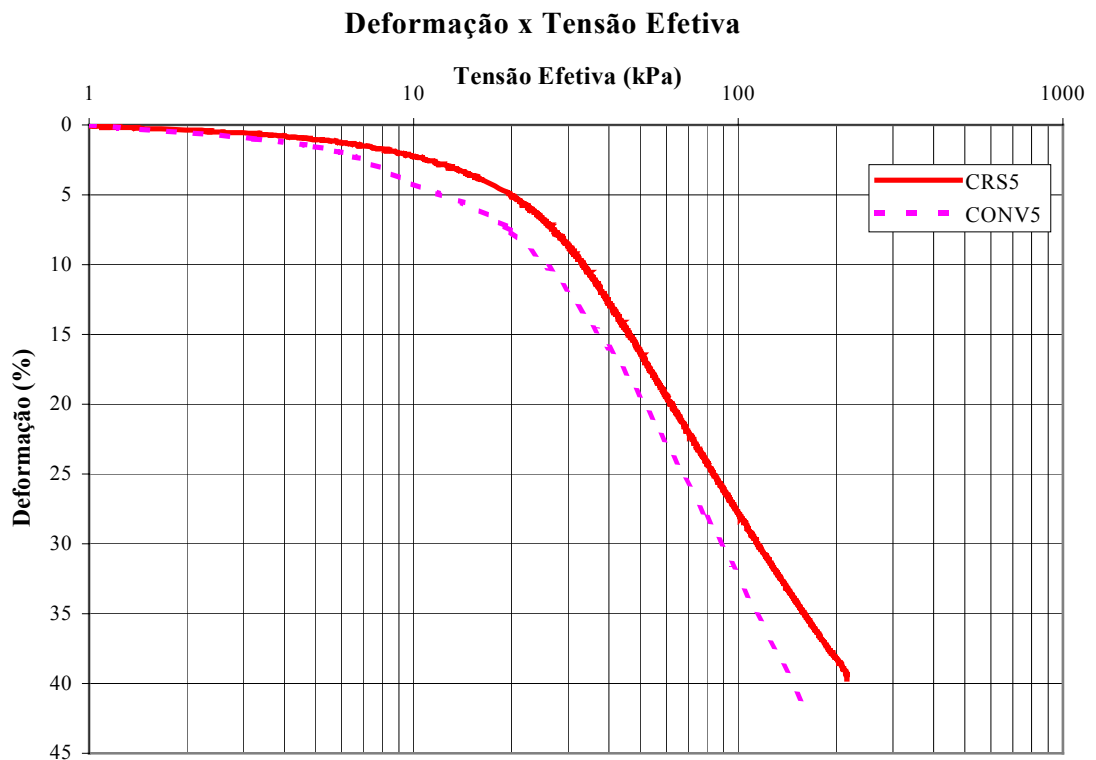


Figura 5.15 - Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2, CONV2



**Figura 5.16 - Curvas “ $\epsilon_v$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS3, CONV3 e CRS4, CONV4**



**Figura 5.17 - Curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS5 e CONV5**

No ensaio CRS3 a deformação vertical verificada para um nível de tensões efetivas de 200 kPa foi de 17% num tempo de duração de, aproximadamente, 10 horas. A rigidez da amostra foi responsável por esse valor inferior de deformação verificado nesse ensaio. Como o tempo de duração de cada ensaio CRS, no presente trabalho, não é limitado pelas deformações e sim pela capacidade de força aplicada pela célula de carga, para uma mesma velocidade de deformação aplicada em corpos de prova com diferentes características (rigidez, compressibilidade, etc.) a célula de carga atingirá seu limite máximo em espaços de tempo diferentes.

Para os solos de Florianópolis, a magnitude de deformação vertical alcançou valores mais elevados que os verificados para os solos de Joinville. Os solos de Florianópolis são mais compressíveis e também mais plásticos que os de Joinville. Os índices de plasticidade verificados para os solos de Florianópolis são, aproximadamente, 30% superiores que os apresentados para os solos de Joinville.

Nos ensaios CRS4 e CRS5, as velocidades de deformação aplicadas foram as mesmas que nos ensaios CRS1, CRS2 e CRS3. Porém, as deformações verticais atingidas foram de 40% para um mesmo nível de tensões dos ensaios anteriores,

entretanto, num intervalo de tempo próximo a 60% superior aos tempos máximos verificados nos primeiros, com duração média de 22 horas para cada um.

#### 5.1.2.4 Curvas Coeficiente de Adensamento x Tensão Efetiva

Os coeficientes de adensamento foram calculados através da equação 2.12 proposta por Wissa et al. (1971). Esta leva em consideração que as deformações são infinitesimais (item 2.7.4).

Em geral, as curvas “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram boa concordância nos resultados, até mesmo quando se atingiram valores de  $u_b/\sigma_v$  maiores, apesar de não concordarem com a teoria de Wissa et al. (1971). Segundo essa teoria, a razão  $u_b/\sigma_v$  deve ser inferior a 5%; para vários autores, essa faixa é considerada muito moderada.

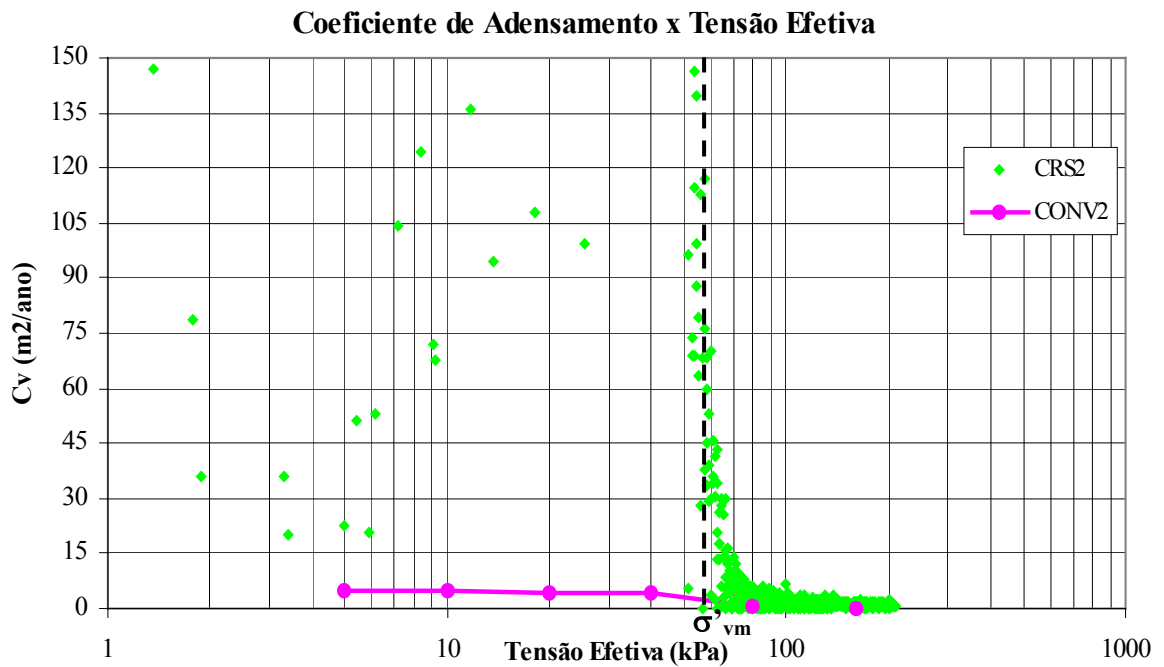
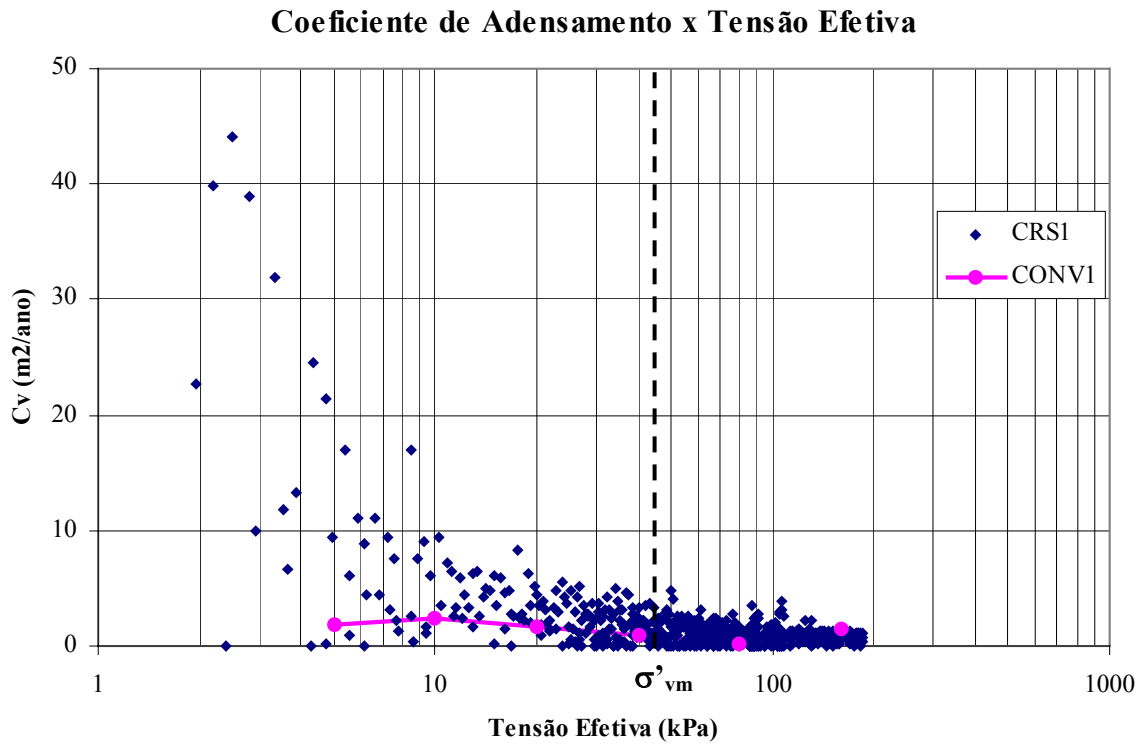
Os gráficos obtidos (figuras 5.18, 5.19 e 5.20) mostram dispersões nos valores de  $C_v$  no início dos ensaios, quando as tensões ainda são baixas. Como já citado no item 5.1.1.5, há uma convergência desses valores quando se aproximam da tensão de pré-adensamento, apresentando, no entanto, significativa dispersão.

A causa dessa ocorrência, aparentemente, não pode ser atribuída a um fluxo transiente de água no interior do corpo de prova no início do ensaio, como justifica a maioria dos autores. Segundo Wissa et al. (1971), o tempo necessário para que a parcela representativa da fase transiente desapareça e inicie o regime de fluxo permanente é muito pequeno, sendo, aproximadamente, de um minuto. Portanto, nesse caso, fica difícil de aceitar essa justificativa.

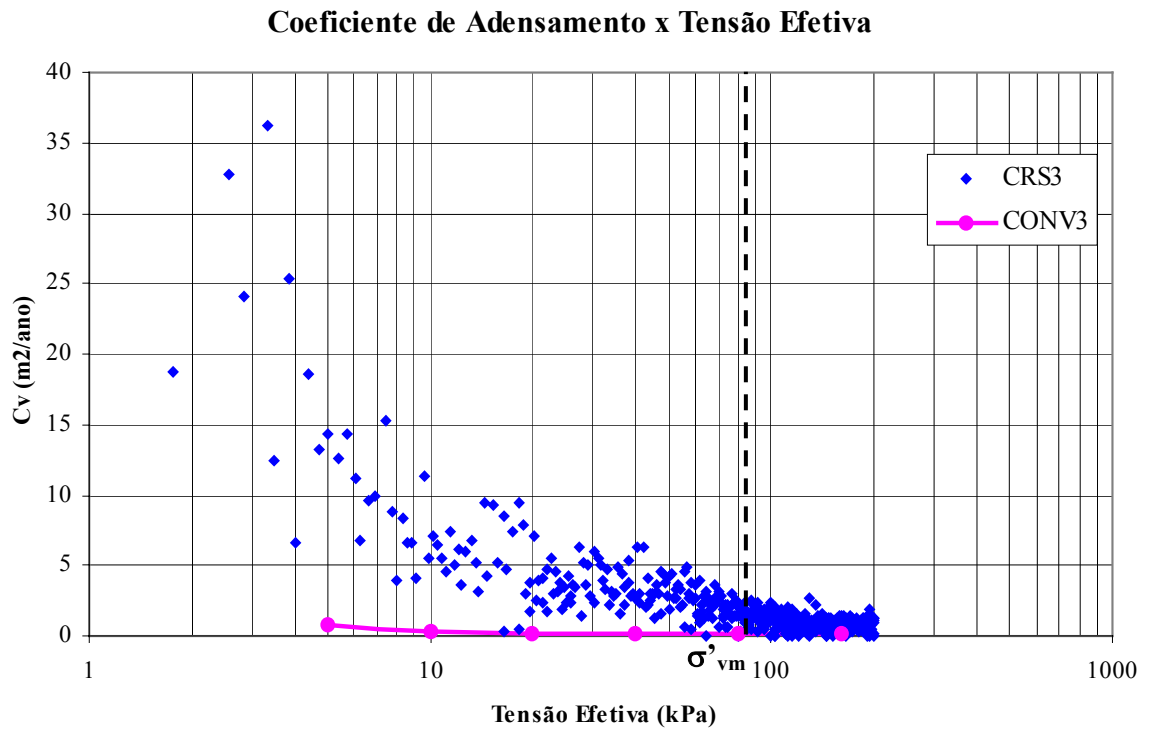
Não é a magnitude total de poro pressão gerada na base que influencia os valores de  $C_v$ . Isto é percebido através dos próprios resultados encontrados, tendo como exemplo o ensaio CRS3 que atingiu valores de poro pressão gerados na base de 45 kPa e o ensaio CRS5 que atingiu 35 kPa de poro pressão e, em ambos, encontraram-se valores convergentes próximos à tensão de pré-adensamento.

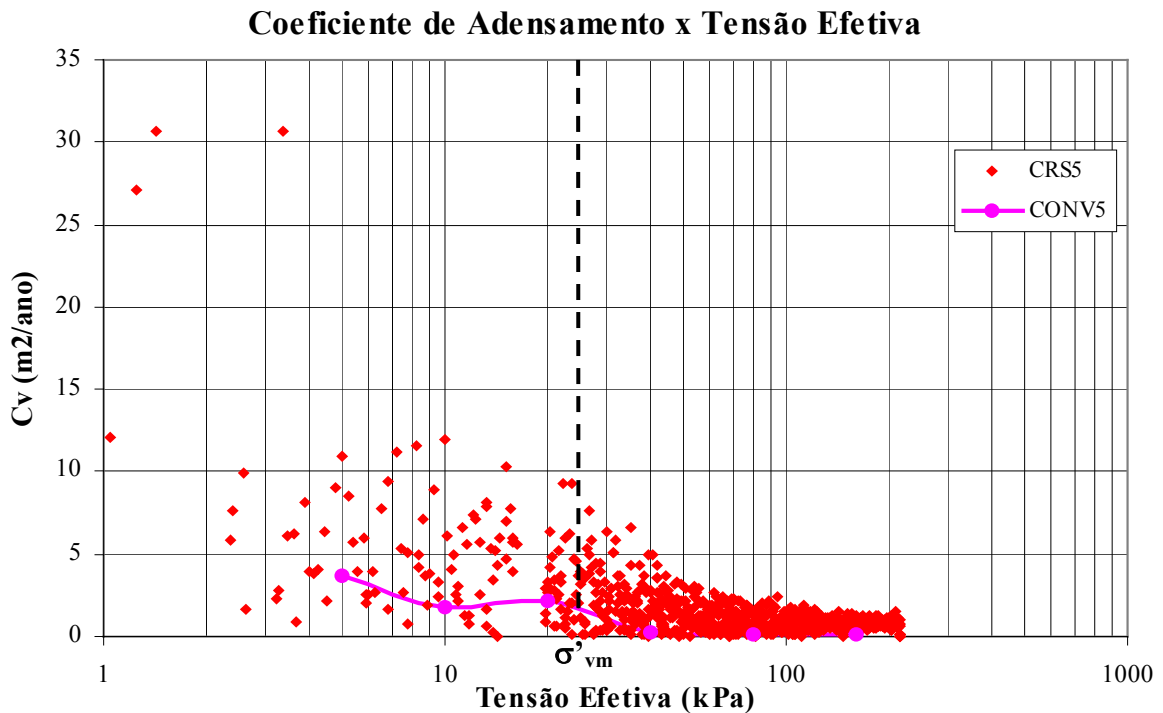
Como na fase inicial do ensaio a argila encontra-se pré-adensada (recompressão), há uma dissipação muito grande de excesso de poro pressão, gerando valores de  $u_b$  na base pouco significativos, resultando em valores suficientemente altos de  $C_v$ , devido também à representatividade que o fator  $u_b$  apresenta na equação de  $C_v$ , como relatado no item 5.1.1.5.





**Figura 5.18 – Valores de  $C_v$  dos ensaios CRS1, CONV1 e CRS2 e CONV2**





Quando a amostra atinge o nível da tensão de pré-adensamento, iniciando o trecho de compressão da mesma, ocorre uma diminuição de dissipação de excesso de poro pressão, gerando valores de  $C_v$  mais baixos e convergentes até o término do ensaio.

Alguns autores (e. g. Gorman et al. (1978), Sheahan e Watters (1996), Baptista (1998)) não mostram esses valores iniciais dispersos e aconselham desconsiderar esses pontos. Como o objetivo desse trabalho é mostrar o funcionamento do equipamento desenvolvido e a geração dos resultados por ele obtidos, esses pontos não foram descartados justamente para demonstrar essa particularidade apresentada pelos gráficos “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidos nos ensaios CRS e que são coerentes com os resultados transcritos na literatura.

No ensaio CRS1 os valores de  $C_v$  encontram-se, para tensões maiores que 45 kPa, na faixa de 2,0 m<sup>2</sup>/ano ( $6,33 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s). Para o ensaio CRS2, para tensões maiores que 58 kPa, os valores de  $C_v$  ficaram em 3,0 m<sup>2</sup>/ano ( $9,50 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s). Os valores de  $C_v$  no ensaio CRS3 foram semelhantes aos encontrados no CRS1, porém a partir de uma faixa de tensões de 85 kPa ( $\sigma'_{vm}$ ). Para o ensaio CRS4 os valores encontraram-se, para tensões maiores que 22 kPa, em 4 m<sup>2</sup>/ano ( $1,26 \times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s), chegando a valores de 1,0 m<sup>2</sup>/ano ( $3,16 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s) para tensões a partir de 100 kPa até o final do ensaio. Finalmente, para o ensaio CRS5 os valores encontraram-se, para

tensões maiores que 25 kPa, em 3 m<sup>2</sup>/ano, chegando a valores de 1,0 m<sup>2</sup>/ano para tensões a partir de 80 kPa até o encerramento do ensaio.

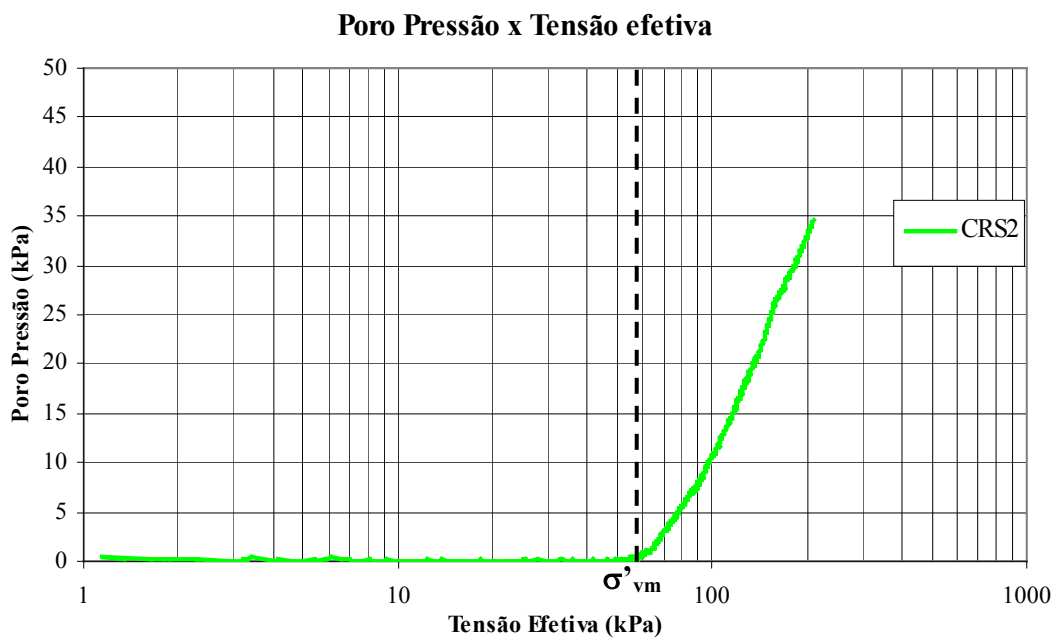
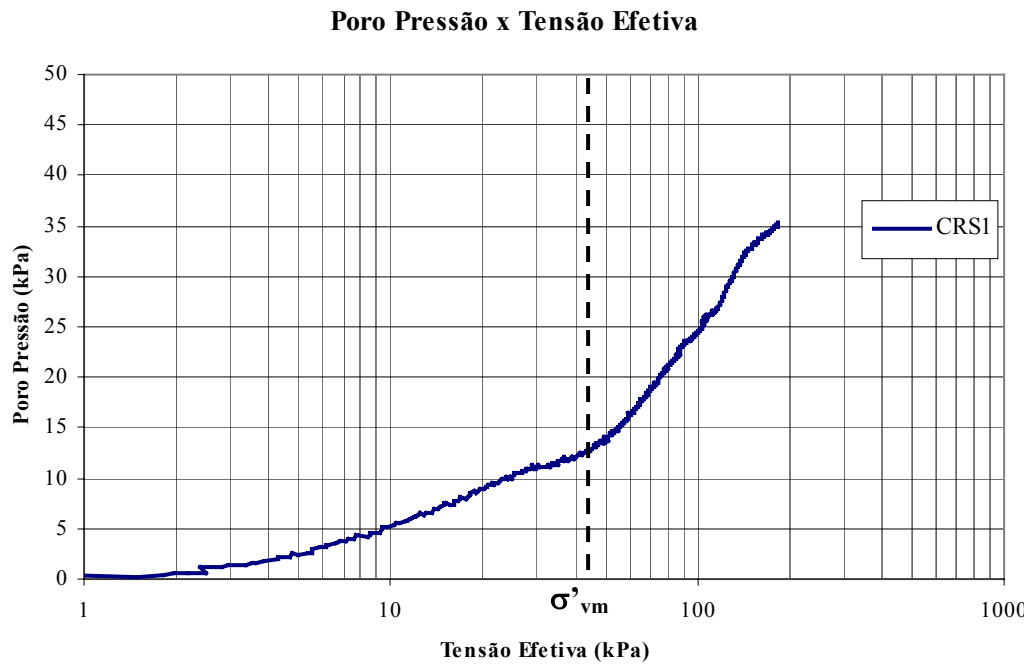
Quando comparados com os resultados verificados nos ensaios convencionais, os valores de  $C_v$  apresentaram boa concordância no trecho de compressão da amostra, assim como transcreve a literatura, mostrando que é possível obter-se valores de  $C_v$  no ensaio CRS confiáveis em relação aos convencionais em um intervalo de tempo consideravelmente menor. Essa confiabilidade entre os valores de  $C_v$  obtidos no ensaio CRS foi relatada também através de uma análise global realizada por Olson (1986) que concluiu que as diferenças de valores de  $C_v$  entre os diferentes ensaios foram de mesma magnitude que as diferenças de  $C_v$  de ensaios convencionais duplicados.

#### **5.1.2.5 Curvas Poro Pressão x Tensão Efetiva**

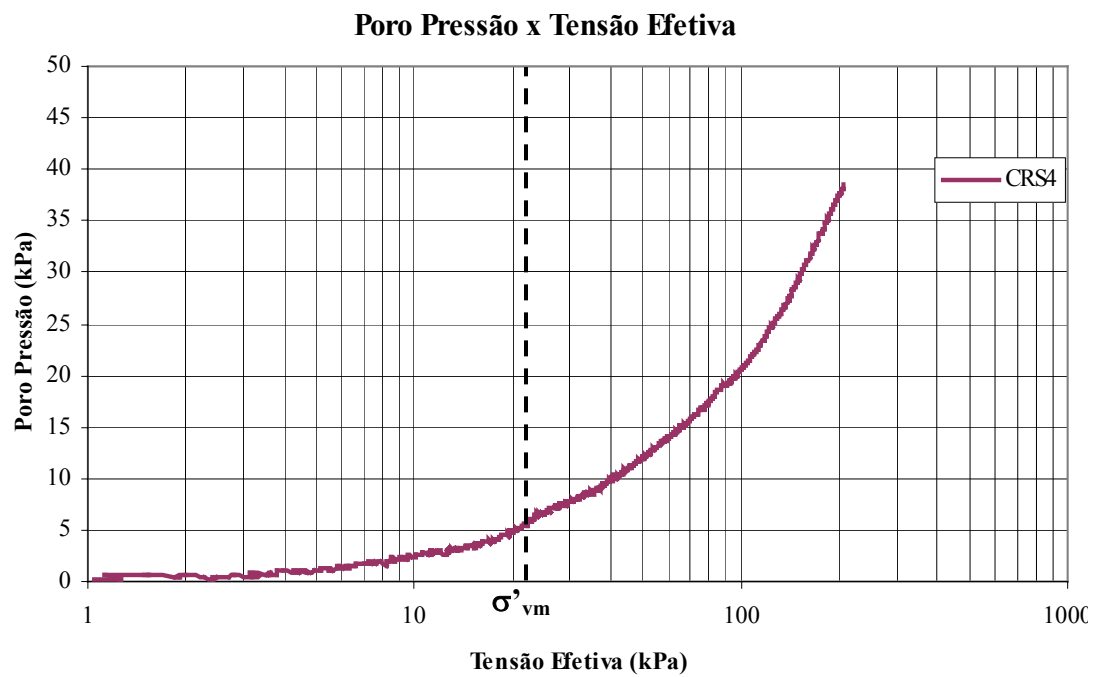
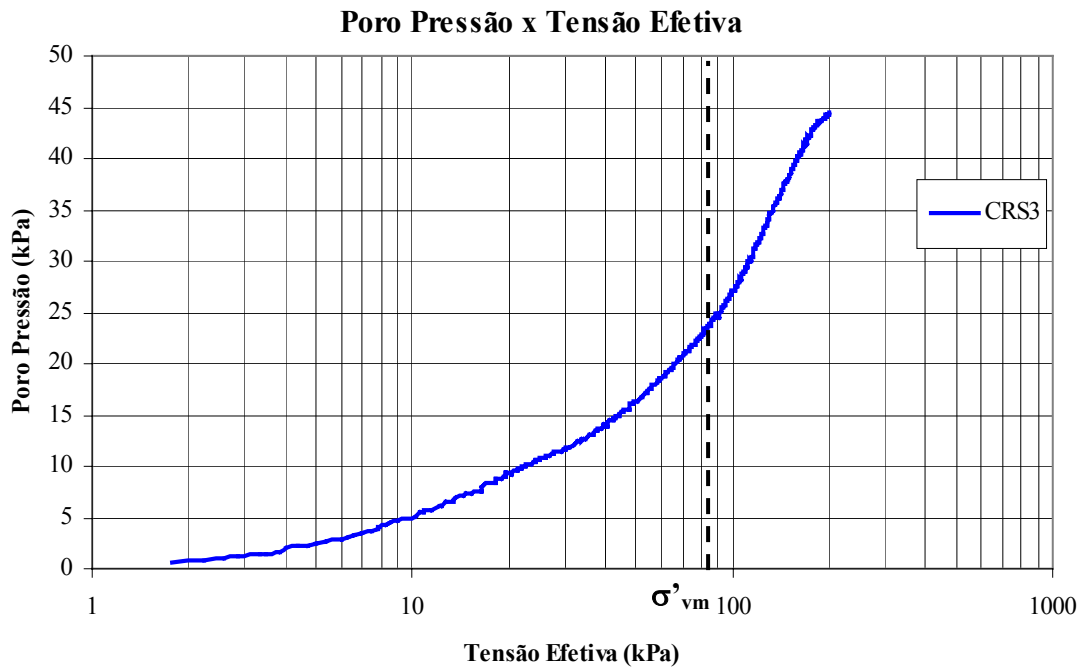
As curvas “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” típicas obtidas nos ensaios CRS são apresentadas nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23. O limite máximo de poro pressão gerada na base verificado em todos ensaios foi de 45 kPa (CRS3).

Nota-se, através da análise das curvas “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)”, que os valores de  $u_b$  sofrem uma certa alteração (aumento) a partir da tensão de pré-adensamento. Em alguns ensaios essa alteração é bastante brusca, em outros, mais gradual, porém notável. Esse aspecto foi verificado e comentado também por Sällfors (1975), Gorman et al. (1978) e Carvalho (1989).

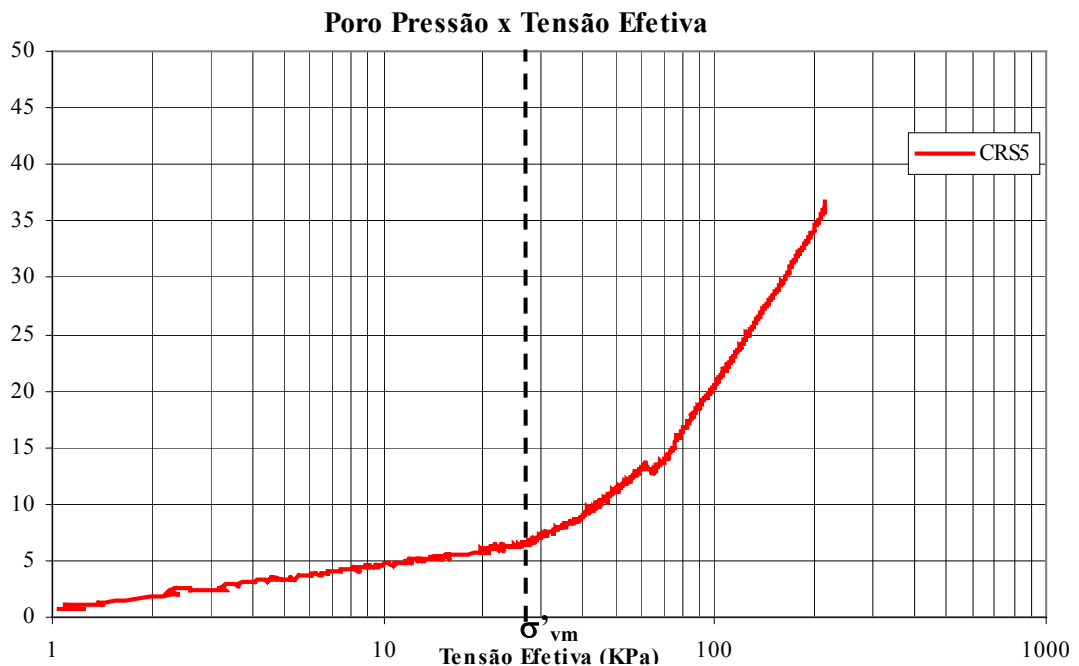
No ensaio CRS1 os valores de  $u_b$  medidos até a tensão de pré-adensamento foram de 13 kPa, chegando a 35 kPa ao final do ensaio. No ensaio CRS2 fica bastante clara a geração de poro pressão a partir da tensão de pré-adensamento (58 kPa). No final desse ensaio os valores de  $u_b$  chegaram também a 35 kPa. No ensaio CRS3, como a tensão de pré-adensamento foi maior em relação às anteriores (85 kPa), o valor de  $u_b$ , até esse nível de tensão, foi de 24 kPa, chegando a 45 kPa na fase final.



**Figura 5.21 – Curvas “ $u_b$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS1 e CRS2**



**Figura 5.22 – Curvas “ $u_b$  x  $\sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS3 e CRS4**



**Figura 5.23 – Curva “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtida no ensaio CRS5**

Pode-se perceber que, ao atingir tensões próximas às de pré-adensamento, a geração de poro pressão cresce de forma mais acentuada que as verificadas para os solos de Joinville. Esses apresentam um crescimento mais gradual, mostrando que, para solos mais plásticos e compressíveis, a curva “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” sofre uma alteração mais brusca a partir da faixa da tensão de pré-adensamento.

Quando a amostra encontra-se no trecho de recompressão, onde as deformações são ainda pequenas, a quantidade de água expulsa é pequena, admitindo verdadeiras duas hipóteses da Teoria de Terzaghi: (a) o solo está completamente saturado e (b) os grãos de solo e o fluido intersticial são incompressíveis. Quando o nível de tensões efetivas atinge e ultrapassa o pré-adensamento, a deformação do solo aumenta gerando acréscimos contínuos de poro pressão na base do corpo de prova até o encerramento do ensaio.

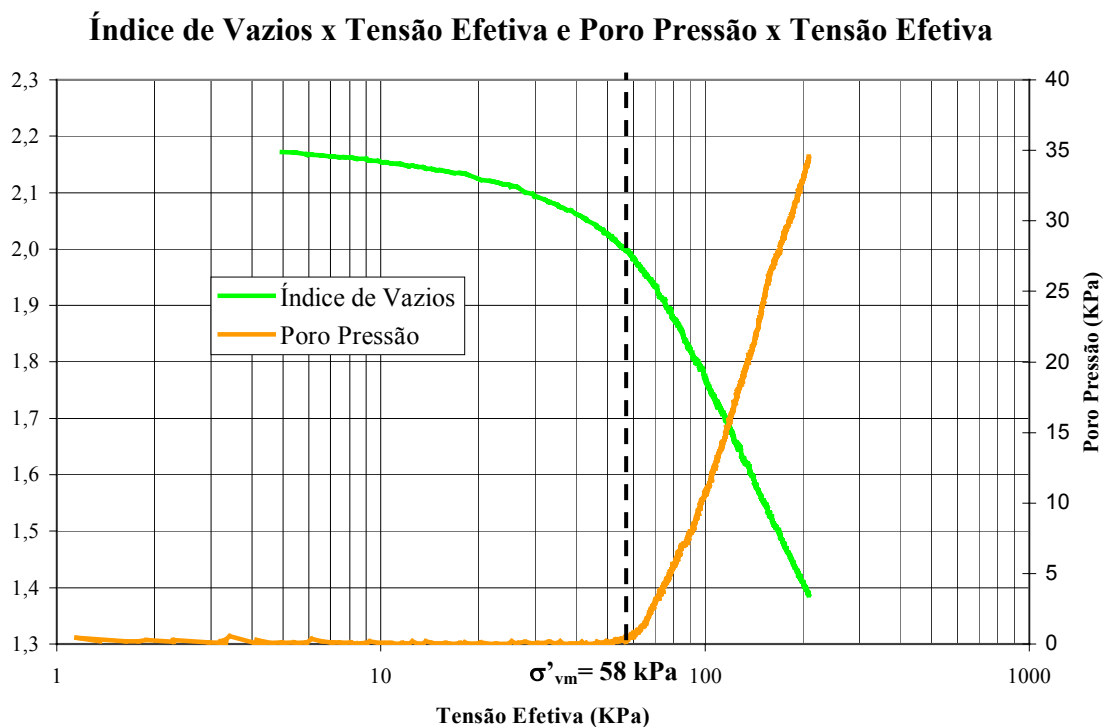
No ensaio CRS4, até o nível de tensões de 22 kPa ( $\sigma'_{vm}$ ), os valores de  $u_b$  gerados foram pouco maiores que 5 kPa, chegando a 38,5 kPa no final do ensaio. No ensaio CRS5, até o nível de tensões de 25 kPa, os valores de  $u_b$  gerados foram de 6 kPa, chegando a pouco mais de 35 kPa no final do ensaio.

### 5.1.2.5.1 Aplicação da Contrapressão

A aplicação da contrapressão é muito importante para realizar a completa saturação dos corpos de prova em solos de alta compressibilidade utilizados em ensaios CRS.

No ensaio CRS2 foram gerados valores muito baixos de poro pressão na base (próximos de zero) a níveis de tensões abaixo de 58 kPa, comprometendo, diretamente, os resultados obtidos para os coeficientes de adensamento (figuras 5.18, 5.19 e 5.20). Possivelmente, esse fato pode ter ocorrido devido à (a) saturação incompleta do corpo de prova, apesar do grau de saturação da amostra encontrar-se, praticamente, em 100%, como descrito no capítulo 3, e/ ou à (b) sensibilidade não tão acentuada do transdutor de pressão, para leitura de valores tão baixos. Esta ocorrência foi verificada também no ensaio exploratório CRS(E2). Nas duas ocasiões, valores de poro pressão mais significativos só começaram a ser gerados na base a partir da tensão de pré-adensamento. A figura 5.24 mostra essa situação, ocorrida no ensaio CRS2.

A contrapressão utilizada no ensaio CRS2 foi de 100 kPa, com um tempo médio de saturação de 15 horas, assim como também no ensaio CRS1, porém nesse não houve essa particularidade. A partir de então, para os demais ensaios, foi utilizada uma contrapressão de 150 kPa com um tempo de saturação de 24 horas, sendo aplicada gradativamente.



**Figura 5.24 – Curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” e “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” do ensaio CRS2**

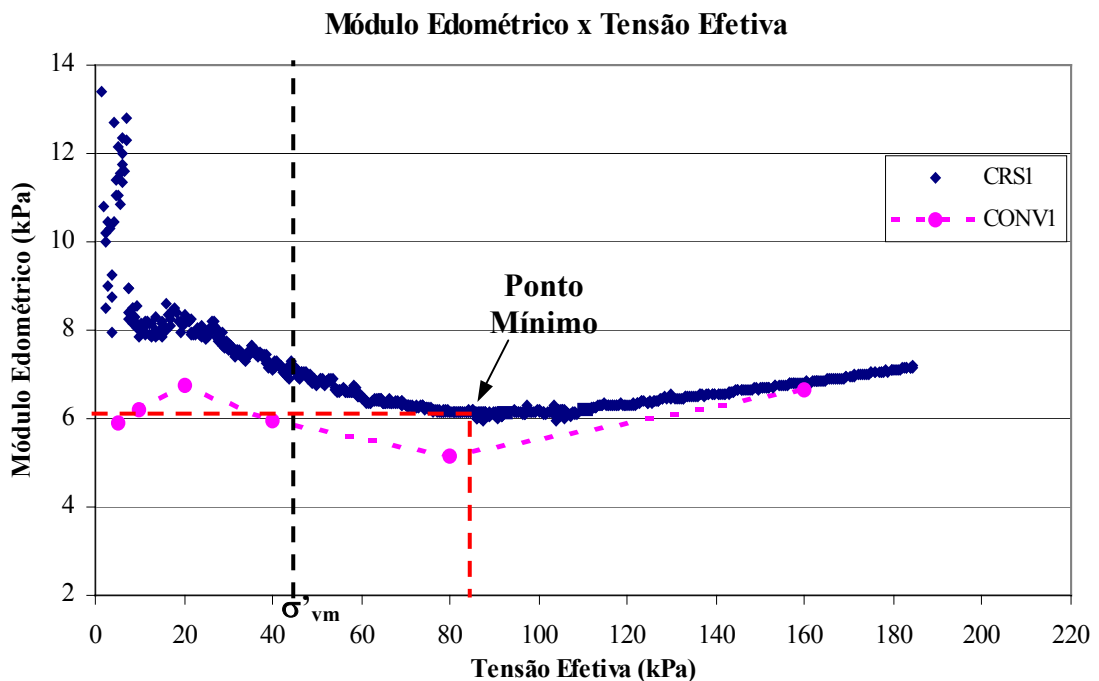


### 5.1.2.6 Curvas Módulo Edométrico x Tensão Efetiva

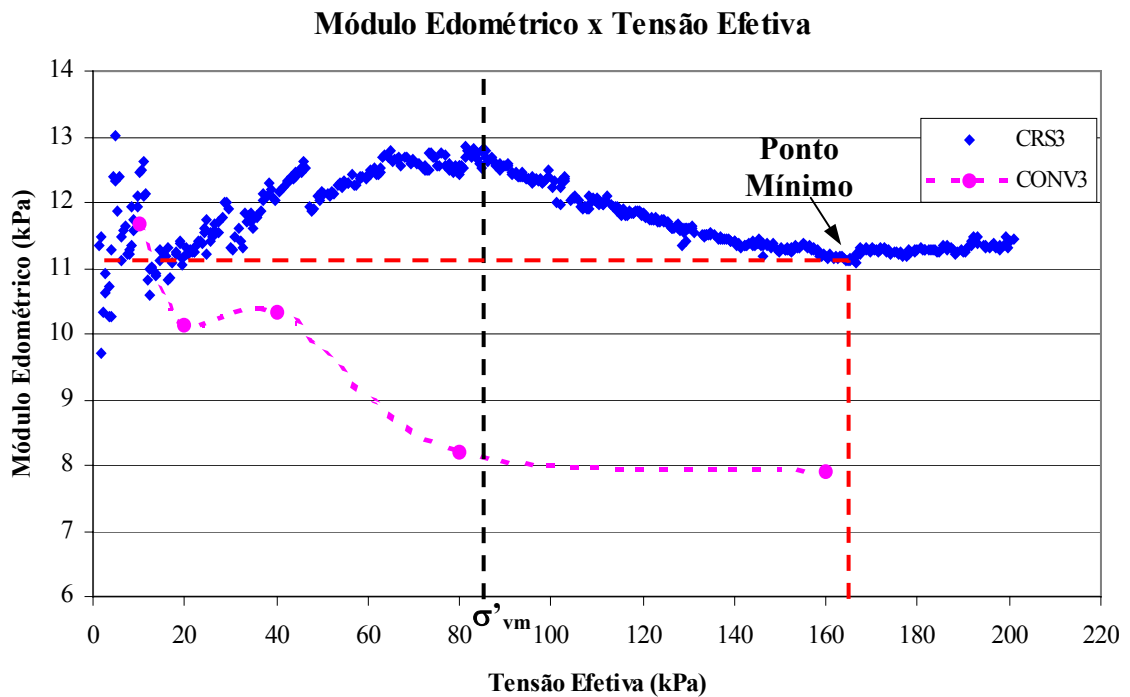
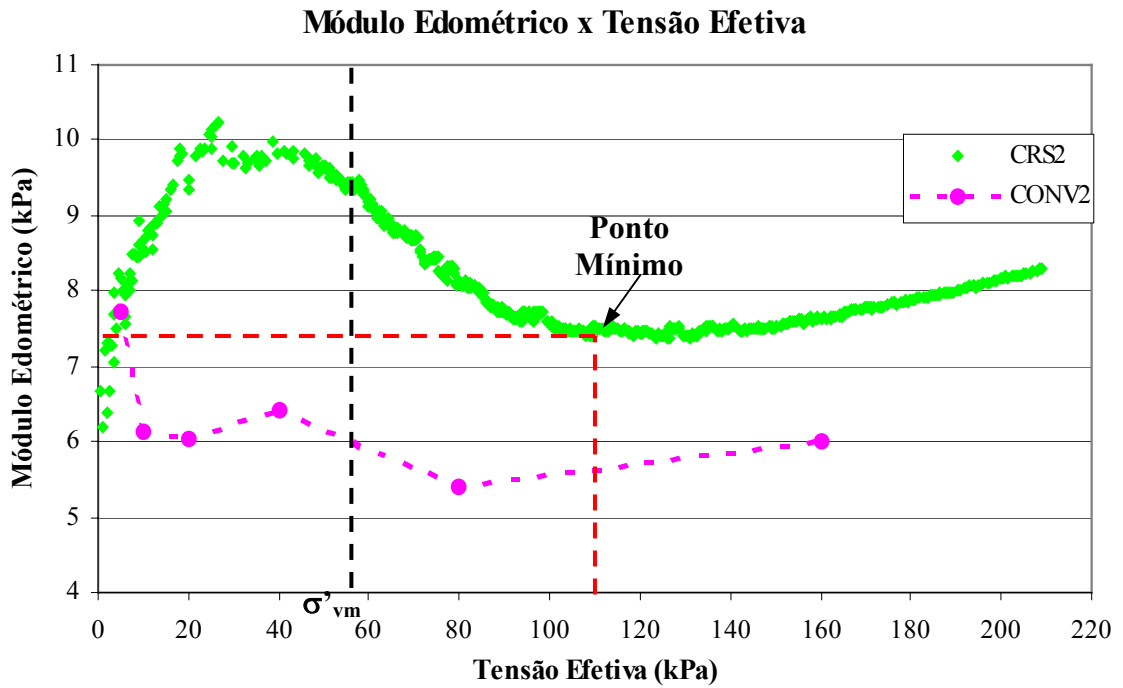
Assim como já havia sido constatado nos ensaios exploratórios, as curvas “D x  $\sigma_v'$ ” nos ensaios finais mostraram bons resultados, obtendo-se boa convergência de valores quando ultrapassada a tensão de pré-adensamento.

Uma mesma tendência dessas curvas ocorre quando comparadas às obtidas nos ensaios convencionais, porém com uma estimativa maior nos resultados obtidos no CRS, como mostram as figuras 5.25, 5.26 e 5.27.

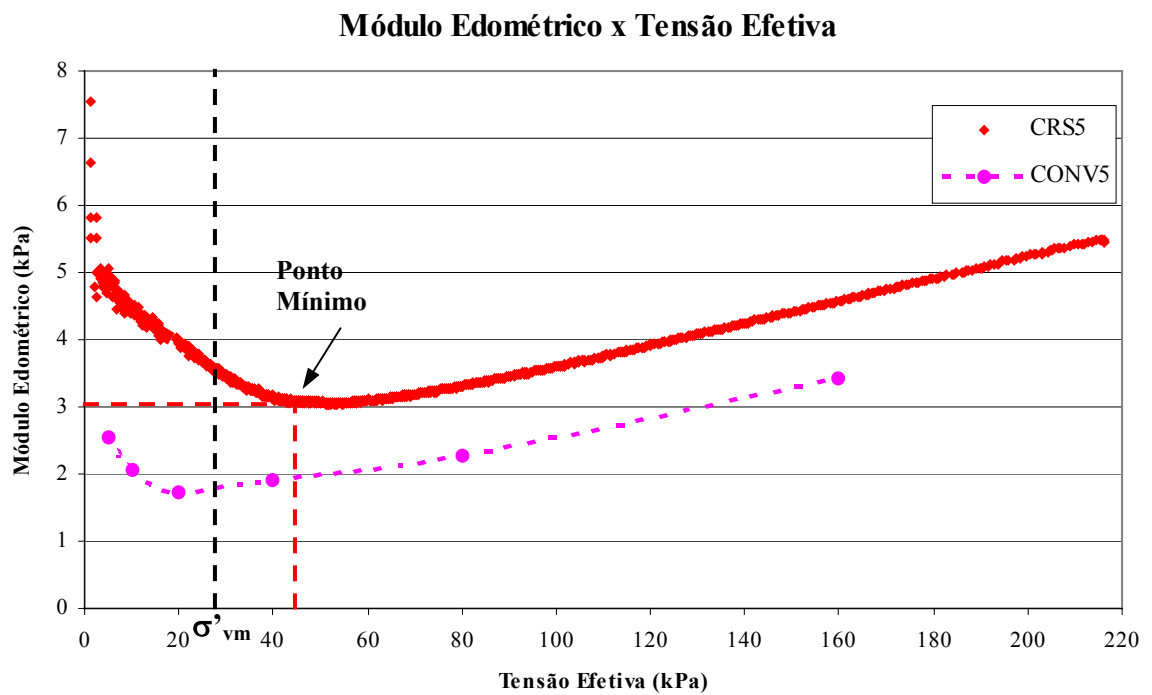
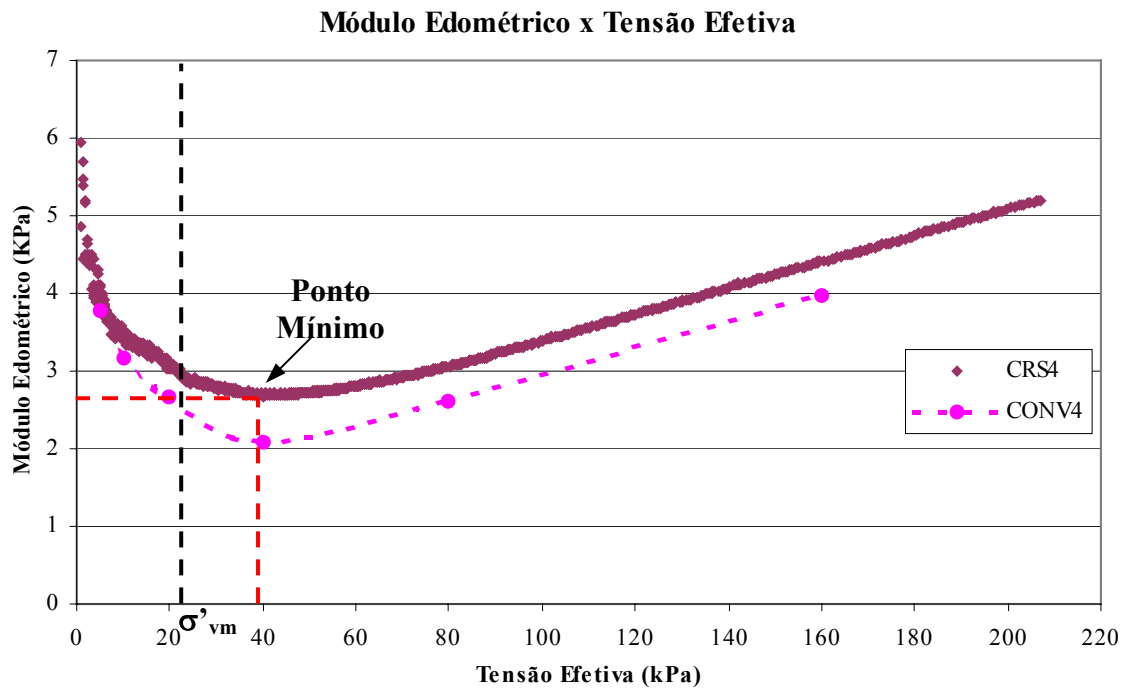
Para o ensaio CRS1 os valores de D encontraram-se na faixa de 6 kPa a 12 kPa. Para o ensaio CRS2 os valores de D ficaram entre 6 kPa e 10 kPa. Já para o ensaio CRS3, onde a amostra mostrou ser mais rígida, os valores de D foram superiores em relação aos anteriores nos quais encontraram-se entre 11 kPa e 13 kPa. Já para o ensaio CRS4, no qual o material é mais plástico e compressível, os valores foram inferiores em relação aos anteriores, ficando na faixa de 3,5 kPa, chegando a 5,2 kPa no final do ensaio. No ensaio CRS5, devido às características do material serem semelhantes às do material do CRS4, os valores de D foram similares.



**Figura 5.25 - Curva “D x  $\sigma_v'$ ” obtida no ensaio CRS1 e CONV1**

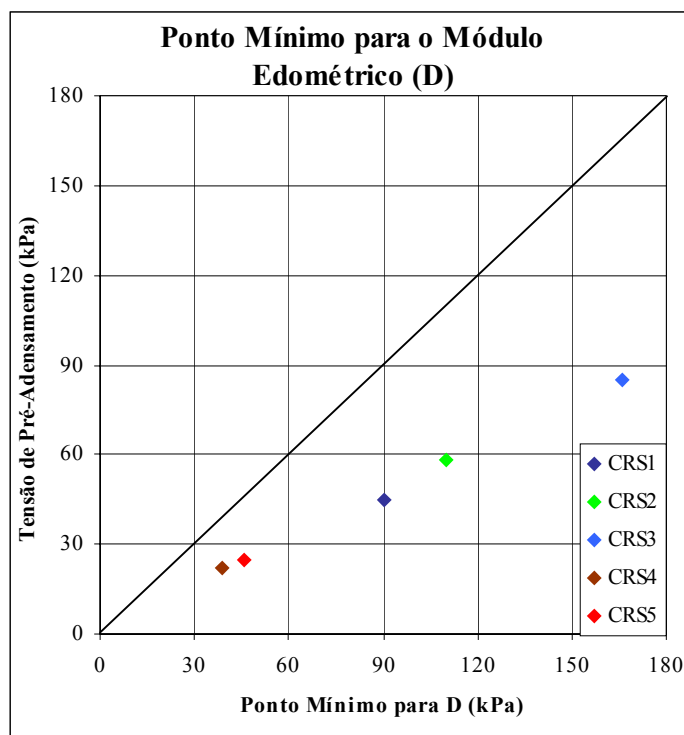


**Figura 5.26 - Curvas “D x  $\sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS2, CONV2 e CRS3, CONV3**



**Figura 5.27 - Curvas “D x  $\sigma_v'$ ” obtidas nos ensaios CRS4, CONV4 e CRS5, CONV5**

Os valores mínimos de D, que foram aqui chamados de Ponto Mínimo, mostrados nas figuras 5.25, 5.26 e 5.27, encontraram-se, em todos os ensaios, acima da tensão de pré-adensamento, não seguindo a tendência apresentada por Head (1986), reproduzida na figura 2.8. Segundo o autor, os valores mínimos de D encontram-se próximos à tensão de pré-adensamento. A figura 5.28 mostra os Pontos Mínimos dos módulos edométricos D verificados no presente trabalho.



**Figura 5.28 – Valores do Ponto Mínimo verificados nos ensaios CRS**

Poucos são os autores que relatam sobre resultados obtidos para D nos ensaios CRS na literatura. As curvas aqui apresentadas são semelhantes, em relação às tendências, às obtidas nos experimentos realizados por Alborta (1997), mesmo que o material utilizado por esse autor apresentasse características bastante diferentes dos utilizados nesse trabalho.

#### 5.1.2.7 Razão $u_b/\sigma_v$

A magnitude da razão  $u_b/\sigma_v$  é responsável pela obtenção de bons resultados de coeficientes de adensamento e de boas curvas tensão-deformação que sejam representativas do solo ensaiado em um intervalo de tempo o menor possível. É

importante salientar que o valor máximo de  $u_b/\sigma_v$  deve satisfazer a hipótese de distribuição parabólica de poro pressão ao longo do corpo de prova.

Como apresentado no capítulo 2, há uma diversidade de intervalos de valores da razão  $u_b/\sigma_v$  sugeridos por diferentes autores. A discrepância em certos casos é bastante grande. Por exemplo, a sugestão de Wissa et al. (1971) é de que essa faixa de valores de  $u_b/\sigma_v$  deve ser de 2% a 5%, enquanto que Gorman et al. (1978) atribuem intervalos de valores de 30% a 50%, assim como Smith e Wahls (1969) que limitaram o valor dessa razão em 50%.

As figuras 5.29 e 5.30 mostram os valores da variação de  $u_b/\sigma_v$  verificados nos ensaios (CRS1, CRS2, CRS3, CRS4 e CRS5) apresentados através das curvas “ $u_b/\sigma_v$  x  $\sigma'_v$ ”.

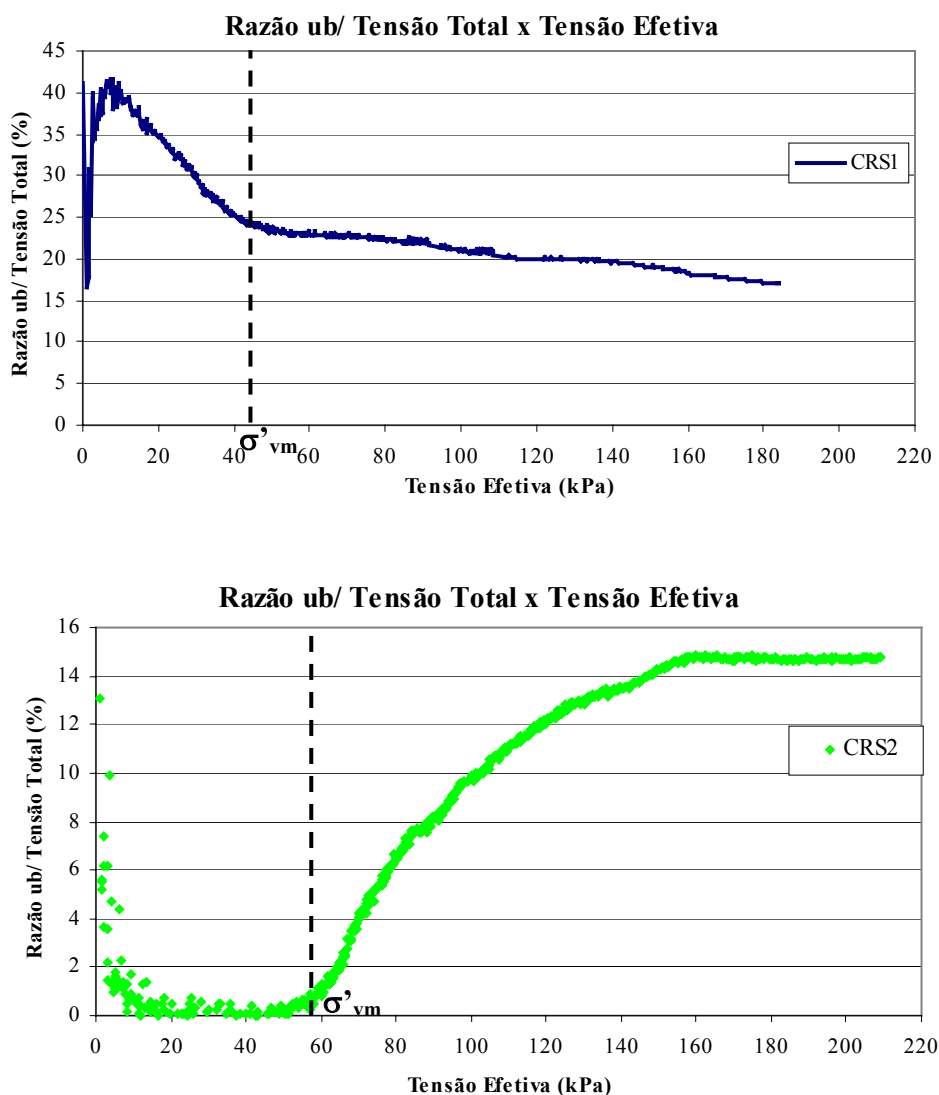
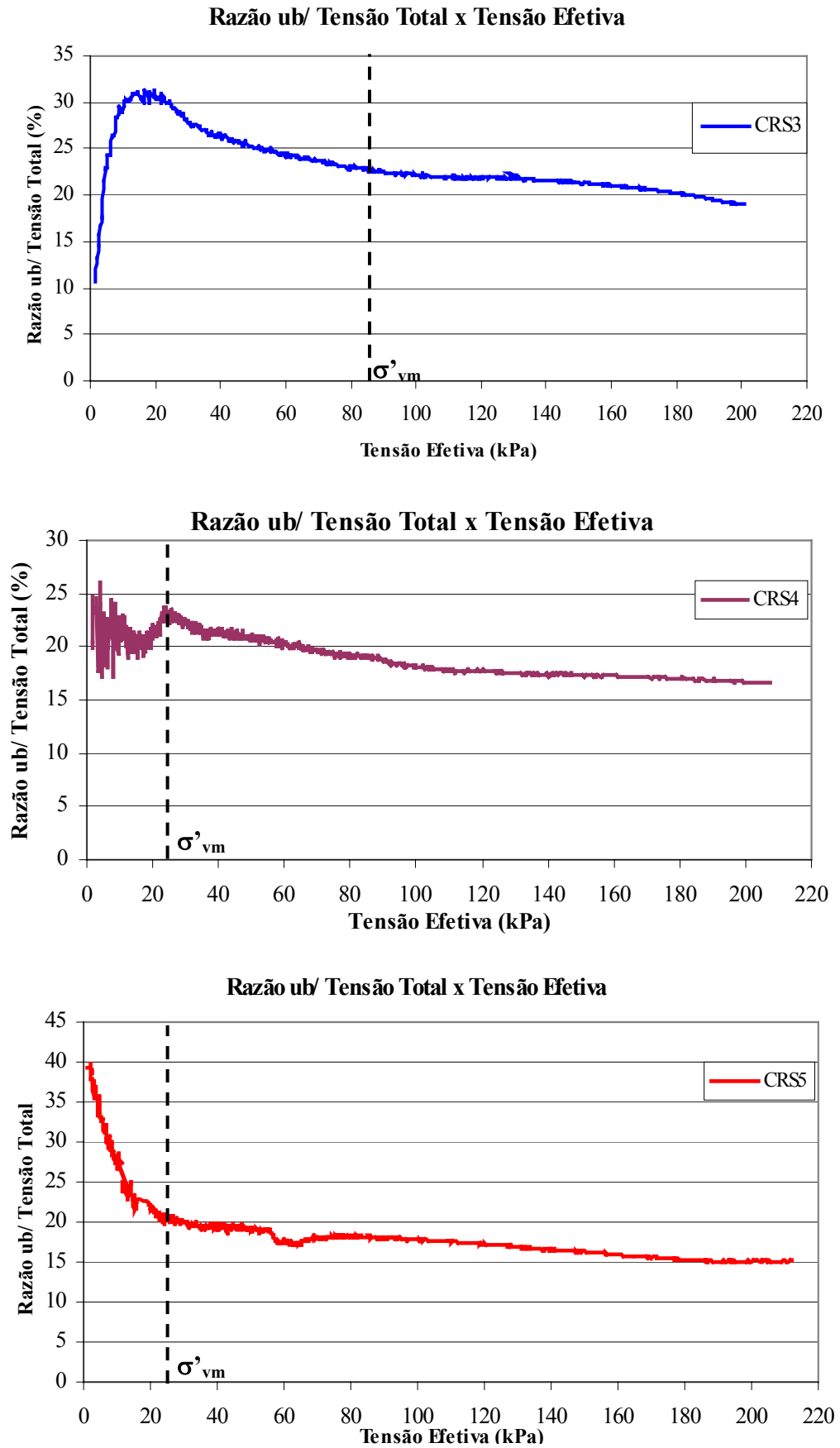


Figura 5.29 - Curvas “ $u_b/\sigma_v$  x  $\sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS1 e CRS2



**Figura 5.30 - Curvas “ $u_b/\sigma_v \times \sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS3, CRS4 e CRS5**

O valor máximo encontrado para  $u_b/\sigma_v$  foi de 41% verificado no ensaio CRS1 logo no começo do mesmo. No ensaio CRS2 esse valor atingiu 15%. No ensaio CRS3 o valor máximo verificado foi de 31% na fase inicial, decrescendo gradualmente até o valor de 19% ao final do ensaio. No ensaio CRS4 os valores máximos atingiram 26% chegando a 16,5% na fase final. Por fim, no ensaio CRS5 o valor de  $u_b/\sigma_v$  atingiu 40% no início chegando a 15% na fase final. Vale lembrar que a velocidade de deformação aplicada nesses ensaios foi sempre a mesma ( $v= 0,006$  mm/min).

Para todos os ensaios obtiveram-se bons resultados tanto para os coeficientes de adensamento como para as curvas tensão-deformação, assim como para os demais parâmetros de adensamento, mesmo para o ensaio que alcançou o valor mais elevado dessa razão (41%). Isso é coerente com valores citados na literatura tendo em vista que o limite estipulado por alguns autores é de 50%. Porém, o limite máximo dessa razão verificado nos ensaios (com exceção do CRS2) ultrapassa a faixa estipulada pela norma ASTM D4186 – 98 que limita a razão  $u_b/\sigma_v$  a uma taxa de 30%, mostrando ser, no mínimo, um pouco conservadora. Carvalho (1989) e Alborta (1997) afirmam que a taxa de variação de  $u_b/\sigma_v$  deve variar de acordo com o tipo de solo ensaiado e com seu histórico de tensões, considerando a deformabilidade esperada para um certo nível de tensões efetivas. O primeiro obteve taxas de  $u_b/\sigma_v$  que alcançaram 32% em seus experimentos. Já os ensaios realizados pelo segundo autor desenvolveram variações mais elevadas da razão  $u_b/\sigma_v$ , chegando a 80%, e mesmo assim mostraram bons resultados.

## 5.2 Influência da Velocidade de Deformação na obtenção dos Parâmetros de Adensamento nos Ensaio CRS

Com o objetivo de verificar a influência da velocidade de deformação na obtenção dos parâmetros de adensamento foram realizados 3 ensaios (CRS5, CRS6 e CRS7) com diferentes velocidades de deformação, sendo que todas as amostras foram extraídas do mesmo tubo amostrador (amostra de Florianópolis, sondagem I-04, profundidade de 4,50 a 5,05 m). A tabela 5.7 mostra as diferentes velocidades utilizadas nesses ensaios com os respectivos tempos de duração de cada um.

**Tabela 5.7 – Velocidades de deformação utilizadas nos ensaios CRS e seus respectivos tempos de duração**

Ensaio	Velocidade de Deformação (mm/min)	Tempo de duração (horas)
CRS5	0,006	22,0
CRS6	0,009	13,6
CRS7	0,015	8,0

Alguns autores já se dedicaram a estudos cujo objetivo foi de verificar a influência da velocidade de deformação aplicada na obtenção de parâmetros de adensamento em ensaios CRS (e.g. Crawford (1965), Sällfors (1975), Lerouiel (1985), Alborta (1997)), chegando todos a conclusões semelhantes, afirmando que há influência da velocidade de deformação aplicada na obtenção dos resultados, principalmente no que diz respeito às tensões de pré-adensamento e às relações tensão-deformação, ou seja, para maiores velocidades de deformação, maior o valor da tensão de pré-adensamento.

A partir dos ensaios realizados nessa dissertação, os resultados obtidos seguem essa tendência verificada na literatura.

Através das curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos 3 ensaios (figura 5.31) percebe-se que os índices de vazios iniciais das amostras são bastante similares entre elas. Neste caso, as amostras foram extraídas do shelby na mesma época, sem influência da perda de umidade.



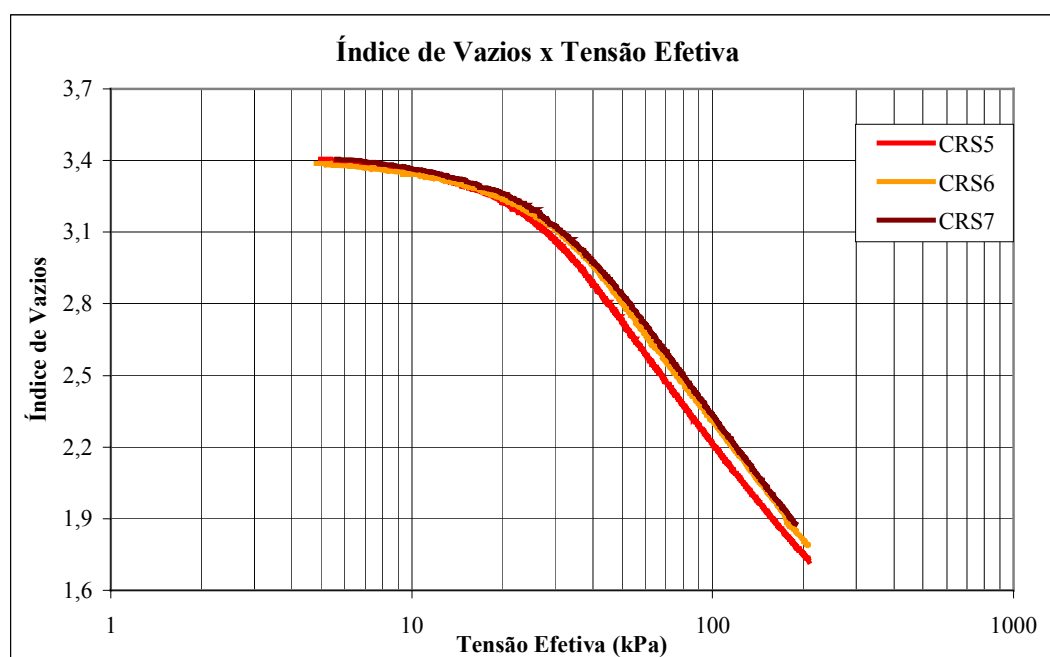


Figura 5.31 – Curvas “ $e \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7

Pela análise das curvas da figura 5.31, nota-se que há uma sobreposição dessas curvas no trecho de recompressão das amostras. Porém, quando se atingem as tensões de pré-adensamento, essas curvas tendem a afastarem-se, embora não muito, com tendência a curvaturas mais abertas para velocidades de deformação maiores.

Como consequência, as tensões de pré-adensamento estimadas mostram-se, aparentemente, dependentes da magnitude da velocidade aplicada, tornando-se maiores à medida que se aumenta esse fator, com uma diferença relativamente pequena. A figura 5.32 mostra as tensões de pré-adensamento estimadas nos 3 ensaios.

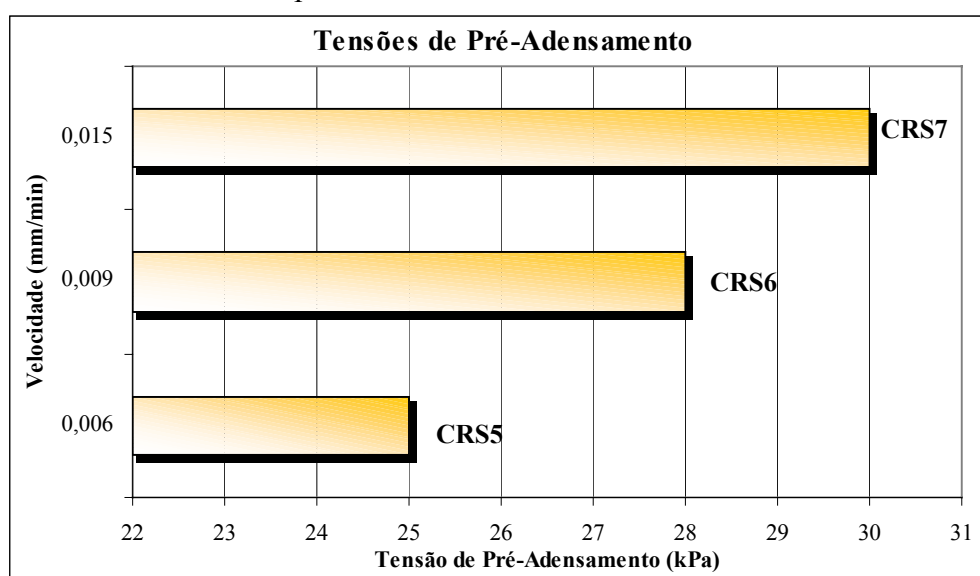
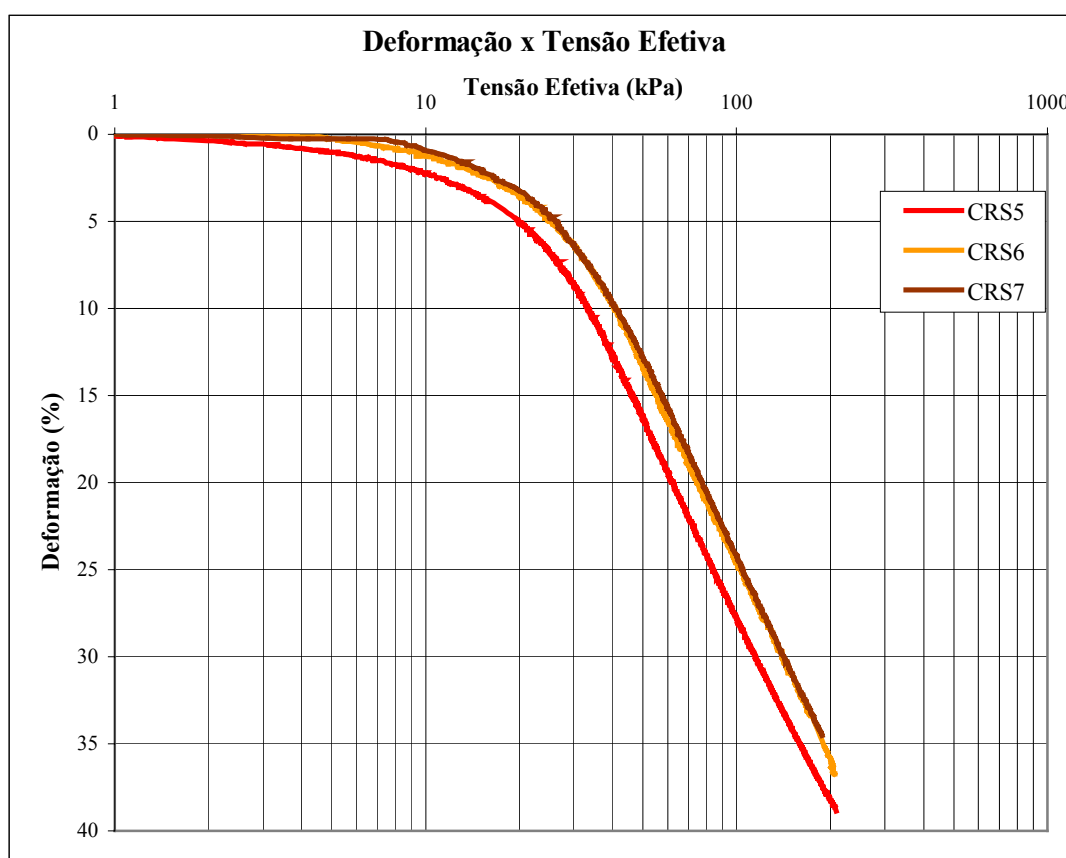


Figura 5.32 – Tensões de pré-adensamento determinadas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7

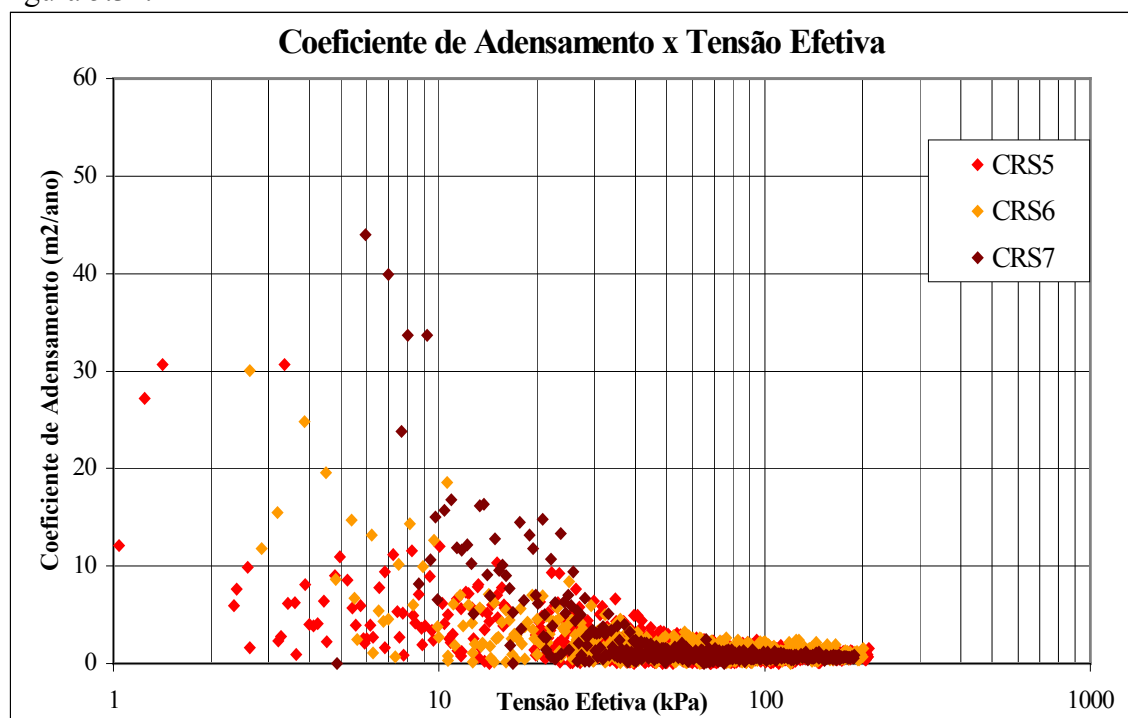
Para a velocidade de deformação de 0,006 mm/min, a tensão de pré-adensamento encontrada foi de 25 kPa, aumentando com o acréscimo da velocidade de deformação aplicada. Para  $v = 0,009$  mm/min, o valor de  $\sigma'_{vm}$  foi de 28 kPa e para  $v = 0,015$  mm/min,  $\sigma'_{vm}$  foi de 30 kPa.

As curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram uma relação entre o aumento da deformação com o decréscimo da velocidade de deformação aplicada. Para taxas menores de velocidade aplicada, como foi o caso do ensaio CRS5 houve uma maior deformação em relação às outras duas, que se encontraram praticamente sobrepostas, com uma diferença pequena, porém superior para o ensaio CRS6. Essa tendência verificou-se também na reta virgem, comprovando que, para menores velocidades aplicadas, há uma magnitude maior de deformação para um mesmo nível de tensões efetivas. Essa verificação é clara ao comparar a curva do ensaio CRS5 com as dos ensaios CRS6 e CRS7. Essas duas últimas mantiveram-se praticamente sobrepostas até o final dos experimentos. A figura 5.33 mostra as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos três ensaios.



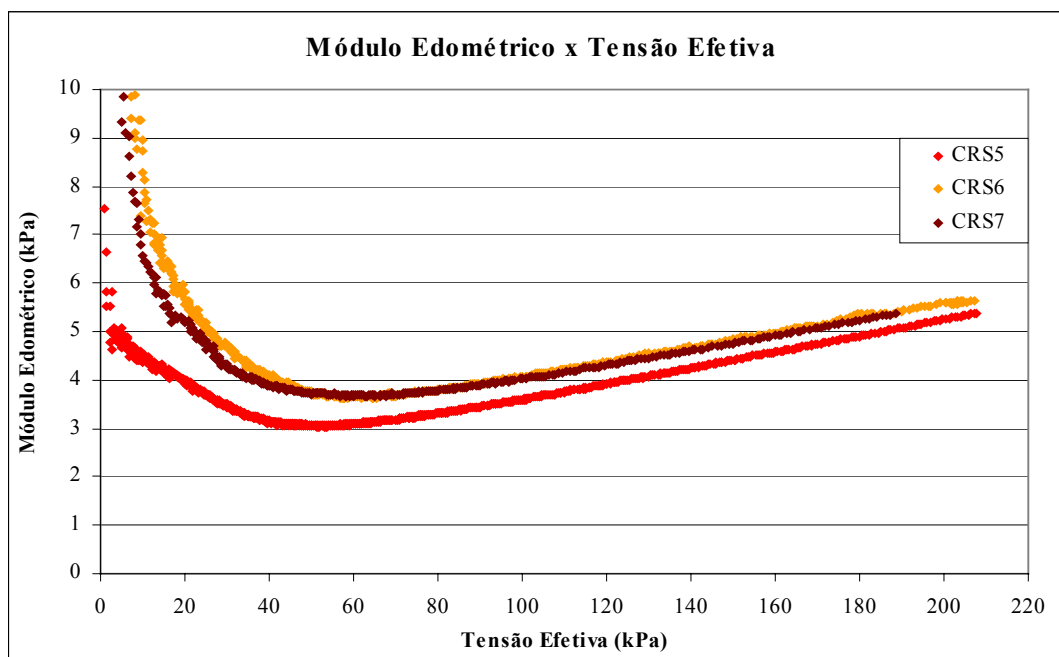
**Figura 5.33 - Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7**

Os valores obtidos para os coeficientes de adensamento parecem não ser influenciados pela velocidade de deformação aplicada, verificando-se um comportamento similar mostrado pelos gráficos “ $C_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, como mostra a figura 5.34.



**Figura 5.34 – Valores de  $C_v$  verificados nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7**

Os valores obtidos para o módulo edométrico nos três ensaios foram bastante semelhantes (figura 5.35). Para tensões efetivas abaixo de  $\sigma'_{vm}$ , os valores de  $D$  aumentaram com o aumento dos valores da velocidade de deformação, quando comparados o ensaio CRS5 com os outros dois subsequentes, mostrando que a velocidade de deformação aplicada pouco influi na obtenção desse parâmetro para tensões maiores que  $\sigma'_{vm}$ . Essa constatação também foi ressaltada por Wissa et al. (1971).



**Figura 5.35 – Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7**

No que diz respeito à poro pressão gerada na base, verificou-se que há um aumento de  $u_b$  com o acréscimo da velocidade de deformação. Essa característica foi mencionada também nos trabalhos de Crawford (1965), Sällfors (1975), Leroueil (1985) e Carvalho (1989). Através da análise da figura 5.36 observa-se que no ensaio com velocidade de deformação inferior (CRS5) houve menor geração de  $u_b$  na base, chegando a pouco mais de 35 kPa no final do ensaio. Já para o ensaio em que a velocidade de deformação aplicada foi a mais elevada (CRS7), os valores de  $u_b$  chegaram a 73 kPa. Isso implica em dizer que a geração de poro pressão na base do corpo de prova é um fator diretamente proporcional à velocidade de deformação. Com o aumento da velocidade de deformação, o corpo de prova tende a adensar mais rapidamente do que para velocidades mais baixas, de tal forma que não haja tempo suficiente para a conclusão da dissipação de poro pressão correspondente a um incremento de  $\sigma'_v$  na unidade de tempo, quando um novo incremento, consecutivamente, já está sendo aplicado.

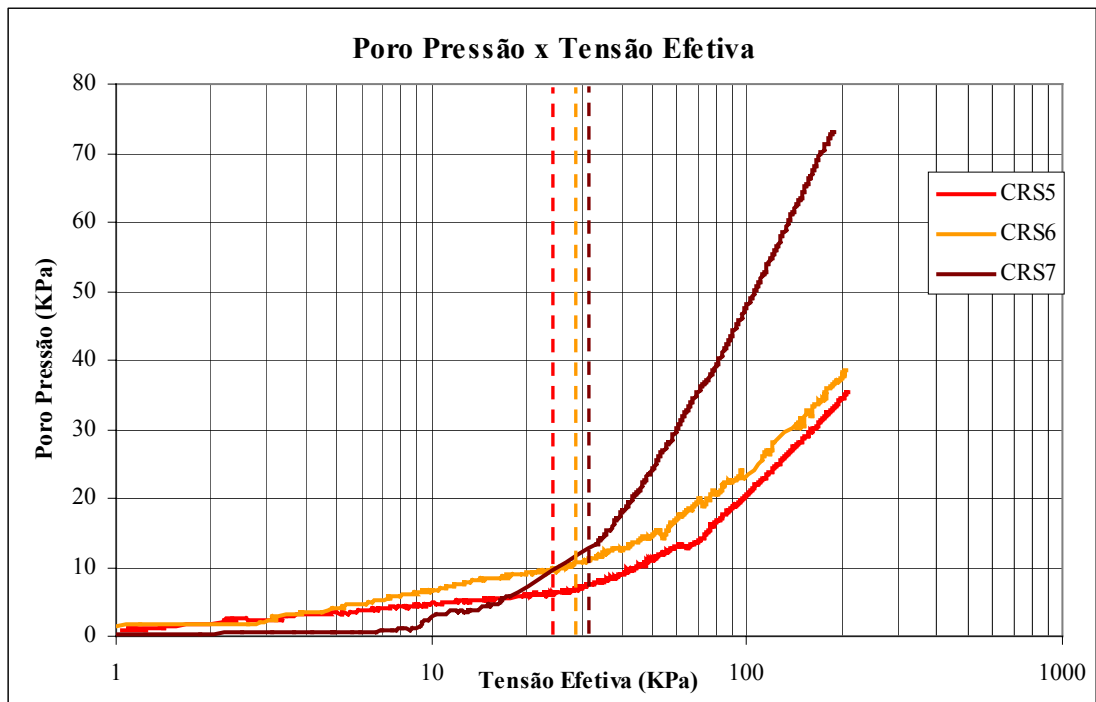


Figura 5.36 – Curvas “ $u_b \times \sigma'_v$  (esc. log)” obtidas nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7

A razão  $u_b/\sigma'_v$  apresentou valor máximo de 50% no ensaio CRS6. No CRS5 essa razão atingiu valor máximo de 40% e no CRS7 foi de 38%, como mostra a figura 5.37.

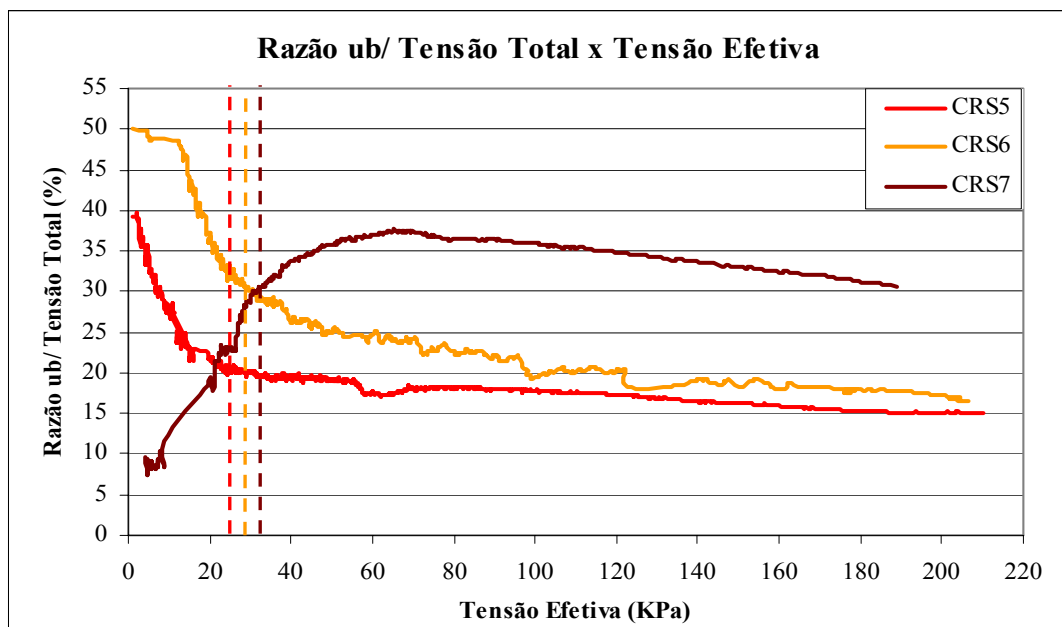


Figura 5.37 – Variações de  $u_b/\sigma'_v$  com  $\sigma'_v$  nos ensaios CRS5, CRS6 e CRS7

### **5.3 Síntese dos Resultados**

Para uma melhor visualização global dos resultados obtidos em todos os ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação, a tabela 5.8 mostra os valores dos principais parâmetros de adensamento obtidos nesses ensaios. Essa tabela mostra também os resultados obtidos nos ensaios convencionais para fins comparativos.

**Tabela 5.8 – Resumo dos parâmetros de adensamento obtidos nos ensaios CRS**

Ensaio	$\sigma'_{vm}$ (kPa)	$e_0$	Cr	Cc	Vel. (mm/min)	$C_v$ (m <sup>2</sup> /ano)							D (kPa)	$u_b$ (max) (kPa)	$u_b/\sigma_v$ (max) (%)
						Intervalos de Tensões Efetivas (kPa)									
						0-5	5-10	10-20	20-40	40-80	80-160	160-200			
CRS1	45 (35)	2,09 (2,18)	0,160 (0,194)	0,967 (1,120)	0,006	0,2- 44,0 (1,91)	0,30- 17,0 (2,36)	0,15- 9,50 (1,69)	0,15- 5,60 (0,86)	0,10- 3,10 (0,22)	0,07- 2,45 (1,41)	0,06- 1,12	6-12	35	41
CRS2	58 (45)	2,19 (2,27)	0,167 (0,209)	1,068 (1,179)	0,006	22,5- 147,0 (4,88)	20,4- 104,0 (4,64)	94,0- 107,0 (3,97)	87,0- 99,0 (4,02)	0,88- 146,0 (0,76)	0,15- 4,30 (0,27)	0,10- 1,90	6-10	35	15
CRS3	85 (60)	2,06 (2,14)	0,160 (0,185)	0,850 (1,000)	0,006	6,50- 36,20 (0,75)	3,80- 15,30 (0,34)	3,0- 9,40 (0,19)	1,80- 7,10 (0,20)	0,60- 6,20 (0,18)	0,25- 2,30 (0,13)	0,07- 1,40	11-13	45	31
CRS4	22 (18)	3,52 (3,65)	0,333 (0,451)	1,533 (1,775)	0,006	1,52- 84,0 (2,91)	0,60- 25,2 (2,27)	0,40- 13,6 (0,74)	0,20- 9,80 (0,23)	0,10- 3,30 (0,21)	0,05- 1,50 (0,21)	0,05- 1,10	3,5-5,2	38,5	26
CRS5	25 (22)	3,45 (3,61)	0,365 (0,543)	1,562 (1,861)	0,006	4,50- 30,6 (3,69)	1,0- 11,50 (1,81)	0,35- 10,30 (2,17)	0,15- 9,10 (0,29)	0,10- 3,40 (0,16)	0,05- 1,70 (0,12)	0,05- 1,30	3,0-6,0	35,2	40
CRS6	28 (22)	3,41 (3,61)	0,333 (0,543)	1,528 (1,861)	0,009	4,80- 30,0 (3,69)	0,70- 14,7 (1,81)	0,30- 7,0 (2,17)	0,20- 7,0 (0,29)	0,10- 3,10 (0,16)	0,04- 1,90 (0,12)	0,04- 1,20	6,5-10	38,6	50
CRS7	30 (22)	3,42 (3,61)	0,366 (0,543)	1,577 (1,861)	0,015	4,0- 43,50 (3,69)	9,80- 39,0 (1,81)	1,80- 16,70 (2,17)	0,70- 13,0 (0,29)	0,20- 2,20 (0,16)	0,20- 1,30 (0,12)	0,05- 1,20	6,5-10	73	38

( ) Valores obtidos nos ensaios convencionais

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes dos ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação realizados nesse estudo, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 6.1 Conclusões

Mediante os resultados obtidos, serão apresentadas as conclusões finais tendo como meta o cumprimento dos objetivos propostos nesta Dissertação.

- i. Para os solos ensaiados no novo equipamento, obtiveram-se bons resultados nos ensaios CRS, com intervalos de tempo de duração que se encontraram entre 8 e 22 horas.
- ii. Através da análise da equação que determina os valores de  $C_v$  para os ensaios CRS, verificou-se que esse parâmetro é extremamente sensível às dispersões ocorridas nas leituras do transdutor de poro pressão, mostrando a necessidade da utilização de um transdutor com boa precisão.
- iii. A proposta de Armours e Drnevich (1986), para determinação da velocidade de deformação aplicada nos ensaios CRS, foi a que mais se aproximou dos valores reais das velocidades utilizadas nos ensaios, mostrando ser, no caso desse estudo, a mais racional na determinação da velocidade nos ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação.
- iv. Os valores dos índices de recompressão ( $C_r$ ) e compressão ( $C_c$ ) foram superiores nos ensaios convencionais em relação aos obtidos nos ensaios CRS.
- v. As tensões de pré-adensamento verificadas nos ensaios CRS foram superiores às estimadas nos ensaios convencionais.
- vi. Os valores dos coeficientes de adensamento, no trecho de compressão da amostra, mostraram-se similares com os provenientes dos ensaios convencionais.



- vii. Os resultados comprovam a eficácia do ensaio CRS na obtenção das relações “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)”, mostrando curvas de boa qualidade e bem definidas, mesmo no ensaio em que se obteve a maior magnitude da razão  $u_b/\sigma_v$  (CRS1).
- viii. Nos ensaios em que foram aplicadas as mesmas velocidades de deformação ( $v=0,006$  mm/min), o valor máximo atingido para a razão  $u_b/\sigma_v$  foi de 41%.
- ix. A velocidade de deformação aplicada nos ensaios CRS mostrou maior influência em alguns parâmetros de ensaio.
- x. Os valores determinados para as tensões de pré-adensamento aumentaram com o aumento da velocidade aplicada.
- xi. As curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$  (esc. log)” mostraram-se influenciadas pela velocidade de deformação. Para taxas menores de velocidade aplicada, como foi o caso do ensaio CRS5, houve uma maior deformação, para um mesmo nível de tensões efetivas, em relação às outras duas (CRS6 e CRS7), que se encontraram praticamente sobrepostas.
- xii. Tanto os valores dos coeficientes de adensamento, como os do módulo edométrico, mostraram ser pouco influenciados pela velocidade de deformação aplicada.
- xiii. Quanto à poro pressão gerada na base, para diferentes velocidades aplicadas, verificou-se que há um aumento de  $u_b$  com o acréscimo da velocidade de deformação.
- xiv. Através da análise, em geral, dos resultados obtidos, verificou-se a eficácia do novo equipamento desenvolvido, mostrando que o ensaio CRS, por ser mais rápido e automatizado, é uma boa alternativa para a realização de ensaios de adensamento.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento desse trabalho, surgiram novas idéias, que ficam como recomendações para futuras pesquisas.

- i. Proceder a ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação com solos moles provenientes de outras localidades de Santa Catarina e comparar com os resultados obtidos nesse estudo.
- ii. Realizar ensaios de adensamento com velocidade controlada de deformação com ciclo de carga e descarga.
- iii. Como sugestão final, pode-se indicar estudos que utilizem cada vez mais os ensaios CRS, a fim de aumentar a experiência brasileira nessa tecnologia que produz resultados rápidos e confiáveis, possibilitando agilidade nas decisões de obras e projetos geotécnicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOSHI, H., YOSHIKUMI, H., MURAYMA, S. (1970). **Constant Loading Rate Consolidation Test**. Soils and Foundation. Vol. 10, n.1, p159-164.
- ALBORTA, F. L. (1997). **Constant Rate of Strain Tests on Reconstituted Clay: a Parametric Study**. M.Sc Thesis. Ghent University. Belgium.
- ALMEIDA, M. S. S. (1996). **Aterros sobre Solos Moles: da Concepção à Avaliação do Desempenho**. Editora UFRJ. 216p. Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, M. S. S. (1988). **Ensaio Especiais de Adensamento**. Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em Geotecnia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COOPE/UFRJ. Vol. 1. Rio de Janeiro.
- ALMEIDA, M. S. S.; FERREIRA, C. A. M. (1993). **Consolidation Parameters of a Very Soft Clay from Field in situ Tests and Laboratory Tests**. Revista Solos e Rochas, v.16, n.1, p.47-67. ABMS/ABGE. São Paulo.
- ARMOUR, D. W., DRNEVICH, V. P. (1986). **Improved Techniques for the Constant Rate of Strain Consolidation Test**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. R.N. Yong and Townsend. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, p.170-183.
- ASTM. (1998). **Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled Strain Loading**. D4186. American Society of Testing and Materials. Philadelphia.
- BAPTISTA, H. M. (1998). **Ensaio de Campo e Laboratório na Argila Mole da Enseada do Cabrito, Salvador, Bahia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/ RJ. Rio de Janeiro.
- BARBOSA, P. S. A; ALMEIDA, M. S. S.; SILLS, G. C. (1993). **Ensaio de Adensamento de Fluxo Restringido na Argila do Sarapuí**. Revista Solos e Rochas, v.16, n.4, p.305-312. ABMS/ABGE. São Paulo.
- BJERRUM, J. (1973). **Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils Collapsible, Expansive and Others**. In: Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 8. Moscow. Proceedings... Rotterdam: A. A. Balkema, v.3, p111-159.
- BURGHIGNOLI, A. (1979). **An Experimental Study of the Structural Viscosity of Clays by Means of Continuous Consolidations Tests**. In: 7<sup>th</sup> European Conference of Soils Mechanics and Foundation. v.2, p.23-28. Brighton.
- CARVALHO, S. R. L. (1989). **Ensaio de Adensamento Edométrico com Taxa de Deformação Específica Relacionada ao Tempo na Argila do Sarapuí**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

CARVALHO, S. R. L.; ALMEIDA, M. S. S.; MARTINS, I. S. M. (1993). **Ensaio de Adensamento com Velocidade Controlada: Proposta de um Método para Definição da Velocidade.** Revista Solos e Rochas, v.16, n.3, p.185-196. ABMS/ABGE. São Paulo.

CASAGRANDE, A. (1936). **The Determination of Preconsolidation Load and its Practical Significance.** In: Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge. Proceedings... Cambridge: Harvard University, Graduate School of Engineering, 3v. v.3, p60-64.

CRAWFORD, C. B. (1964). **Interpretation of the Consolidation Test.** Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. ASGE, vol.90, p.93-108.

CRAWFORD, C. B. (1965). **Resistance of Soil Structure to Consolidation.** Canadian Geotechnical Journal. Vol.2, p.90-115.

CRAWFORD, C. B. (1986). **State of the Art: Consolidation Testing.** Philadelphia, F. C. Townsend/R. N. Yang, ASTM. p.71-103. Consolidation of soils: testing and evolution.

FRANÇA JÚNIOR, R. T. (2002). **Levantamento de Dados e Informações para Mapeamento Geotécnico da Área Urbana de Joinville.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis.

GORMAN, C. T., HOPKINS, T. C., DRNEVICH, V. P. (1978). **Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Testing.** Geotechnical Testing Journal, ASTM. Vol.1, n.1,p3-15.

HAMILTON, J. J., CRAWFORD, C. B. (1959). **Improved Determination of Preconsolidation pressure of a Sensitive Clay.** Symposium on Time Rates of Loading in Soil Testing. America Society for Testing and Materials, p.254-271.

HEAD, K. H. (1986). **Manual of soils Laboratory Test.** ELE International Limited. Vol.3. Effective Stress Tests. London.

JANBU, N., TOKHEIN, O., SENNESET, K. (1981). **Consolidation Tests with Continuous Loading.** Proceedings: X Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.1, p. 645-654. Estocolmo.

JAMIOLKOWSKI, M., LADD, C. C., GERMAINE, T. T., LANCELLOTA, R. (1985). **New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils.** Proceedings, XI Int. Conf. On Soil Mech. and Found. Engineering. San Francisco, vol.2, pp 1-97.

KASSIN, A. K., CLARKE, B. G. (1999). **Constant Rate of Strain Consolidation Equipment and Procedure for Stabilized Soils.** Geotechnical Testing Journal, vol. 22, p. 13-21.

LADD, C. C. (1971). **Settlement Analysis for Cohesive Soils.** MIT Research, Report R71-2, Soils Publication 272.

LARSSON, R., SÄLLFORS, G. (1986). **Automatic Continuous Consolidation Testing in Sweden**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. R.N. Yong and Townsend. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, p.299-328.

LEROUEIL, S., SAMSOM, L., BOZOZUK, M. (1983). **Laboratory and Field Determination of Preconsolidation Pressures at Gloucester**. Canadian Geotechnical Journal. Vol.20, n.3. p. 477-490.

LEROUEIL, S., KABBAJ, M., TAVENAS, F. (1985). **Study of the Validity of a  $\sigma'_v$ - $\epsilon_v$ - $\epsilon_v$  Model *in situ* Conditions**. Soils and Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol.28, p.13-25.

LEROUEIL, S. (1996). **Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., ASCE. vol. 122, n.7, p.534 – 543.

LEROUEIL, S., HIGHT, D. W. (2002). **State of the Art: Behaviour and Properties of Natural Soils and Soft Rocks**. Characterization and Engineering Properties of Natural Soils – Tan et al. (eds.). Volume 1. Swets & Zeitlinger, Lisse.

LOWE, J., JONES, E., OBRICIAN, V. (1969). **Controlled Gradient Consolidation Test**. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. Vol.95, p77-97.

MARQUES, M. E. S. (1996). **Influência da Velocidade de Deformação e Temperatura no Adensamento de Argilas Naturais**. (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.

MARTINS, I. S. M.; LACERDA, W. A. (1994). **Sobre a Relação Índice de Vazios – Tensão Vertical Efetiva na Compressão Unidimensional**. Revista Solos e Rochas, v.17, n.3, p.157-166. ABMS/ABGE. São Paulo.

MASSAD, F. (1999) **Baixada Santista: Implicações da História Geológica no Projeto de Fundações**. Conferência Pacheco Silva. Revista Solos e Rochas, v.22, n.1, p3-49. ABMS/ABGE. São Paulo.

OLSON, R. E. (1986). **State of the Art: Consolidation Testing**. Philadelphia, F. C. Townsend/R. N. Yang, ASTM. p.7-50. Consolidation of soils: testing and evolution.

PACHECO SILVA, F. (1970). **Uma Nova Construção Gráfica para a Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 4. Guanabara. Anais... v.2, p.219-223.

RAJU, P. S. R.; PANDIAN, N. S.; NAGARAJ, T. S. (1995). **Analysis and Estimation of the Coefficient of Consolidation**. Geotechnical Testing Journal, vol.8, n.2, p.252-258.

RIBEIRO, L. F. M. (1992). **Ensaio de Laboratório para Determinação das Características Geotécnicas das Argilas de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

ROWE, P. W. (1972). **The Relevance of Soil Fabric to Site Investigation Practice**. 1972. *Geotechnique*, vol. 22, n. 2, p.195.

SANTOS, G. T. (1997). **Integração de Informações Pedológicas, Geológicas e Geotécnicas Aplicadas ao Uso do Solo Urbano em Obras de Engenharia**. 209p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

SÄLLFORS, G. (1975). **Preconsolidation Pressure of Soft High Plastic Clays**. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology. Suécia.

SANDBAEKKEN, G., BERRE, T., LACASSE, S. (1986). **Oedometer Testing at the Norwegian Geotechnical Institute**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. R.N. Yong and Townsend. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, p.329-353.

SCHIFFMAN, R. L. (1958). **Consolidation of Soil Under Time-Dependent Loading and Variable Permeability**. Highway Research Board. Vol. 37, p354. Washington.

SHEAHAN, T. C., WATTERS, P. J. (1996). **Using an Automated Rowe Cell for Constant Rate of Strain Consolidation Test**. *Geotechnical Testing Journal*, vol.19, n.4, p.354-363.

SHEAHAN, T. C., WATTERS, P. J. (1997) **Experimental Verification of CRS Consolidation Theory**. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, vol. 123, n.5, p. 430-437.

SILLS, G. C., HOARE, S. D., BAKER, N. (1986). **An experimental Assessment of the Restricted Flow Consolidation Test**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. Philadelphia, p.203-216.

SILVA, F. P. (1970). **Uma Nova Construção para Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo**. IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. ABMS, Guanabara, pp. 219 - 223.

SILVESTRINI, V., YONG, R. N., SOULIÉ, M., GABRIEL, F. (1986). **Controlled Gradient and Standard Consolidation Test of Sensitive Clays**. Consolidation of Soils: Testing and Evolution, ASTM STP 892, R. N. Yong and Townsend. American Society of Testing and Materials. Philadelphia, p.433-450.

SMITH, R. E., WAHLS, H. E. (1969). **Consolidation Under Constant Rates of Strain**. *Journal of Soils Mechanics and Foundation Division*, ASCE. Vol.95, p.519-539.

SOARES, J. M. D. (1997). **Estudo do Comportamento Geotécnico do Depósito de Argila Mole da Grande Porto Alegre**. 300p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

TAYLOR, D. W. (1942). Serial 82, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. (1967). **Soil Mechanics in Engineering Practice**. John Wiley. New York.

WAHLS, H. E. (1962). **Analysis of Primary and Secondary Consolidation**. 1962. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, ASCE. Vol.88, p.207-231.

WAHLS, H. E., DEGODOY, N. S. (1965). **Interpretation of Consolidation Test – Discussion**. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division. ASCE. Vol.91, p.147-152.

WISSA, E. Z., CHRISTIAN, J. T., DAVIS, E. H., HEIBERG, S. (1971). **Consolidation at Constant Rate of Strain**. Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, ASCE. Vol.97, p.77-97.