

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RODRIGO FABIANO MONTEMEZZO

**ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO
CONFINADA EM ARGILAS E AREIAS SATURADAS
UTILIZANDO O ENSAIO CRS**

**Porto Alegre
Dezembro - 2005**

RODRIGO FABIANO MONTEMEZZO

**ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO
CONFINADA EM ARGILAS E AREIAS SATURADAS
UTILIZANDO O ENSAIO CRS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia na modalidade Acadêmico.

**Porto Alegre
Dezembro - 2005**

RODRIGO FABIANO MONTEMEZZO

**ESTUDO COMPARATIVO DE ENSAIOS DE COMPRESSÃO
CONFINADA EM ARGILAS E AREIAS SATURADAS
UTILIZANDO O ENSAIO CRS**

Esta dissertação de Mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 16 de dezembro de 2005

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica
P.h.D. pela University of Surrey, U.K.
Orientador

Prof. Luiz Antônio Bressani
P.h.D. pelo Imperial College, London, U.K.
Orientador

Prof. Fernando Schnaid
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Mário Doleys Soares (UFSM)
Dr. pelo programa de Pós-graduação em Engenharia/UFRGS

Prof.a Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dr. pelo programa de Pós-graduação em Engenharia/UFRGS

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pelo programa de Pós-graduação em Engenharia/UFRGS

RESUMO

MONTEMEZZO, R.F. **Estudo Comparativo de Ensaio de Compressão Confinada em Argilas e Areias Saturadas Utilizando o Ensaio CRS**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Nesta dissertação é descrita a construção de um equipamento de ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS) no Laboratório de Geotecnologia (LAGEO). Durante os testes de funcionamento, foram ensaiados dois solos: um solo arenoso obtido junto ao trevo de acesso da BR 290 (Free Way) no município de Santo Antonio da Patrulha e um solo argiloso coletado no pátio da Infraero na Av. Sertório em Porto Alegre. Foram realizados um total de 17 ensaios incluindo ensaios convencionais em amostra indeformada de areia e de argila, ensaios convencionais em amostras deformadas de areia e de argila, ensaios em prensa pneumática com carga incremental e ensaios CRS em amostras deformadas e indeformadas. As diferentes técnicas empregadas na obtenção dos resultados mostraram-se bastante satisfatórias e as concordâncias alcançadas nas curvas de “ e x σ'_v (esc. log)” mostraram a adequação do equipamento desenvolvido. Os ensaios em argila puderam ser realizados com tempos de 4 a 8 horas com resultados comparáveis aos convencionais, especialmente em relação aos coeficientes de adensamento. A utilização de diferentes velocidades de deformação mostrou a influência da velocidade nos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: CRS; ensaios de adensamento; ensaios de laboratório.

ABSTRACT

MONTEMEZZO, R.F. **Comparative study of confined compression tests on saturated clays and sands using the CRS test.** 2005. Dissertation (Máster of Science in Engineering) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In this work an apparatus for consolidation tests with constant rate of strain has been built and tested in the Laboratório de Geotecnologia (LAGEO) of Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). During the initial tests two soils were tested: a sandy soil obtained close to the road junction of the BR 290 (Free Way) with the access of Santo Antonio da Parulha town and a clayey soil sampled in the Infraero plot at Av. Sertório, Porto Alegre. A total of 17 tests were carried out, including conventional tests on undisturbed samples of the clay and the sandy soil, conventional tests on remoulded samples of sandy and clayey soils, tests on a pneumatic frame with incremental loads and tests with constant rate of strain (CRS) on remoulded and undisturbed specimens. The various test techniques employed resulted in quite comparable results. The similarity of the curves “ $e \times \sigma'_v$ (log)” showed the quality of the apparatus built. The test on clay were carried out in 4h to 8h with comparable results to the conventional tests which take much longer times. The results are quite similar in relation to the coefficients of consolidation. The use of different rates of strain in some tests showed the influence of the rate in the test results.

KEY-WORDS: CRS; consolidation tests; laboratory tests.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SIGLAS	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TIPOS DE AMOSTRAS DE SOLOS E QUALIDADE	16
2.2 TIPOS DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICOS	23
2.2.1 Ensaios de adensamento incrementais	23
2.2.2 Tipos de ensaios de adensamento especiais.....	27
2.2.2.1 Ensaios de Adensamento à Velocidade Constante de Carregamento (CRL).....	30
2.2.2.2 Ensaios de Adensamento com Gradiente Controlado de Poro Pressão (CG)	31
2.2.2.3 Ensaios de Adensamento com Razão Poro Pressão/Pressão Aplicada Constante (CPR)	33
2.2.2.4 Ensaios de Adensamento com Fluxo Restringido (RFC).....	34
2.3 ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS).....	35
2.3.1 Princípios do Ensaio CRS.....	35
2.3.2 Ensaio CRS	37
2.3.3 Parâmetros de velocidade de deformação para o ensaio CRS	40
2.3.3.1 Critério de Smith e Wahls	41
2.3.3.2 Critério de Armours e Drnevich	41
2.3.3.3 Critério de Carvalho	42
2.3.3.4 Critério da ASTM International	42
2.3.4 Desenvolvimento do CRS ao longo dos anos.....	43
3 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS INVESTIGADOS.....	60
3.1 AREIA SILTOSA	60
3.1.1 Localização da jazida	60
3.1.2 Coleta e armazenamento das amostras	62
3.1.3 Ensaios de caracterização	64
3.2 ARGILA SILTOSA	66
3.2.1 Localização da jazida	66
3.2.2 Retirada e armazenamento das amostras	66
3.2.3 Ensaios de caracterização	68
4 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA	72
4.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ADENSAMENTO CRS.....	72
4.1.1 Prensa pneumática	72
4.1.2 Câmara triaxial adaptada para o ensaio CRS.....	74
4.1.3 Instrumentação e sistema de aquisição de dados	76
4.1.3.1 Célula de Carga	78

4.1.3.2	Transdutor de deslocamentos	80
4.1.3.3	Transdutores de pressão	81
4.1.3.4	Aquisição dos dados	83
4.1.4	Sistema de adensamento incremental na célula CRS	85
4.1.5	Prensa de aplicação de carga.....	88
4.2	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	89
4.2.1	Moldagem dos corpos de prova.....	89
4.2.2	Procedimentos do ensaio de adensamento convencional.....	90
4.2.3	Procedimentos dos ensaios incrementais na célula CRS	90
4.3	CÁLCULOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO	91
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	94
5.1	ENSAIOS DE ADENSAMENTO INCREMENTAIS NO EQUIPAMENTO CONVENCIONAL	94
5.1.1	Resultados dos ensaios em areia siltosa.....	94
5.1.1.1	Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma_v'$]	95
5.1.1.2	Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t].....	96
5.1.2	Resultado dos ensaios em argila siltosa	97
5.1.2.1	Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma_v'$]	98
5.1.2.2	Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t].....	98
5.2	ENSAIOS DE ADENSAMENTO INCREMENTAIS EM PRENSA PNEUMÁTICA	99
5.2.1	Resultados dos ensaios em areia siltosa.....	100
5.2.1.1	Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma_v'$]	100
5.2.1.2	Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t].....	101
5.2.1.3	Curvas poro pressão versus tempo [u_b x t]	102
5.2.2	Resultado dos ensaios em argila siltosa	103
5.2.2.1	Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma_v'$]	103
5.2.2.2	Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t].....	104
5.2.2.3	Curvas poro pressão versus tempo [u_b x t]	105
5.3	ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS)	106
5.3.1	Velocidade de deformação aplicada no ensaio CRS	107
5.3.1.1	Velocidade de deformação para os ensaios em areia siltosa	107
5.3.1.2	Velocidade de deformação para a argila siltosa	108
5.3.2	Ensaio CRS em areia siltosa	109
5.3.3	Ensaio CRS em argila siltosa	115
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	124
5.4.1	Análise dos resultados dos ensaios em areia siltosa	124
5.4.1.1	Resultados com a Prensa Pneumática	125
5.4.1.2	Resultados Obtidos com o CRS	126
5.4.2	Análise dos resultados dos ensaios em argila siltosa	128
5.4.2.1	Resultados com a Prensa Pneumática	129
5.4.2.2	Resultados Obtidos com o CRS	131
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	138
6.1	CONCLUSÕES	138
6.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	139
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Curva típica do ensaio de adensamento para solo argiloso mole indeformado ou amolgado.....	22
Figura 2:	Vista frontal do equipamento oedométrico convencional, cujas características básicas foram padronizadas por Taylor (1942)	24
Figura 3:	Curva tempo – recalque típica do ensaio de adensamento em argila saturada	26
Figura 4:	Célula de adensamento especial	28
Figura 5:	Tipos de Ensaio de Adensamento	29
Figura 6:	Velocidade de aplicação de tensão vertical do Ensaio CRL.....	31
Figura 7:	Esquema básico do ensaio CRS.....	36
Figura 8:	Gráficos típicos obtidos no ensaio CRS	37
Figura 9:	Gráfico “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtido no ensaio CRS comparado com o oriundo de ensaio convencional.....	45
Figura 10:	Comparação das curvas de módulo edométrico versus tensão vertical efetiva obtidas nos ensaio convencional e CRS	45
Figura 11:	Curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” dos ensaios CRS n° 7, 8 ,9 e do ensaio convencional (prof. 5,0 a 5,5m),.....	49
Figura 12:	Comparação dos valores de coeficientes de adensamento obtidos com ensaios CRS e ensaios convencionais	49
Figura 13:	Comparação entre as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc log)” obtidas no ensaio CRS com célula Rowe e no ensaio convencional	50
Figura 14:	Curvas “ $c_v \times \sigma'_v$ (esc log)” obtidas nos ensaios CRS e convencionais.....	51
Figura 15:	Curvas “ $D \times \sigma'_v$ ” obtidas nos ensaios CRS e convencionais	52
Figura 16:	Variação de c_v com σ'_v observada em um ensaio CRS e um ensaio convencional.....	54
Figura 17:	Curvas “ $e \times \sigma'_v$ (esc log)” obtidas com ensaios convencional e CRS.....	54
Figura 18:	Comparação entre as curvas “ $e/e_0 \times \sigma'_v$ (esc log)” para os ensaios convencional e CRS para a argila de Sarapuí.....	57
Figura 19:	Comparação entre as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc log)” para os ensaios convencional e CRS para a argila mole de Florianópolis.....	59
Figura 20:	Localização da jazida de solo arenoso de Santo Antônio da Patrulha, adaptada do web site da empresa Concepa S.A.....	61
Figura 21:	Pontos de amostragem do solo arenoso de Santo Antônio da Patrulha no talude de escavação	62
Figura 22:	Colocação de um anel de adensamento com diâmetro 49,7 mm e altura 19,2 mm sobre a superfície escavada do solo de Santo Antônio da Patrulha.....	63

Figura 23: Distribuição Granulométrica do solo de Santo Antônio da Patrulha (com defloculante)	65
Figura 24: Vista das hastes de cravação, após a cravação do tubo “Shelby” no furo de sondagem, e vista do trado manual empregado para abrir este furo.....	67
Figura 25: Distribuição Granulométrica do solo de Aeroporto Internacional Salgado Filho (com defloculante)	69
Figura 26: Vista geral da prensa pneumática desenvolvida	73
Figura 27: Vista frontal da prensa pneumática desenvolvida	74
Figura 28: Vistas da célula de adensamento	75
Figura 29: Desenho esquemático da Câmara Triaxial com a célula de Adensamento	76
Figura 30: Desenho esquemático do sistema de aquisição automática de dados.....	77
Figura 31: Curva de Calibração da célula de carga.....	78
Figura 32: Dispersão das leituras da célula de carga durante o teste da estabilidade do zero	79
Figura 33: Dispersão das leituras da célula de carga durante o teste da estabilidade do zero, durante os primeiros 15 s	79
Figura 34: Curva de Calibração do Transdutor de Deslocamentos.....	80
Figura 35: Dispersão das leituras durante o teste de estabilidade do zero do transdutor de deslocamentos.....	81
Figura 36: Curvas de calibração dos transdutores de pressão	82
Figura 37: Vista geral do programa <i>Catman 4.5</i> em seu menu de configuração inicial	84
Figura 38: Tela “ <i>Long-term monitoring</i> ” do programa <i>Catman 4.5</i> durante a realização de testes de aquisição de dados	85
Figura 39: Equipamento anisotrópico montado sobre a câmara de adensamento.....	87
Figura 40: Desenho da prensa utilizada no ensaio CRS.....	88
Figura 41: Determinação de t_{90} pelo Método de Taylor.....	93
Figura 42: Curvas de e x σ'_v (esc. log) para a amostra indeformada de areia siltosa ECAS_I-1, ECAS_I-2 e para a amostra remoldada em índice de vazios próximo ao de campo (ECAS_R-1), ensaiada no equipamento convencional.....	95
Figura 43: Curva e x σ'_v (esc. log) para a amostra remoldada de areia siltosa (ECAS_R-2), preparada com índice de vazios inicial próximo de 1, ensaiada no equipamento convencional	96
Figura 44: Curvas recalque x tempo obtidas com a amostra indeformada de areia siltosa nos ensaios ECAS_I-1, ECAS_I-2, e na amostra deformada com índice de vazios próximo ao de campo ECAS_R-1 ensaiada com o equipamento convencional, para a tensão de 400 kPa	97
Figura 45: Curvas recalque x tempo obtidas com a amostra remoldada de areia siltosa ECAS_R-2, preparada com índice de vazios inicial igual a 1 e ensaiada no equipamento convencional e na amostra indeformada ECAS_I-1	97

Figura 46:	Curvas e $x \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com o ensaio de adensamento incremental, em equipamento convencional, para as amostras indeformadas e remoldada de argila siltosa	99
Figura 47:	Curvas recalque x raiz do tempo obtidas com o ensaio de adensamento incremental, em equipamento convencional, para as amostras indeformadas e remoldada de argila siltosa	99
Figura 48:	Curvas e $x \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com o ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para as amostras indeformadas de areia siltosa.....	101
Figura 49:	Curvas recalque x raiz de t obtidas com o ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática	102
Figura 50:	Porosidades x tempo obtidas em um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática (amostra indeformada de areia siltosa PENAS_I-1).....	103
Figura 51:	Curva e $x \sigma'_v$ (esc. log) obtida com um ensaio de adensamento incremental utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para a amostra indeformada de argila siltosa	104
Figura 52:	Curva recalque x tempo obtida com um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para a amostra indeformada de argila siltosa	105
Figura 53:	Curva porosidade x tempo obtida com um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática (amostra indeformada de argila siltosa PENARG_I-1, extraída a 1,67 m de profundidade).....	106
Figura 54:	Curvas e $x \sigma'_v$ (esc. log) obtidas no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de areia siltosa CAS_I-1, CAS_I-2, e para amostra remoldada CAS_R-1.....	110
Figura 55:	Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min.....	110
Figura 56:	Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-2, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min.....	111
Figura 57:	Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de areia siltosa CAS_R-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min	111
Figura 58:	Curvas de D x σ'_v obtidas nos ensaios CRS, para areia siltosa, CAS_I-1, CAS_R-1 com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min e para o ensaio CAS_I-2 com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min	112
Figura 59:	Curva u_b x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min	113

Figura 60:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-2, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min.....	113
Figura 61:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de areia siltosa CAS_R-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min.....	114
Figura 62:	Curvas da razão $u_b/\sigma'_v \times \sigma'_v$ determinada no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de areia siltosa CAS_I-1, e CAS_I-2, e para a amostra remoldada CAS_R-1.....	114
Figura 63:	Curvas $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de argila siltosa CARG_I-1, CARG_I-2 e CARG_I-3 e para a amostra remoldada CARG_R-1.....	115
Figura 64:	Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-1, extraída a 1,71 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min.....	116
Figura 65:	Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-2, extraída a 1,91 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0156 mm/min.....	117
Figura 66:	Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-3, extraída a 1,84 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min.....	118
Figura 67:	Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) original obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min.....	119
Figura 68:	Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) a partir do ponto onde ocorre mudança de sinal na poro pressão gerada, obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min.....	120
Figura 69:	Curvas $D \times \sigma'_v$ obtidas nos ensaios CRS, em argila siltosa, CARG_I-1, CARG_I-2, CARG_I-3, CARG_R-1.....	121
Figura 70:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-1, extraída a 1,71 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min.....	121
Figura 71:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-2, extraída a 1,91 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0156 mm/min.....	122
Figura 72:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-3, extraída a 1,84 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min.....	122
Figura 73:	Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, ensaiada com uma velocidade de deslocamento vertical do corpo de prova de 0,0078 mm/min.....	123

Figura 74:	Curvas da razão $u_b/\sigma_v \times \sigma'_v$ determinada no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de argila siltosa CARG_I-1, CARG_I-2 e CARG_I-3 e para a amostra remoldada CARG_R-1.....	124
Figura 75:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática e equipamento convencional, em areia siltosa	125
Figura 76:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando equipamento convencional e ensaio contínuo, utilizando equipamento CRS para as amostras indeformadas de areia siltosa.....	127
Figura 77:	Comportamento das curvas de $D \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios CRS, para diferentes velocidades, em areia siltosa.....	128
Figura 78:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática e utilizando o equipamento convencional em argila siltosa indeformada.....	129
Figura 79:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas em ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS e utilizando o equipamento convencional em argila siltosa indeformada e remoldada.....	130
Figura 80:	Curvas de $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios CRS em argila siltosa indeformada	132
Figura 81:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS e ensaios contínuos, utilizando o equipamento CRS(CARG_I-1, CARG_I-2, CARG_I-3) em argila siltosa indeformada	133
Figura 82:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaio incremental através do relatório de ensaios PPGEC/UFRGS (1994) e ensaio contínuo realizado no presente estudo, utilizando o equipamento CRS (CARG_R-1) em argila siltosa indeformada	134
Figura 83:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaio contínuo, utilizando o equipamento CRS desenvolvido) em argila siltosa indeformada.....	135
Figura 84:	Curvas de $e \times$ profundidade de extração da amostra obtidas nos ensaios realizados e no relatório de ensaios PPGEC/UFRGS.....	135
Figura 85:	Comportamento das curvas de $D \times \sigma'_v$ (esc. log), obtidas com ensaios CRS para diferentes velocidades, em areia siltosa.....	136
Figura 86:	Curvas de tensão de Pré-Adensamento \times profundidade de extração da amostra, obtidas nos ensaios realizados e no relatório de ensaios	136
Figura 87:	Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaio do presente estudo e do relatório de ensaios PPGEC/UFRGS, em argila siltosa indeformada	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Classificação de amostras de solo.....	18
Tabela 2:	Critério de qualidade de amostras expresso em termos de $\Delta e/e_0$	19
Tabela 3:	Critério de qualidade de amostras expresso em termos de ε_{vo} , considerando $e_0=2,0$	20
Tabela 4:	Qualidade de amostras para o depósito de SESI-Ibura.....	20
Tabela 5:	Leituras realizadas no ensaio CRS	36
Tabela 6:	Velocidades de deformação em ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/98	43
Tabela 7:	Velocidade de Deformação dos Ensaio CRS	56
Tabela 8:	Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do solo de Santo Antonio da Patrulha	70
Tabela 9:	Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do solo do Aeroporto Internacional Salgado Filho	70
Tabela 10:	Profundidade de Extração e Características do Solo Argiloso	71
Tabela 11:	Deformabilidade do equipamento para ensaios de adensamento incrementais construído	87
Tabela 12:	Velocidades de deslocamento vertical do cabeçote adotadas nos ensaios CRS em areia siltosa	108
Tabela 13:	Velocidades de deslocamento vertical do cabeçote adotadas nos ensaios CRS em argila siltosa	109
Tabela 14:	Resultados do ensaios realizados em areia siltosa.....	126
Tabela 15:	Resultados dos ensaios realizados em argila siltosa.....	131

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society of Testing and Materials
CG	Constant Pore Pressure Gradient
COPPE	Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia
CPR	Constant Pressure Ratio
CRL	Constant Rate of Loading
CRS	Constant Rate of Strain
IC	Índice de Consistência
IPC	Impossível de Cálculo
IP	Índice de Plasticidade
IL	Índice de Liquidez
LAGEO	Laboratório de Geotecnologia
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LMS	Laboratório de Mecânica do Solos
NP	Não Plástico
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RFC	Restricted Flow Consolidation
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

1 INTRODUÇÃO

O ensaio de adensamento proposto por Terzaghi, empregado até hoje, com a padronização adotada por Taylor (1942), consiste na aplicação de uma tensão vertical sobre um corpo de prova de solo confinado em um anel lateral, o que impede que ocorram deformações laterais, tornando o adensamento unidimensional. O excesso de poro-pressão gerado durante o processo de adensamento é drenado pelas pedras porosas colocadas acima e abaixo do corpo de prova, permitindo assim que toda a compressão do solo ocorra em um dado tempo. Para ensaios de engenharia usuais, o tempo mínimo de ensaio adotado pela norma brasileira MB3336/90 é de 24 horas por cada incremento de tensão vertical. Devido a isso, o ensaio de adensamento tende a durar até duas semanas, dependendo das tensões verticais utilizadas.

Como diversos ensaios podem ser necessários, isso pode atrasar ou impedir o início de certas obras. É comum – embora não desejável - que algumas obras iniciem sem que todos os ensaios geotécnicos estejam concluídos, particularmente os de adensamento. À medida que eles vão sendo executados, os projetistas, verificam e modificam o projeto em execução. Em alguns casos isto leva a prejuízos financeiros. Para sanar o problema do tempo excessivo para a execução do ensaio de adensamento, diversos tipos de ensaios especiais para determinação dos parâmetros de compressibilidade de solos foram desenvolvidos ao longo do tempo. Entre os mais usualmente empregados no mundo, encontra-se o ensaio do tipo CRS – “*Constant Rate of Strain*” ou “Ensaio Especial de Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação”, desenvolvido no final da década de 50, do século passado, no Canadá por Hamilton e Crawford (1959). O objetivo original deste ensaio era determinar mais rapidamente a tensão de pré-adensamento do solo.

O emprego do ensaio CRS tem se difundido pelo mundo, desde então, e no Brasil, de forma limitada, durante as últimas décadas. O ensaio permite obter a tensão de pré-adensamento de uma forma mais rápida que a utilizada no ensaio convencional, além de valores também considerados adequados para os demais parâmetros de adensamento de solos. A simplicidade do mecanismo de transmissão de tensão vertical, aliada a uma base teórica bem estabelecida e de fácil aplicação, torna cada dia mais freqüente o emprego desse ensaio.

Com este intuito, esta dissertação tem por objetivos:

- A descrição do equipamento para ensaios de adensamento CRS, desenvolvido nesta dissertação;
- Resultados de ensaios de adensamento com velocidade de deformação constante em um solo argiloso e em um solo arenoso. O objetivo principal é demonstrar a aplicabilidade do mesmo nos diferentes tipos de solos estudados, já que a pesquisa geotécnica nacional, até o momento, somente investigou a utilização do ensaio CRS para solos argilosos muito moles a moles;
- Resultados de ensaios de adensamento convencionais, mas executados no equipamento convencional e no equipamento especialmente desenvolvido para esta dissertação, que permite a saturação do corpo de prova por contrapressão, de modo a comparar seus resultados.

A dissertação está subdividida em sete capítulos. O Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica - aborda uma breve revisão de alguns conceitos específicos sobre o assunto a ser desenvolvido na pesquisa. O Capítulo 3 – Coleta e Caracterização dos Solos Investigados – demonstra como foi realizada a coleta de amostras em campo e caracteriza o material de estudo utilizado na pesquisa, além de classificá-lo e situa os locais em que se procederam as amostragens. O Capítulo 4 – Metodologia – apresenta a descrição do equipamento desenvolvido, o *software* de aquisição de dados empregado e a metodologia para a realização dos ensaios. O Capítulo 5 – Apresentação e Análise dos Resultados – apresenta os resultados dos ensaios de adensamento convencionais e de adensamento CRS realizados e traz a análise e interpretação de todos os ensaios desta pesquisa. O Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões – apresenta as conclusões da presente pesquisa e as sugestões para futuros trabalhos. O Último capítulo – Referências Bibliográficas – apresenta a bibliografia empregada no estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE AMOSTRAS DE SOLOS E QUALIDADE

Nenhum ensaio de adensamento é possível sem uma campanha prévia de amostragem indeformada do solo. Além de permitir que os ensaios de laboratório sejam conduzidos, a qualidade da amostragem pode introduzir uma grande variabilidade nos resultados dos ensaios. Uma boa amostra leva a resultados satisfatórios, enquanto que uma amostra de má qualidade pode levar a resultados experimentais de tão baixa qualidade que não permitam estabelecer uma correlação razoável entre os recalques calculados e os recalques medidos no campo.

Hvorslev (1949) classifica as amostras em três tipos distintos:

- Amostras não-representativas: são aquelas em que a estratigrafia do terreno não é mantida e ocorre mistura dos solos das diferentes camadas (em alguns casos, certos componentes da amostra são removidos e, em outros, são adicionados à amostragem).
- Amostras representativas: são aquelas em que não houve variação nos constituintes do solo, mas a estrutura do solo foi seriamente danificada e ocorreu, durante o processo de amostragem, variação de umidade e/ou índice de vazios;
- Amostras indeformadas: são aquelas em que não houve dano significativo à estrutura do solo e nem ocorreram, durante o processo de amostragem, variação de umidade, índice de vazios e composição química.

Ainda segundo o autor, as amostras não-representativas são inadequadas para ensaios de laboratório, permitindo apenas uma classificação preliminar das variações das camadas do terreno e indicando em que profundidades amostras representativas ou indeformadas devem ser obtidas. Atualmente essas amostras são consideradas totalmente inúteis em investigações geotécnicas de campo ou laboratório (CLAYTON et al., 1982). As amostras representativas seriam adequadas apenas para a realização de ensaios de classificação, enquanto que as amostras indeformadas seriam indicadas para todos os tipos de ensaios de laboratório,

principalmente, os ensaios de resistência ao cisalhamento, à deformabilidade e à condutividade hidráulica.

Rowe (1972), modificando o trabalho de Idel et. al (1969), apresenta outra classificação para as amostras extraídas de solos. Essa classificação considera cinco níveis de qualidade da amostras, denominados de Nível de Qualidade 1 a 5. A Tabela 1 apresenta uma síntese desta classificação.

O Nível de Qualidade 1, proposto por Rowe (1972), é o outro nome dado às amostras indeformadas de boa qualidade, com as amostras obtidas por meio de amostradores tubulares de parede fina, dotados de pistão estacionário. As amostras de Nível de Qualidade 2 admitem um pequeno grau de amolgamento, desde que o mesmo não afete significativamente as propriedades mecânicas do material. As amostras de Nível de Qualidade 3 devem ser usadas, segundo Rowe (1972), principalmente para análise da estrutura do solo e são divididas em dois tipos. O Nível de Qualidade 3A exige 100% de recuperação em amostragem contínua, enquanto o Nível de Qualidade 3B permite até 10% de perda entre amostras consecutivas. Amostras com Nível de Qualidade 4 são deformadas e fornecem apenas a seqüência de camadas. O Nível de Qualidade 5 se refere às amostras obtidas a partir da lavagem em sondagem de simples reconhecimento, indicando apenas a seqüência aproximada das camadas. O último nível de qualidade não deve ser empregado como amostra para ensaios de laboratório devido à sua má qualidade, servindo apenas para um reconhecimento prévio das camadas encontradas no solo.

Segundo Soares (1997), as amostras de solo podem ser classificadas como:

- Amostras indeformadas: são aquelas que guardam todas as características de campo, tais como densidade, teor de umidade, anisotropia e preservam em grande parte a micro-estrutura de campo, sendo geralmente obtidas pela extração de blocos ou pela cravação no solo de tubos amostradores de parede fina e de grande diâmetro;
- Amostras deformadas: são aquelas que não guardam algumas das características de campo; por apresentarem menores níveis de precisão, são inadequadas para a determinação de parâmetros geotécnicos de campo realistas, servindo apenas para os ensaios de granulometria e para a realização de ensaios de laboratório onde a estrutura do solo não seja importante.

Tabela 1: Classificação de amostras de solo

Nível de qualidade	Propriedades do solo mantidas pela amostragem	Utilização da amostra	Técnica de amostragem típica
1	Propriedades remoldadas Estrutura Teor de Umidade Densidade e Porosidade Compressibilidade Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento Permeabilidade* Coeficiente de Adensamento*	Ensaio de Laboratório em Solos Naturais	Blocos Amostrador do tipo pistão de parede fina
2	Propriedades remoldadas Estrutura Teor de Umidade Densidade e Porosidade Compressibilidade Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	Ensaio de Laboratório em Solos Naturais e em Solos de Baixa Sensibilidade	Amostrador do tipo pistão de parede fina ou espessa com conservação da umidade
3	Propriedades remoldadas Estrutura A* 100% de recuperação; B* 90% de recuperação	Ensaio de Laboratório em Solo Remoldado Análise de Estrutura	Amostrador do tipo pistão de parede fina ou espessa com preservação da umidade, em solos altamente permeáveis.
4	Propriedades remoldadas	Ensaio de Laboratório em Solo Remoldado; Estratigrafia	Amostra retirada em sacos
5	Nenhuma	Seqüência aproximada das camadas	Lavagem

Fonte: Idel et al. 1969, modificada por Rowe, 1972

Nota*: Itens originais modificados por Rowe, 1972

Segundo Lunne et al. (1997), o Instituto Norueguês de Geotecnia (NGI) utiliza há muito tempo a deformação volumétrica (ε_{vo}) correspondente à reaplicação das tensões geostáticas efetivas de campo (σ'_{vo}) como indicador de amolgamento e conseqüentemente da qualidade de amostras argilosas. Lunne et al.(1997) sugerem a utilização de $\Delta e/e_o$, ao invés

de ε_{v0} para classificar amostras de argila, onde $\Delta e = e_0 - e_{v0}$. Os autores consideram e_0 o índice de vazios inicial da amostra e e_{v0} , que correspondente à tensão efetiva de campo. Esses autores argumentam que uma variação no volume de vazios (Δe) é mais prejudicial à estrutura do solo quanto menor for o índice de vazios inicial (e_0), sendo então sugerido usar o quociente $\Delta e/e_0$. Baseado na experiência do NGI, os autores propuseram um critério para a avaliação do amolgamento. A Tabela 2 apresenta a proposta de classificação, podendo também ser construída em termos de ε_{v0} , para uma argila particular, multiplicando-se $\Delta e/e_0$ por $e_0/(1+e_0)$ correspondente, como exemplificado na Tabela 3, para um índice de vazios inicial igual a 2,0.

Tabela 2: Critério de qualidade de amostras expresso em termos de $\Delta e/e_0$

OCR	$\Delta e/e_0$					
	Muito boa Excelente	Boa Regular	Regular	Transição Regular/Pobre	Pobre	Muito Pobre
01 – 02	< 0,04	0,04 - 0,07	0,044 - 0,056	0,056 - 0,084	0,07 - 0,14	>0,14
02 – 04	< 0,03	0,03 - 0,05	0,032 - 0,040	0,040 - 0,060	0,05 - 0,10	>0,10

Fonte: Lunne et al. 1997

Coutinho et al. (1998b) adaptaram o critério de Lunne et al. (1997) para os solos moles de Recife. A principal modificação foi o desmembramento da faixa classificada como amostra boa a regular em duas faixas: 1) Boa, 2) Regular, considerando o valor médio da faixa boa/regular proposta como limite. O mesmo ocorreu para a faixa denominada “pobre” por Lunne et al. (1997), que pelas adaptações passou a ser chamada de “transição regular/pobre” e “pobre” propriamente dita, utilizando o mesmo critério anterior (média da faixa inicial). A Tabela 4 apresenta essas modificações para o depósito de argila mole do SESI-Ibura, no estado de Pernambuco.

Tabela 3: Critério de qualidade de amostras expresso em termos de ε_{v0} , considerando $e_0=2,0$

OCR	ε_{v0}					
	Muito boa Excelente	Boa Regular	Regular	Transição Regular/Pobre	Pobre	Muito Pobre
01 - 02	< 0,027	0,027 - 0,046	0,044 - 0,056	0,056 - 0,084	0,046 - 0,092	>0,092
02 - 04	< 0,020	0,020 - 0,033	0,032 - 0,040	0,040 - 0,060	0,033 - 0,066	>0,066

Fonte: Lunne et al. 1997

Tabela 4: Qualidade de amostras para o depósito de SESI-Ibura

Camada	OCR	ε_{v0}					
		Muito boa Excelente	Boa	Regular	Transição Regular/Pobre	Pobre	Muito Pobre
1	01 - 02	< 0,032	0,032 - 0,044	0,044 - 0,056	0,056 - 0,084	0,084 - 0,112	>0,112
	02 - 04	< 0,024	0,024 - 0,032	0,032 - 0,040	0,040 - 0,060	0,060 - 0,080	>0,080
2	01 - 02	< 0,027	0,027 - 0,038	0,038 - 0,048	0,048 - 0,072	0,072 - 0,095	>0,095
	02 - 04	< 0,020	0,020 - 0,027	0,027 - 0,034	0,034 - 0,051	0,051 - 0,068	>0,068

Fonte: Coutinho, 1998b, adaptado de Lunne et al., 1997

A qualidade das amostras influencia significativamente os resultados dos ensaios de laboratório, principalmente em ensaios onde a estrutura do solo é de fundamental importância para o comportamento geomecânico, como é o caso da obtenção de parâmetros de adensamento do solo. A manutenção das características de campo, no solo amostrado, permite que sejam determinadas as reais características do adensamento que ocorrerá em campo, quando o solo estiver submetido a tensões efetivas semelhantes às simuladas no laboratório.

Segundo Hvorslev (1949), o amolgamento em uma estrutura de solo consiste no enfraquecimento da adesão das partículas ou no rearranjo estrutural dos grãos de solo. O autor o classifica em cinco tipos básicos o amolgamento:

- Variação no estado de tensões efetivas;
- variações no teor de umidade e no índice de vazios;
- amolgamento da estrutura do solo;

- variação química;
- mistura e separação dos constituintes do solo.

Ainda, segundo o autor, a influência destes tipos de amolgamento nos resultados dos ensaios de laboratório depende não apenas do tipo e grau de amolgamento, mas também das características do solo e da técnica de ensaio. Da mesma forma, segundo Clayton et al. (1995), existem diversos mecanismos que estão diretamente associados com o amolgamento e a perturbação de uma amostra de solo. Ainda de acordo com os mesmos autores, as técnicas de amostragem devem ser selecionadas de forma a satisfazer a função a que o ensaio está se propondo e permitir que as amostras a serem extraídas tenham as devidas dimensões e perturbação mínima.

Jamiolkowski et al. (1985) afirmam que o amolgamento provoca perturbações na curva de compressão de ensaios de adensamento em solos argilosos, com variabilidades entre baixa a moderada, conforme expresso abaixo:

- Diminui o índice de vazios (ou aumenta a deformação específica) para uma mesma tensão efetiva;
- dificulta a determinação do ponto do raio mínimo, diminuindo o valor da tensão de pré-adensamento;
- pode ainda causar o aumento da compressibilidade no trecho pré-adensado e a diminuição da mesma no trecho normalmente adensado.

Segundo os mesmos autores, as possíveis causas das perturbações em amostras são:

- Variação nas tensões devido à abertura do furo de sondagem;
- remoção das tensões cisalhantes de campo;
- geometria e tipo do amostrador;
- método de cravação do amostrador;
- relação entre os diâmetros do amostrador e do corpo de prova;
- transporte, armazenagem e manuseio no laboratório.

Os solos em geral apresentam baixa deformabilidade no trecho pré-adensado e uma deformabilidade mais elevada no trecho normalmente adensado. O mesmo comportamento não é notado em amostras amolgadas que apresentam um aumento de compressibilidade na

região de recompressão e uma diminuição da mesma na zona de compressão virgem. A Figura 1 demonstra esquematicamente o que ocorre com um solo argiloso de consistência mole quando amolgado ou não durante um ensaio de adensamento.

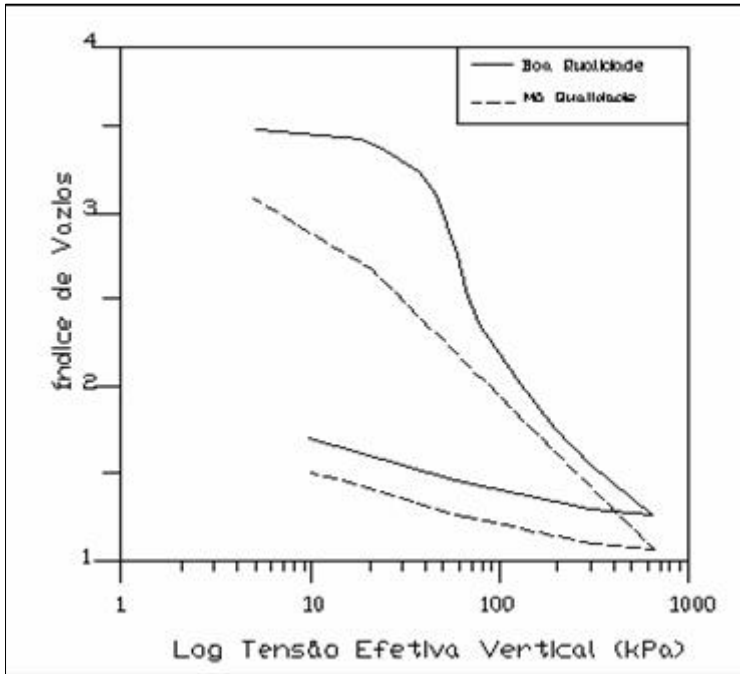


Figura 1: Curva típica do ensaio de adensamento para solo argiloso mole indeformado ou amolgado

Fonte: Adaptado Oliveira (2002)

A Figura 1 também demonstra que Martins e Lacerda (1994) tinham razão ao afirmar que os resultados dos ensaios de adensamento variam severamente quando uma amostra for de boa ou má qualidade. Na amostra de má qualidade, o ensaio de adensamento indicará sinais de severa perturbação da estrutura de solo no trecho virgem de adensamento, provocada por problemas de amostragem. Por outro lado, ensaios de adensamento realizados com amostras de boa qualidade apresentam curvatura bem definida no gráfico e $x \log \sigma'_v$ na região da tensão de pré-adensamento. Comparando essas curvas, os autores concluíram que:

- Para um valor qualquer de tensão efetiva vertical, o índice de vazios de amostras amolgadas é sempre menor.
- A curvatura do gráfico e $x \log \sigma'_v$ fica menos acentuada em amostras amolgadas.

As recomendações para a obtenção de amostras indeformadas de argilas moles a médias, com a utilização de amostrador de parede fina munido de pistão estacionário, estão

apresentadas na norma DNER-PRO 381/98 “Projeto de Aterros sobre Solos Moles para Obras Viárias”.

2.2 TIPOS DE ENSAIOS DE ADENSAMENTO EDOMÉTRICOS

O adensamento ocorre devido à expulsão da água dos vazios quando o solo é submetido a uma sobrecarga. Trata-se de um processo lento e que teve seu primeiro desenvolvimento teórico e simulação em laboratório realizada por Terzaghi na década de 20. Desde então, diversos autores já estudaram o fenômeno de adensamento, entre eles: Taylor (1949), Bjerrum (1973), Coutinho (1976), Crawford (1986), Almeida e Ferreira (1993), entre outros.

Conforme a forma de carregamento, os ensaios de adensamento podem ser divididos em: Ensaios Incrementais Convencionais e Ensaios Contínuos, estes tidos como Especiais, enquadramento em que o ensaio CRS se encontra. (Moura, 2004).

2.2.1 Ensaios de adensamento incrementais

Seu primeiro desenvolvimento foi dado por Terzaghi e Fröhlich em meados dos anos 20, porém o ensaio de adensamento incremental deve a sua difusão e internacionalização à padronização criada no início da década de 40 por Taylor (1942). Estes ensaios têm por princípio a aplicação incremental e gradativa de tensão vertical sobre um pequeno corpo de prova em um equipamento próprio para o ensaio, que consiste essencialmente de um anel inundado, conectado a uma alavanca equipada de um pendural onde pesos são colocados. Cada novo incremento de tensão vertical só deve ser aplicado após o término do adensamento primário do estágio anterior. A norma brasileira para ensaio de adensamento (ABNT-MB-3336/90) preconiza que, para solos normalmente encontrados no país, esse tempo deve ser de 24 horas, porém, para solos com elevado grau de plasticidade, as leituras poderão se estender, além desse tempo, até que 100% do adensamento primário seja concluído. O tempo adotado pela norma brasileira, quando comparado às recomendações de Crawford (1986), é capaz de

produzir bons resultados para a relação entre tensão-compressão. O ensaio se desenvolve fazendo a medição da variação da altura do corpo de prova por meio de um extensômetro mecânico em determinados instantes do ensaio.

Empregado para determinar parâmetros de compressibilidade do solo, o ensaio permite a determinação a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) do mesmo. O valor da tensão de pré-adensamento é de fundamental importância para obras de engenharia, em especial para obras sobre solos argilosos moles com grande sensibilidade, pois para valores de $\sigma'_v < \sigma'_{vm}$ este solos apresentam baixa compressibilidade e, após ser ultrapassado o valor de σ'_{vm} , a compressibilidade desse solo aumenta consideravelmente.



Figura 2: Vista frontal do equipamento oedométrico convencional, cujas características básicas foram padronizadas por Taylor (1942)

Fonte: Taylor (1942)

A Figura 2 traz a foto das prensas tipo Bishop existentes no Laboratório de Geotecnia (LAGEO/UFRGS) para a realização de ensaios de adensamento convencionais. Esses equipamentos apresentam todas as características adotadas após a padronização do ensaio por Taylor (1942).

Atualmente, existem duas formas de se determinar o valor da tensão de pré-adensamento de um solo: o bem conhecido método de Casagrande (1936) e o método de Pacheco Silva (1970), adotados pela norma ABNT-MB-3336/92. Em síntese, os dois métodos dependem da curva $e \times \log \sigma'_v$. Como já foi visto na seção 2.1, esta depende principalmente da qualidade da amostra. Por isso, solos amolgados tendem a apresentar valores de σ'_{vm} menores do que os reais. Outro fator que também influencia no valor encontrado para a tensão de pré-adensamento é a velocidade de carregamento.

Porém, a primeira utilidade do ensaio de adensamento é a determinação da deformação vertical que acompanha a dissipação do excesso de poro pressão nos vazios dos solos, com a finalidade da determinação destes valores. Alguns parâmetros obtidos a partir do ensaio de adensamento são:

- Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica: m_v ;
- Módulo Edométrico: D ;
- Índice de Compressão: C_c ;
- Índice de Recompressão: C_r ;
- Índice de Descompressão ou Descarregamento: C_s ;
- Coeficiente de Adensamento: c_v ;
- Coeficiente de Adensamento Secundário: c_{\square} .

O adensamento é geralmente considerado como sendo constituído por duas parcelas distintas, conforme mostra a Figura 3. Na primeira fase, chamada de adensamento primário, verifica-se a dissipação do excesso de poro pressão presente no solo, com a conseqüente variação de tensão efetiva; essa fase é que deve estar terminada para ser possível aplicar novo carregamento incremental. Na segunda fase, mesmo com o excesso de poro pressão igual a zero e a manutenção de uma tensão efetiva constante, o solo continua se deformando. Esse fenômeno, normalmente chamado de adensamento secundário, é geralmente considerado a partir do trecho retilíneo final da Figura 3. O adensamento secundário pode ser determinado através de ensaios de “creep”, onde a tensão vertical aplicada no corpo de prova é mantida constante durante um longo período de tempo (em geral igual ou superior a 15 dias).

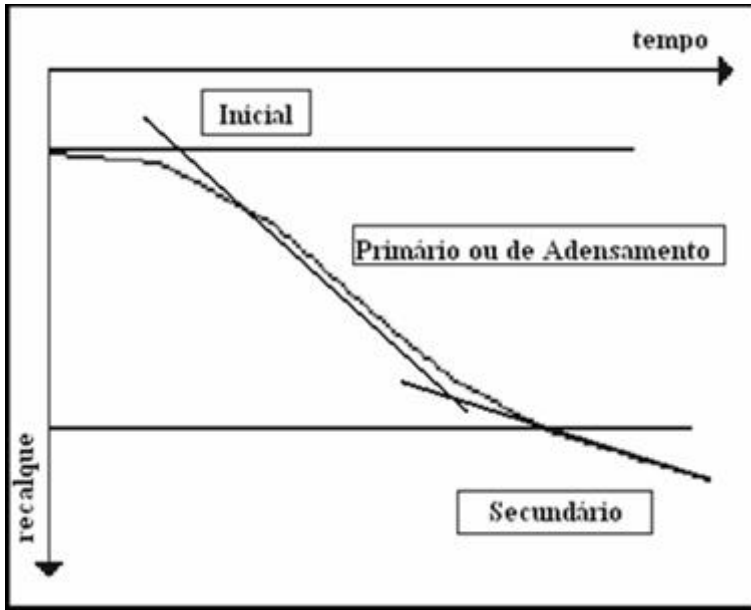


Figura 3: Curva tempo – recalque típica do ensaio de adensamento em argila saturada

O conceito de dois estágios distintos de adensamento, em que um ocorre após o outro, é uma simplificação da realidade, pois, segundo Wahls (1962), o adensamento secundário está sempre ocorrendo mesmo quando o primário ainda está agindo. Com o fim do adensamento primário, apenas o secundário permanece, atingindo neste ponto sua máxima velocidade. A partir do conceito de duas parcelas distintas de adensamento é possível se obter os parâmetros de ensaio pertencentes a cada fase do adensamento. Ao longo do desenvolvimento do adensamento primário, é possível se calcular: C_c , C_r , C_s , m_v e c_v . Resta, por sua vez, c_{\square} . Esse parâmetro está diretamente ligado ao adensamento secundário, que é atribuído, segundo Moura (2004), à deformação visco-elástica do esqueleto sólido sob carregamento constante.

Dos parâmetros apresentados anteriormente, c_v e c_{\square} , mesmo que ligados às fases distintas de adensamento, são os mais necessários para o emprego em projetos de engenharia. Seu emprego em projetos correntes vem da necessidade de determinar o tempo necessário para que ocorra o recalque total da obra, porém geralmente c_{\square} é desprezado em detrimento a c_v , devido à sua pequena magnitude.

O coeficiente de adensamento c_v é obtido usualmente através de ensaios de compressão confinada incremental, para cada estágio de adensamento, pelos métodos de Casagrande e Taylor, que empregam os gráficos “ $\varepsilon_v \times$ tempo (esc. log)” e “ $\varepsilon_v \times$ raiz quadrada do tempo”, respectivamente.

Porém nos primórdios dos estudos do fenômeno de adensamento, Terzaghi havia apresentado uma equação matemática para a obtenção do valor de c_v , partindo da hipótese de que a condutividade hidráulica permanecesse constante durante o ensaio, assim como a compressibilidade do solo, além de desprezar qualquer vestígio do adensamento secundário ao longo do primário. Autores como Wahls (1962) demonstraram que essas hipóteses não são corretas e, na maioria dos casos, ocorre uma significativa variação entre as velocidades de adensamento previstas por Terzaghi e as medidas. Ainda é necessário se ressaltar que estudos realizados recentemente demonstraram que os valores alcançados por c_v no ensaio de adensamento são ligeiramente inferiores aos atingidos em campo. Isso se deve, segundo Soares (1992), aos seguintes efeitos:

- À maior condutividade hidráulica encontrada em campo, especialmente na direção horizontal.
- À existência, em diversas obras de engenharia, de drenagem laterais e conseqüentes deformações laterais, impossíveis de simulação no ensaio de adensamento em laboratório, pois as deformações e a drenagem lateral são impedidas pela existência do anel de confinamento.

2.2.2 Tipos de ensaios de adensamento especiais

A demora para a obtenção de resultados no ensaio de adensamento incremental resulta que cada vez mais novos ensaios especiais sejam desenvolvidos, com o intuito de diminuir o tempo necessário para a obtenção de parâmetros de adensamento. Nos ensaios de adensamento especiais, ditos contínuos, as tensões efetivas são ininterruptamente aumentadas através dos mais diversos processos, os quais permitem a realização de ensaios que não durem mais que dois dias (em alguns casos os ensaios não demoram mais do que algumas horas) e apresentem resultados confiáveis para os parâmetros de adensamento do solo. A principal característica, que diferencia os ensaios de adensamento especiais dos incrementais, é a monitoração constante da poro pressão durante todo o decorrer do ensaio. De forma geral, as teorias em que se baseiam os ensaios e as equações para análise e interpretação dos resultados dos mesmos têm sido apresentadas em paralelo a seu desenvolvimento, em geral, empregando uma extensão da teoria de adensamento proposta por Terzaghi.

Ensaio contínuo de adensamento demandam uma série de modificações no equipamento, a começar pela célula de adensamento, como mostra a Figura 4. Isto é necessário para que a drenagem ocorra apenas na parte superior do corpo de prova enquanto que, na extremidade inferior, a poro pressão é monitorada. O tamanho do corpo de prova também sofre uma ligeira modificação para se enquadrar na nova célula de adensamento.

O corpo de prova apresenta apenas drenagem superior o que causa o surgimento de poro pressão em sua base, a qual é medida ao longo do ensaio. O método de aplicação de tensões verticais empregado para ensaios de adensamento especiais, geralmente, utiliza uma das seguintes alternativas (Almeida, 1988):

- Carregamento mecânico com velocidade constante, através de uma prensa, utilizado em ensaios de deformação controlada;
- carregamento hidráulico-pneumático originado da aplicação de ar em uma interface ar-água; em geral o ar comprimido é fornecido por compressores ou até mesmo por um balão de nitrogênio, utilizado em ensaios em que as pressões não ultrapassem 1000 kPa.

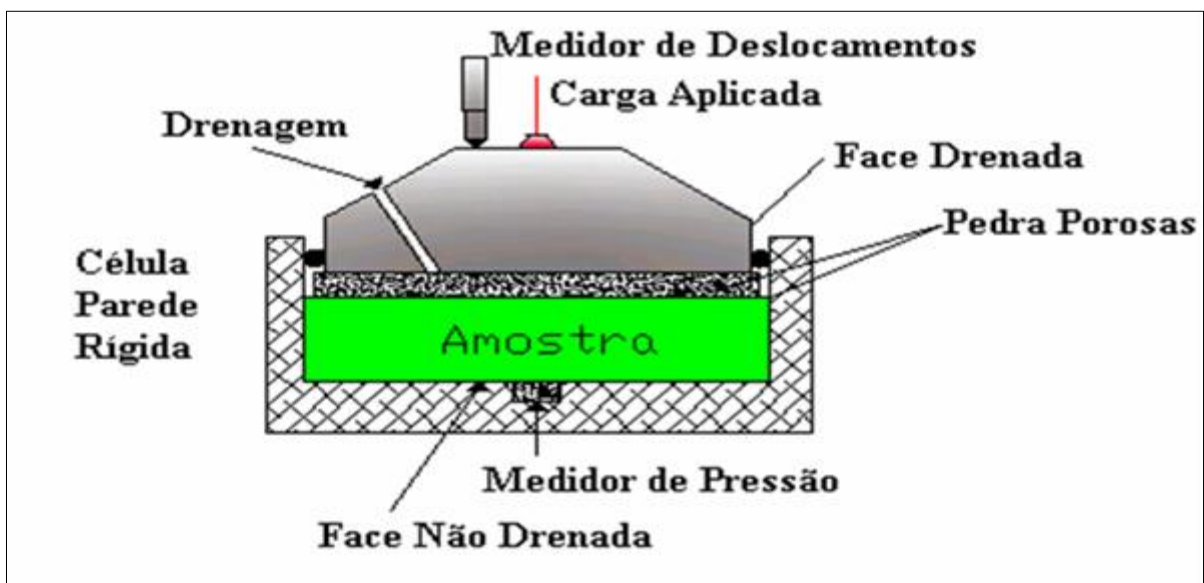


Figura 4: Célula de adensamento especial

Fonte: Head, 1986

Para Almeida (1988), um requisito não essencial, mas desejável para esses tipos de ensaios, é a aquisição e o registro automático dos dados através de sistemas automáticos de aquisição de dados. Atualmente essa opção é preferida, tendo em vista o avanço tecnológico destes equipamentos e seu fácil manuseio, possibilitando o processamento automático dos dados se o equipamento estiver conectado a um microcomputador.

Existem vários tipos de ensaios de adensamento contínuos, apresentados na literatura internacional. A Figura 5 apresenta os tipos mais comuns desses ensaios com seus padrões de carregamento característicos, além de reproduzir o modo de carregamento do ensaio de adensamento incremental.

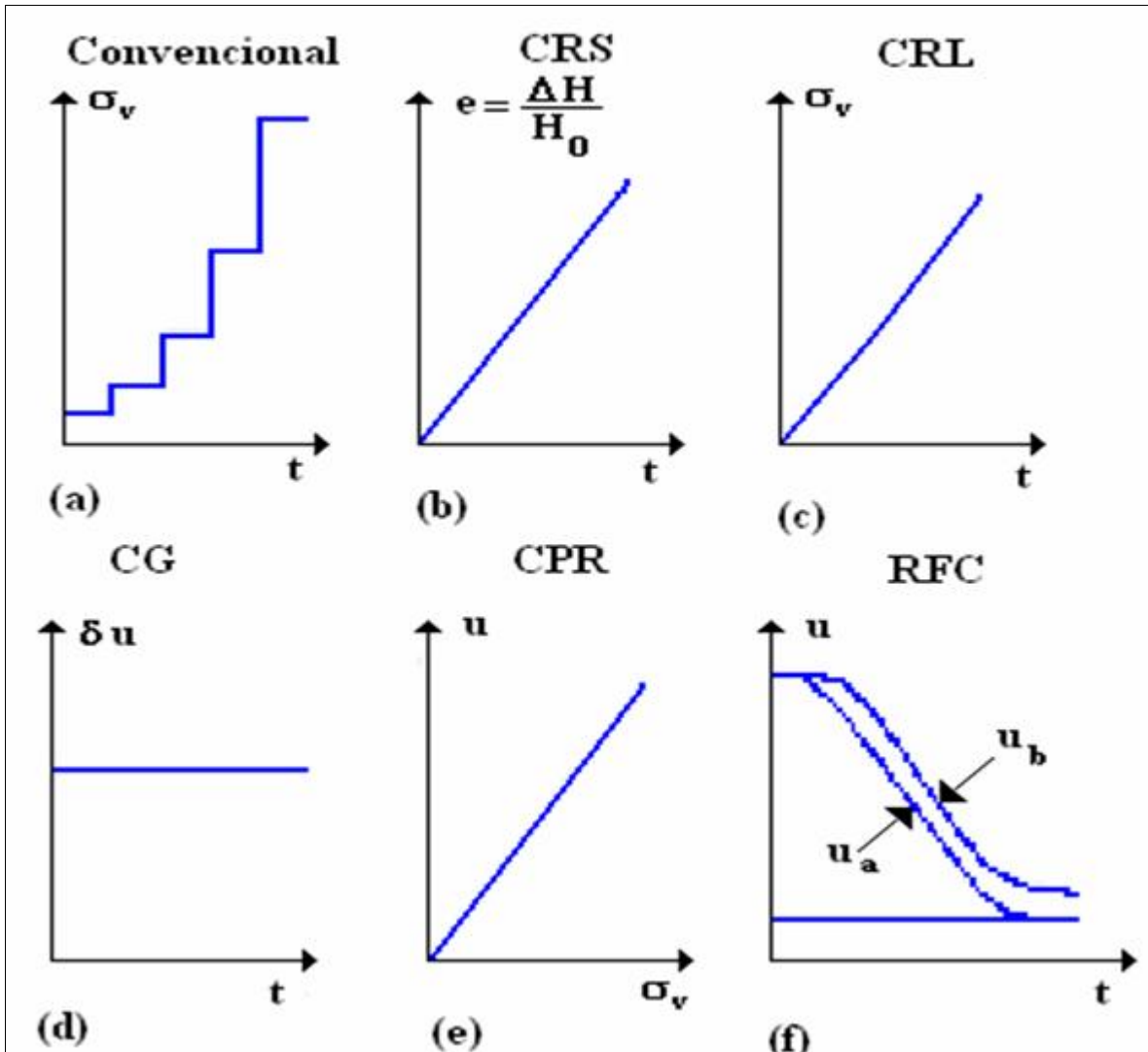


Figura 5: Tipos de Ensaio de Adensamento

Fonte: Head (1986)

O ensaio de adensamento convencional com aplicação de carga de modo incremental é representado na Figura 5a. Nas demais figuras, estão representados os ensaios de adensamento contínuos, que a seguir serão descritos de forma sucinta:

- A Figura 5b representa a reta “ $e \times t$ ” característica do Ensaio de Adensamento com Velocidade Controlada de Deformação, Constant Rate of Strain (CRS), no qual a velocidade de deformação vertical é mantida constante durante todo o ensaio e que foi utilizado nesta dissertação.

- A Figura 5c representa a reta “ $\sigma_v \times t$ ” característica do Ensaio de Adensamento a Velocidade Constante de Carregamento, Constant Rate of Loading (CRL), no qual a tensão vertical aplicada é aumentada a uma taxa constante com a velocidade.
- A Figura 5d apresenta a reta “ $\delta u \times t$ ” característica do Ensaio de Adensamento com Gradiente Controlado de Poro pressão, Constant Pore Pressure Gradient (CG); esse ensaio consiste em manter constante a diferença de poro pressão entre o topo e a base do corpo de prova ao longo do tempo.
- A Figura 5e apresenta a reta “ $u \times \sigma_v$ ” característica do Ensaio de Adensamento com Razão Poro Pressão/Pressão Aplicada Constante, Constant Pressure Ratio (CPR), em que a tensão vertical é aplicada de modo que a poro pressão na face não drenada u_b seja sempre a mesma razão da tensão vertical aplicada σ_v ($u/\sigma_v = \text{constante}$).
- A Figura 5f representa as curvas “ $u \times t$ ” nas duas faces do corpo de prova para o Ensaio de Adensamento com Fluxo Restringido, Restricted Flow Consolidation (RFC), onde a velocidade de drenagem é controlada por um restritor de fluxo, de modo que a diferença entre a poro pressão nas duas faces permaneça constante ao longo do todo o ensaio.

2.2.2.1 Ensaios de Adensamento à Velocidade Constante de Carregamento (CRL)

No ensaio de adensamento à velocidade constante de carregamento (CRL), a tensão vertical aplicada é aumentada a uma velocidade constante com o tempo, o que demanda um sistema de aplicação de tensão vertical mais sofisticado. Os modos de aplicação de carga mais empregados para o aumento constante da tensão vertical ao longo do tempo são: a aplicação, a uma velocidade constante de pesos, a um braço de uma célula oedométrica convencional (ABOSHI et al., 1970), ou o equipamento pode ser o mesmo empregado no ensaio CRS, com medições iguais às impostas ao ensaio.

Fazendo-se uma análise direta de alguns aspectos referentes à execução do ensaio, pode-se concluir que:

- As velocidades de carregamento utilizadas no ensaio CRL devem ser as menores possíveis, com a finalidade de permitir a distribuição mais uniforme possível de poro pressão, variando, segundo Burghignoli (1979), numa faixa em geral entre 6 e 600 kPa por hora.

- A velocidade de carregamento compatível com o solo ensaiado é o principal problema a ser solucionado, uma vez que não há métodos teóricos bem estabelecidos para a solução do problema. Porém, Fay e Cotton (1986), apud Almeida (1988), defendem o emprego do gráfico da Figura 6 para a definição da velocidade de carregamento em função do limite de liquidez do solo;

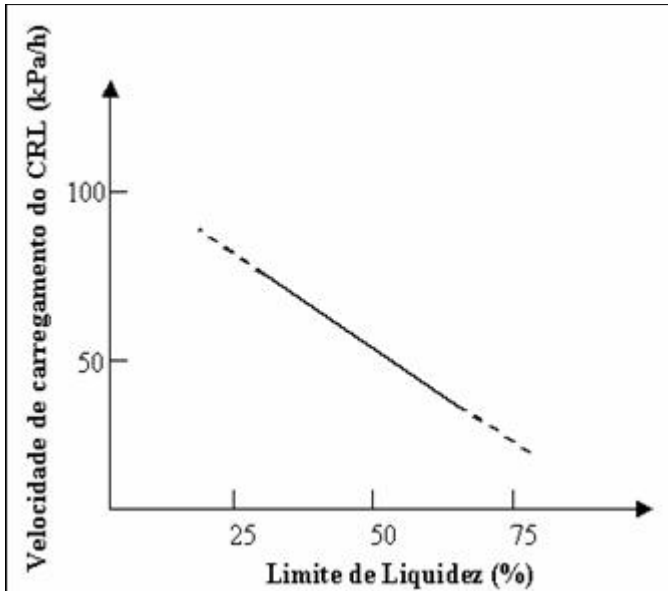


Figura 6: Velocidade de aplicação de tensão vertical do Ensaio CRL

Fonte: Segundo Fay e Cotton, 1986 (Almeida, 1988)

- Para o emprego do ensaio CRL é necessário um mecanismo automático de retroalimentação dos ensaios, sendo um fator de elevação do custo da aparelhagem.

2.2.2.2 Ensaios de Adensamento com Gradiente Controlado de Poro Pressão (CG)

Esse é um dos ensaios especiais mais difundidos; seu desenvolvimento remonta ao final da década de 60, quando Lowe et al. (1969) publicaram seu artigo. Ao desenvolverem o equipamento, os mesmos autores também solucionaram as equações diferenciais para a interpretação do ensaio. Ao analisar as soluções propostas por Lowe et al. (1969), pode-se concluir que, quando for ultrapassada a fase transiente do ensaio, as equações diferenciais obtidas são iguais às do ensaio CRS.

Ao iniciar-se o ensaio de adensamento com gradiente controlado de poro pressão (CG), aplica-se uma tensão vertical inicial σ_v que permita a dissipação da poro pressão gerada na base u_b até que esse valor alcance aquele selecionado para o ensaio. Desse ponto em

diante, incrementa-se a tensão vertical de tal modo que se mantenha constante o valor de u_b . Como a face de topo do corpo de prova apresenta drenagem, a poro pressão nessa face é nula (ou igual à contrapressão quando esta é utilizada para saturar o corpo de prova), logo o gradiente de poro pressão entre as faces permanecerá constante enquanto a poro pressão na face não drenada permanecer constante. Desta maneira, a poro pressão em qualquer profundidade é independente do tempo e a equação diferencial parcial de Terzaghi se reduz a uma equação diferencial ordinária (equação 2.1).

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

Gorman et al. (1978) sugerem que a poro pressão na base jamais ultrapasse o valor de 50% da tensão vertical total σ_v aplicada no ensaio, porém esse valor também não deve jamais ser inferior a 7 kPa. Diversos autores publicaram trabalhos a respeito do ensaio CG, entre os quais: Lowe et al. (1969), Sällfors (1975), Gorman et al. (1978), Leroueil et al. (1985), Silvestrini et al. (1986), entre outros. De forma geral, esses autores concluem:

- A variação dos valores de poro pressão na base possibilita a verificação da influência da variação da velocidade de deformação no adensamento do solo;
- a poro pressão e os gradientes hidráulicos gerados são significativamente inferiores aos do ensaio convencional;
- o ensaio de adensamento CG permite fornecer dados importantes sobre o adensamento primário e secundário;
- as velocidades de deformação vertical especificadas são baixas, porém ainda maiores que aquelas encontradas no campo;
- a existência de um sistema de aquisição e processamento automático de dados, que possibilite a retroalimentação, permite um ajuste contínuo e gradual da aplicação de tensão vertical de maneira a proporcionar a manutenção da poro pressão constante na base. Devido à aquisição automática dos dados, todas as curvas obtidas apresentam uma melhor resolução devido à grande quantidade de pontos experimentais;
- devido à necessidade de retroalimentação e processamento automático de dados, o custo do ensaio CG tende a ser bem mais elevado que o do ensaio convencional.

2.2.2.3 *Ensaio de Adensamento com Razão Poro Pressão/Pressão Aplicada Constante (CPR)*

A razão constante entre a poro pressão e a tensão vertical aplicada caracteriza o ensaio *Constant Pressure Ratio* (CPR), primeiramente, proposto por Janbu et al. (1981). Essa razão foi denominada pelos autores como λ e os ensaios desenvolvidos variaram o valor de λ entre 0,2 e 0,7, empregando-se para tal valores de velocidade de deformação vertical que variavam de 5%/h e 10%/h em argilas de média a baixa plasticidade. Desta forma, os ensaios CPR duram menos de 1 hora. Segundo Crawford (1986), o emprego desta magnitude de velocidade para solos argilosos com maior grau de plasticidade ou, muito sensíveis, levaria a resultados insatisfatórios.

O equipamento criado por Janbu et al. (1981) é composto de uma célula oedométrica com medida de poro pressão na base e deslocamento no topo do corpo de prova, montada sob uma prensa eletrônica controlada por computador. Segundos os autores, a vantagem de se utilizar o ensaio CPR é a possibilidade de estudar a influência da velocidade de aplicação de tensão vertical no valor da tensão de pré-adensamento.

Porém, segundo Olson (1986), quando o CPR é realizado na condição de $\lambda =$ constante e fluxo transiente, as equações propostas por Janbu et al.(1981) não apresentam validade. Além do problema detectado por Olson (1986), algumas outras desvantagens podem ser observadas neste ensaio, tais como:

- A faixa de valores de λ a ser empregada nos diversos ensaios de um mesmo material precisa ser definida e não existem critérios, nem tampouco formulações bem estabelecidas, para sua definição.
- O equipamento necessário para o desenvolvimento do ensaio é muito complexo e necessita obrigatoriamente de um sistema automático de retroalimentação, com a finalidade de permitir a variação da velocidade de carregamento de forma que se mantenha λ constante ao longo do ensaio. Isso eleva os custos do ensaio.

2.2.2.4 Ensaio de Adensamento com Fluxo Restringido (RFC)

Segundo Sills et al. (1986), o ensaio de adensamento de fluxo restringido tem por princípio básico a aplicação da tensão vertical (σ_v) em um único incremento a um corpo de prova cuja face drenante é conectada a um dispositivo que restrinja o fluxo d'água.

O equipamento empregado pode ser o mesmo dos ensaios CG ou CRS deste que se monitore a poro pressão gerada em cada face do corpo de prova, ou seja, ambas as faces são conectadas a transdutores de pressão. Além da leitura de poro pressão nas duas faces do corpo de prova, ainda são lidas a tensão vertical na base do mesmo e o deslocamento vertical ocorrido no topo.

O principal dispositivo do ensaio de adensamento com fluxo restringido é o restritor de fluxo. Esse dispositivo é composto de uma série de papéis filtros muito finos, do tipo “Millipore”, comprimidos um sob o outro em um cilindro de acrílico. Em geral, a localização do restritor de fluxo deve ser feita na linha de drenagem entre o corpo de prova e o sistema de aplicação de contra pressão. A condutividade hidráulica do restritor de fluxo deve ser muito mais baixa do que a condutividade hidráulica do solo. Essa condição é alcançada, aumentando o número de discos utilizados no restritor. Além disso, o número de discos deve ser tal que permita o desenvolvimento de valores de poro pressão, entre a topo e a base, não muito desiguais.

Barbosa et al. (1993) apresentaram os princípios e os equipamentos empregados para a realização do ensaio de adensamento RFC na COPPE/UFRJ. Segundo os autores, foi obtida boa concordância entre as curvas de “ $e \times \sigma_v$ ”, no ensaio realizado por fluxo restringido e no ensaio incremental convencional, confirmando assim que o ensaio de fluxo restringido possa ser uma opção alternativa mais rápida que o ensaio convencional.

Algumas características do ensaio RFC:

- A qualidade dos resultados obtidos está diretamente ligada à eficiência do restritor de fluxo.
- O equipamento necessário para o desenvolvimento do ensaio não necessita de retroalimentação, o que simplifica muito o equipamento a ser empregado, diminuindo sensivelmente o custo de implantação do sistema em relação a outros

sistemas especiais que necessariamente empregam a retroalimentação; porém seu custo é mais elevado que o do adensamento convencional.

- O emprego do número de discos deve ser compatível com o solo ensaiado, a fim de permitir uma qualidade adequada ao restritor de fluxo; esse problema é de difícil solução uma vez que não há critérios bem definidos.
- Diferentes níveis de tensão vertical efetiva podem ser alcançados, empregando-se combinações diferentes de valores de poro pressão e tensão total, aplicando-se a contrapressão ao longo do carregamento.

2.3 ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS)

A aplicação de ensaios especiais de adensamento vem se difundindo mundialmente e cada vez mais seu emprego se torna corriqueiro na prática de uma boa engenharia. Infelizmente, a aplicação desse tipo de ensaio no país restringe-se, ainda, a algumas obras especiais e à pesquisa científica. O ensaio CRS será descrito a seguir em detalhe.

2.3.1 Princípios do Ensaio CRS

O ensaio CRS se define pela aplicação gradual de tensão vertical no corpo de prova, através do aumento do deslocamento axial a uma velocidade constante no tempo. A poro pressão gerada na base do corpo de prova é monitorada constantemente (a face inferior não é drenada), enquanto a face superior apresenta drenagem livre, mantendo-se assim, no topo do corpo de prova, a poro pressão nula ou igual à contrapressão adotada no ensaio. A Figura 7 mostra o esquema básico do ensaio CRS.

Ao longo do ensaio, são efetuadas as leituras constantes do tempo decorrido de ensaio, da força aplicada, da poro pressão na base e do deslocamento vertical do topo, para a obtenção dos parâmetros de cálculo do ensaio. A prática nacional, baseada em Almeida (1988), Carvalho (1989) e Moura (2004), recomenda que as leituras sejam feitas a cada intervalo de 1 minuto. A Tabela 5 lista as grandezas que devem ser lidas e as unidades usualmente empregadas, segundo Head (1986).

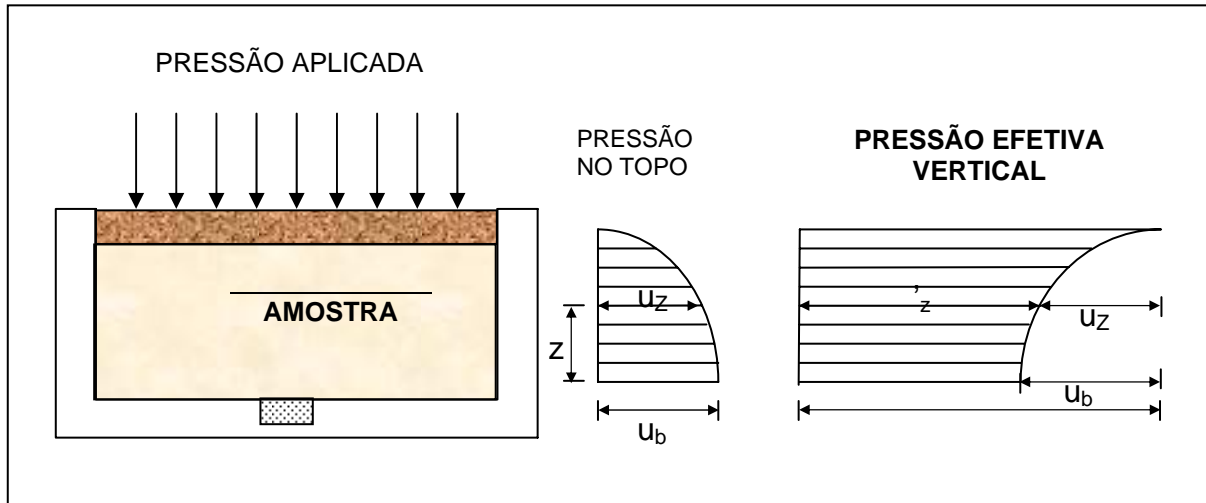


Figura 7: Esquema básico do ensaio CRS

Fonte: Moura, 2004

Tabela 5: Leituras realizadas no ensaio CRS

LEITURAS	VARIÁVEL	UNIDADE
Deformação Axial	ΔH	mm
Carregamento Axial	P	N
Excesso de Poro Pressão	δu	kPa
Tempo Decorrido	t	minutos

Fonte: Head, 1986

Com as leituras das grandezas listadas acima é possível calcular todos os parâmetros de compressibilidade do solo, entre os quais: o coeficiente de adensamento (c_v), o módulo edométrico (D), o índice de vazios (e) e a deformação vertical (H). Dessa forma, são traçados os gráficos representativos do ensaio CRS; o número de pontos no gráfico dependerá do tipo de solo e da capacidade do equipamento empregado no ensaio. A Figura 8 mostra o traçado típico dos gráficos usualmente empregados para a caracterização do ensaio CRS, conforme exposto em Head (1986).

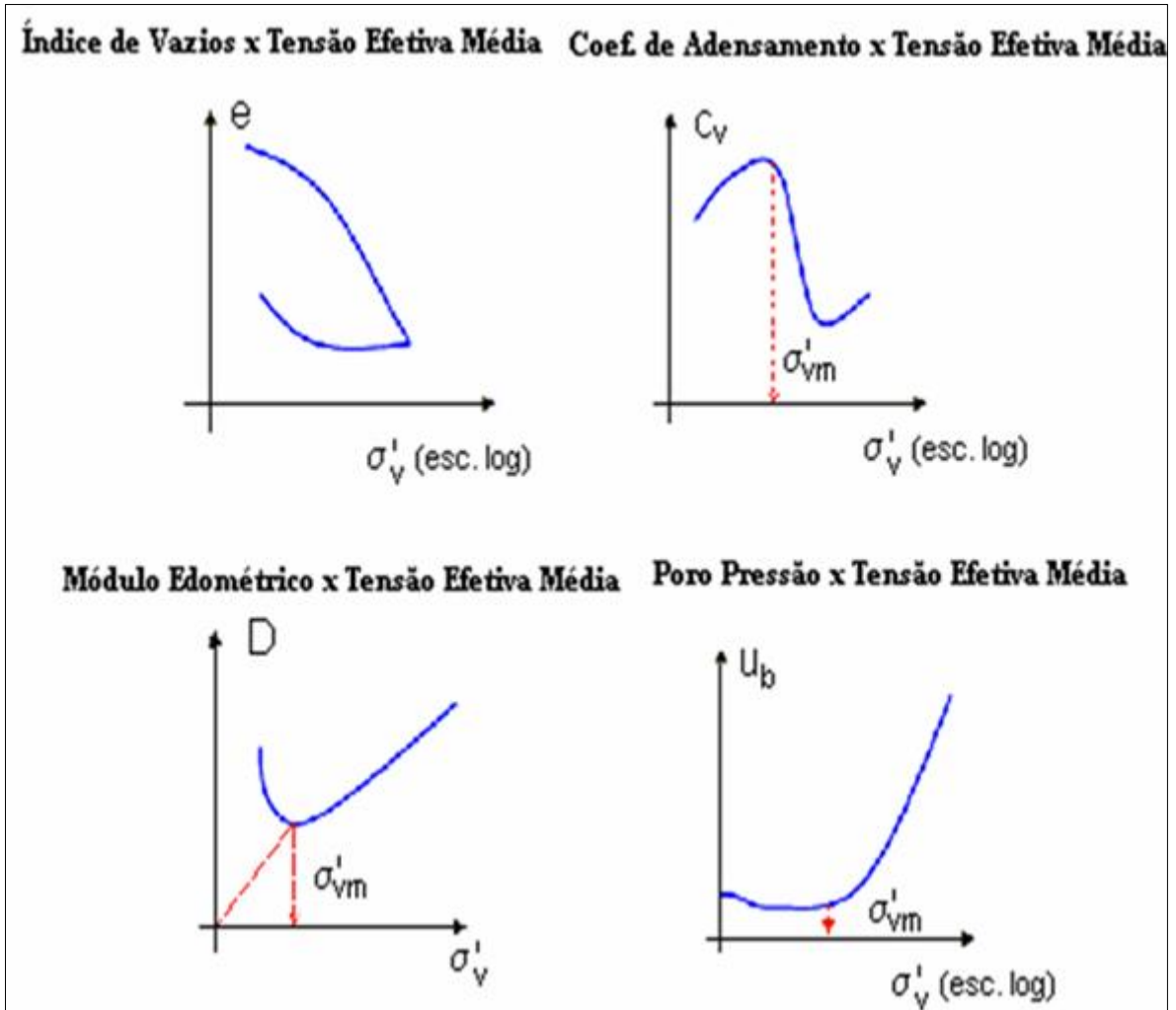


Figura 8: Gráficos típicos obtidos no ensaio CRS

Fonte: Head, 1986

2.3.2 Ensaio CRS

O ensaio de adensamento com velocidade de deformação controlada (CRS) foi desenvolvido, na década de 50, do século passado, com o intuito de diminuir o tempo de obtenção da tensão de pré-adensamento na argila de Leda, região leste do Canadá, por Hamilton e Crawford (1959). Esse ensaio foi parte integrante de um extenso programa de pesquisa destinado a avaliar a diferença entre os recalques observados e os previstos para edificações construídas sobre esta argila. As velocidades de deformação vertical adotadas no ensaio variaram de 0,009 mm/min até 0,03 mm/min.

Os resultados encontrados demonstraram que as velocidades de deformação vertical mais altas correspondiam aos maiores valores de tensão de pré-adensamento, o que mais tarde comprovou-se ser devido ao menor tempo de dissipação da poro pressão gerada, por sua vez, devido à maior velocidade utilizada no ensaio.

Desde então, diversos equipamentos e técnicas para a sua execução e cálculo foram desenvolvidos, permitindo que o ensaio fosse aprimorado e a sua fundamentação matemática perfeitamente aceita, não podendo se deixar de citar os trabalhos realizados por Smith e Wahls (1969), Wissa et al. (1971) e Gorman et al. (1978). Com o ganho de conhecimento possibilitado por estes estudos, diversos laboratórios passaram a incorporá-lo na sua prática geotécnica, padronizando-o. Dentre os países em que o ensaio é padronizado, a Suécia e Noruega se destacam pela larga utilização dada ao ensaio CRS. Na Noruega, a padronização é feita pelo Instituto Norueguês de Geotecnia (NGI).

O desenvolvimento teórico que possibilitou a padronização do ensaio CRS, em âmbito mundial, deve-se ao extenso trabalho exposto por Wissa et al. (1971), no qual a proposta de formulação leva em conta deformações infinitesimais. Porém, o pioneirismo na fundamentação matemática do ensaio se deve a Smith e Wahls (1969), que haviam proposto uma solução mais simplificada do problema, levando em conta deformações finitas.

Com a finalidade de dar uma nova interpretação ao ensaio com velocidade controlada de deformação (CRS), Wissa et al. (1971) propuseram uma fundamentação teórica embasada na Teoria de Terzaghi, exposta no item 2.5.1, onde supõem que as deformações sofridas pela amostra ensaiada são infinitesimais. Ao empregar a Teoria de Terzaghi, Wissa et al. (1971) desconsideraram a existência das três últimas hipóteses adotadas por Terzaghi, que são:

- Certas propriedades do solo (módulo edométrico e permeabilidade) permanecem invariáveis durante todo o desenrolar do adensamento;
- a tensão total se mantém constante ao longo do tempo;
- há uma relação linear entre as variações da tensão efetiva e o índice de vazios.

Os autores formulam duas novas hipóteses a serem adicionadas às restantes para a solução do problema:

- O coeficiente de adensamento c_v é constante;
- k ou m_v não tem qualquer relação particular com as tensões e deformações.

Com base nas hipóteses remanescentes de Terzaghi e com a adição das duas novas hipóteses transcritas acima, Wissa et al. (1971), a partir da análise de elementos infinitesimais, determinam equações para a obtenção dos resultados do ensaio de adensamento com velocidade controlada de deformação, como a seguir exposto:

a) Poro Pressão

Como a face superior do corpo de prova ($z=0$) é drenada, a poro pressão é igual a zero nessa face. A distribuição de poro pressão ao longo da altura do corpo de prova é expressa pela equação:

$$u = \frac{v \cdot \gamma_a \cdot H}{K} \left[z - \frac{z^2}{2H} \right] \quad (2.2)$$

Onde,

- v = coeficiente de Poison
- γ_a = peso específico da água
- K = coeficiente de permeabilidade
- z = distância entre a face superior e o ponto
- H = altura total do corpo de prova

b) Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (m_v)

Para m_v ser considerado constante, a distribuição de poro pressão deve ser independente do tempo. Dessa forma, o coeficiente de compressibilidade volumétrica é calculado por:

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \sigma_v} = v \cdot \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_v} \quad (2.3)$$

c) Coeficiente de Adensamento (c_v)

$$c_v = 0,263 \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta t} \cdot \frac{\bar{H}^2}{u_b} \quad (2.4)$$

d) Tensão Efetiva Vertical Média (σ'_v):

A deformação específica vertical média $\varepsilon_v = v.t$ sendo v é a velocidade de deformação aplicada ao ensaio e corresponde à tensão efetiva média que é dada por:

$$\sigma'_v = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \quad (2.5)$$

Esse valor médio da tensão efetiva (σ'_v) é o empregado na plotagem das curvas como “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” ou “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)”, assim como os valores obtidos para c_v , u_b e m_v , já ilustrados na Figura 8.

2.3.3 Parâmetros de velocidade de deformação para o ensaio CRS

A determinação da velocidade de deformação adequada a ser empregada no ensaio CRS deve levar em consideração o tipo de solo, o equipamento a ser utilizado e os objetivos a serem alcançados pelo estudo, além das limitações teóricas para a análise dos resultados. A velocidade de deformação do corpo de prova deve permitir que a poro pressão gerada na base seja suficientemente lenta de modo a obter resultados satisfatórios de coeficientes de adensamento e tensão de pré-adensamento e com rapidez conveniente para sua utilização com vantagens, sem prejuízo nos resultados.

Vários critérios existem hoje para a determinação da velocidade de deformação adequada para o ensaio CRS, entre os quais é possível se citar aqueles expostos por: Smith e Wahls (1969), Wissa et al. (1971), Gorman et al. (1978), Armour e Drnevich (1986), além do critério adotado pela *ASTM International*.

A maioria dos critérios sugeridos para a determinação da velocidade de deformação a relacionam está diretamente com a razão $\frac{u_b}{\sigma_v}$, ou então a associam também ao limite de liquidez do solo.

2.3.3.1 Critério de Smith e Wahls

Smith e Wahls (1969) interpretaram o ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS) e propuseram uma equação empírica para determinação desta velocidade:

$$v_e = \frac{C_v \cdot C_c}{m^2 H (1 + e_0)} \left[\frac{u_b / \sigma_v}{1 - 0,7(u_b / \sigma_v)} \right] \quad (2.6)$$

Onde,

$m = [(H - \Delta h) / H]$ calculado no momento que a razão u_b / σ_v atinge seu valor máximo;

Smith e Wahls (1969) sugerem que a razão u_b / σ_v jamais ultrapasse 50%.

2.3.3.2 Critério de Armours e Drnevich

Armours e Drnevich (1986) desenvolveram, a partir do tratamento teórico dado por Wissa et al. (1971), uma equação empírica para a determinação da velocidade de deformação:

$$v_e = \frac{-C \cdot Pa \cdot K_i}{\gamma_a \cdot H_i^2} \log \left[1 - \left(\frac{u_b}{\sigma_v} \right)_{\max} \right] \quad (2.7)$$

Onde,

- C= coeficiente intrínseco que depende do limite de liquidez do solo;
- Pa= pressão atmosférica;
- K_i = condutividade hidráulica inicial;
- $\left(\frac{u_b}{\sigma_v} \right)_{\max}$ = máximo valor da razão poro pressão/ tensão total desejada.

Armours e Drnevich (1986), com base em ensaios realizados em três solos com teores de umidade w iniciais diferentes, determinaram o valor do coeficiente C , como sendo:

$$C (\%) = \exp (8 - 3IL) \quad (2.8)$$

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

$$IL = (w - LP) / (LL - LP) \quad (2.9)$$

Para a definição de K_i , os autores sugeriram que esse parâmetro deve ser medido no próprio equipamento de ensaio CRS. O valor da razão $\left(\frac{u_b}{\sigma_v} \right)_{\max}$, máximo admissível, deve estar na faixa de variação entre 40% e 50%.

2.3.3.3 Critério de Carvalho

O método desenvolvido por Carvalho (1989) consiste em adotar para o ensaio CRS uma velocidade de deformação igual à encontrada no topo do corpo de prova num estágio convencional de carregamento para um certo grau de adensamento. Dessa forma, segundo o autor, o que teoricamente está sendo adotado é igualar os gradientes hidráulicos na face drenante de ambos os ensaios num determinado momento.

2.3.3.4 Critério da ASTM International

A *ASTM International*, através da norma D4186/98 que padroniza a execução do ensaio CRS, propõe que a velocidade de deformação utilizada no ensaio seja diretamente correlacionada ao limite de liquidez do solo, de acordo com a Tabela 6. A ASTM D4186/98 sugere que a razão $\frac{u_b}{\sigma_v}$ alcance valor limite de 30%.

Tabela 6: Velocidades de deformação em ensaios CRS recomendadas pela ASTM D4186/98

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

Fonte: ASTM International, 1998

2.3.4 Desenvolvimento do CRS ao longo dos anos

Com uma base teórica forte e tendo sido devidamente padronizado, o ensaio CRS passou a ser amplamente utilizado internacionalmente. Desde 1959 até hoje, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com o equipamento.

Crawford (1964) encaminhou novos argumentos aos estudos da influência da velocidade de deformação do corpo de prova considerando o valor da tensão de pré-adensamento na argila mole de Leda. Em ensaios, nos quais a velocidade variou entre 0,002 mm/min e 0,045 mm/min e a poro pressão ficou entre 5% e 8% do valor da tensão de pré-adensamento, o autor demonstrou que era verdadeira a afirmação de Hamilton e Crawford (1959) que a tensão de pré-adensamento é maior quanto maior for a velocidade de adensamento. O mesmo autor concluiu que a velocidade de deformação alcançada em laboratório pode ser milhões de vezes superior à encontrada em campo. Isso demonstra os riscos de simplesmente transportar os resultados de laboratório para campo.

Mais tarde, Crawford (1965) continuou seu estudo com a argila mole de Leda, apresentou novos resultados de ensaio com velocidade variando entre 0,0005 mm/min e 0,025

mm/min, gerando uma razão u_b/σ_v máxima de 15%. Dessa maneira, o autor chegou à conclusão de que a estrutura do solo desempenha um importante papel na compressibilidade e ainda observou a diminuição de u_b com o decréscimo da velocidade de deformação.

Wahls e Degodoy (1965) realizaram ensaios em amostra amolgada de uma argila siltosa, com limite de liquidez 69%, extraída no estado da Carolina do Norte, EUA, com a velocidade de deformação variando entre 0,01 mm/min e 0,045 mm/min, e o quociente entre a poro pressão e a tensão vertical variando entre 25% e 75%. Os autores comprovaram a afirmação de Crawford (1965), a partir da qual ocorre a diminuição de u_b com o decréscimo da velocidade de deformação.

Com base em dados de diversos ensaios CRS, em que a velocidade de deformação variou entre 0,0005 mm/min e 0,05 mm/min, realizados em amostras de argila caulinita e cálcio-montmorilonita de Massena remoldadas em laboratório, Smith e Wahls (1969) afirmaram que, para esses solos, a razão u_b/σ_v jamais deva ultrapassar a 50%. Segundo os mesmos autores, valores superiores a este limite não permitem assegurar uma distribuição uniforme da tensão efetiva ao longo da amostra.

A partir da plotagem dos gráficos “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)”, obtidos pelo ensaio CRS, e a comparação destes com os gráficos obtidos pelo ensaio incremental, Smith e Wahls (1969) afirmaram que os gráficos obtidos através dos ensaio CRS com as menores velocidades de deformação apresentaram uma boa similaridade com os incrementais.

No início da década de 70, Wissa et al. (1971) publicaram um amplo estudo a respeito do ensaio CRS. O material empregado no estudo foi a argila azul de Boston, nos Estados Unidos, reconstituída em laboratório. Os corpos de prova, após serem saturados a volume constante por uma contrapressão de 500 kPa, foram submetidos a velocidades de deformação que variaram entre 0,0025 mm/min e 0,009 mm/min, apresentando tensões efetivas máximas de 2.600 kPa. Em todos os corpos de prova, com exceção de um, foram aplicados ciclos de carga e descarga na amostra.

A Figura 9 apresenta resultados obtidos por Wissa et al. (1971), demonstrando a boa concordância entre a curva de compressão obtida através do ensaio CRS e dos ensaios

convencionais para o material estudado. Os autores ainda afirmam que não foi apreciável a influência da velocidade de deformação sobre os resultados do ensaio. O gráfico “ $D \times \sigma'_v$ ”, mostrado na Figura 10, demonstra perfeitamente o ocorrido.

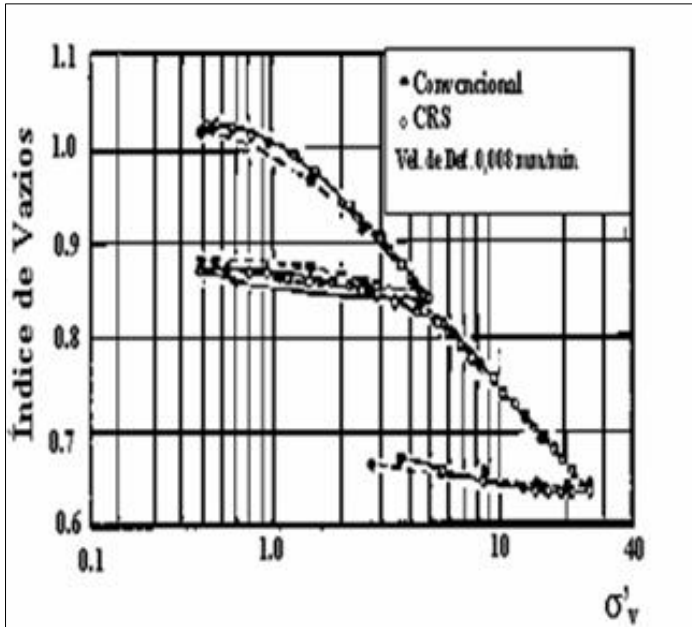


Figura 9: Gráfico “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” obtido no ensaio CRS comparado com o oriundo de ensaio convencional

Fonte: Wissa et al., 1971

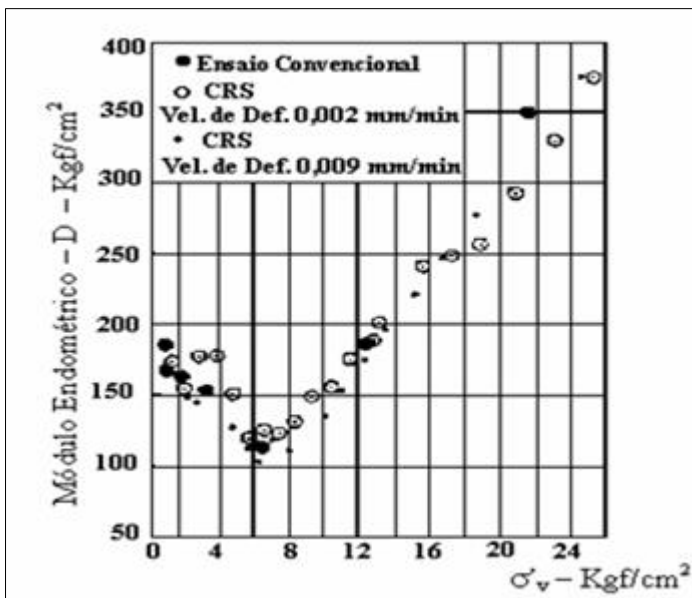


Figura 10: Comparação das curvas de módulo edométrico versus tensão vertical efetiva obtidas nos ensaio convencional e CRS

Fonte: Wissa et al. 1971

Os valores encontrados por Wissa et al. (1971) para os coeficientes de adensamento (c_v), através de seu método de cálculo, mostraram uma concordância aceitável com aqueles

obtidos por meio dos métodos de Taylor e Casagrande para os ensaios de adensamento convencionais. Os gráficos “ $M \times \sigma'_v$ (esc. log)” indicaram claramente a tensão de pré-adensamento, conforme proposto por Janbu (1969).

Wissa et al. (1971) fixam a faixa de variação da razão u_b/σ'_v a ser adotada para os ensaios CRS como sendo entre 2% e 5%. Segundo os autores, jamais se deve ficar fora dessa faixa, para que os valores dos gradientes hidráulicos não sejam excessivos.

Sällfors (1975) apresentou uma série de ensaios de adensamento com a argila de Bäckebol, com a intenção de demonstrar de forma circunstanciada a validade do emprego de ensaios CRS nesse material. A faixa de variação da velocidade de deformação ficou entre 0,0007 mm/min a 0,02 mm/min. As curvas de compressão encontradas por Sällfors (1975), para “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ ” mostraram grande semelhança com as realizadas através de ensaios incrementais com intervalo de aplicação de cargas igual a 24 horas.

Sällfors (1975) constatou também que a tensão de pré-adensamento depende da velocidade de deformação adotada no ensaio, confirmando o que já havia sido primeiramente afirmado por Hamilton e Crawford (1959): torna-se menor o valor da tensão de pré-adensamento toda vez que a velocidade de deformação do ensaio é diminuída. Sällfors (1975) percebeu ainda que, para valores de tensão vertical menores que a tensão de pré-adensamento, o módulo edométrico (D) aumenta com o acréscimo da velocidade de deformação e para valores acima da tensão de pré-adensamento o módulo edométrico (D) parece ser independente da velocidade de deformação aplicada.

Sällfors (1975), por fim, mediu o atrito entre a parede lateral do anel de adensamento e o corpo de prova por meio de um transdutor de força especialmente instalado para alcançar este objetivo. Esse transdutor mostrou uma perda de tensão vertical total entre 5% e 8% no caso de anéis de aço inoxidável lubrificados com graxa à base de silicone. Esses valores estão abaixo dos encontrados para o ensaio incremental.

Gorman et al. (1978), visando a determinar as características geotécnicas de diversos solos do estado do Kentucky, nos Estados Unidos, e testar a empregabilidade de novos ensaios de adensamento em investigação geotécnica rotineira, utilizou diversos tipos de ensaio no laboratório. Dentre os ensaios de adensamento empregados, é possível ressaltar o

uso do ensaio de adensamento com gradiente constante (CG) e do ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS). Com a grande variabilidade de propriedades geotécnicas apresentadas pelos diferentes solos e com as velocidades de deformação variando entre 0,0009 mm/min a 0,02 mm/min, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- Existe boa concordância entre os valores de c_v , desde que seja ultrapassada a tensão de pré-adensamento;
- A razão u_b / σ_v deve se situar entre 30% e 50% e ser de tal grandeza que gere pelo menos uma poro pressão mínima de 7 kPa;
- Houve uma variação de até 300% no valor da tensão de pré-adensamento entre os ensaios CRS e os ensaios incrementais.

Leroueil et al. (1983), com intuito de determinar os valores das tensões de pré-adensamento sob o centro de um aterro experimental de Gloucester, Canadá, e compará-los com os resultados em campo, utilizaram-se de cinco modalidades de ensaio de adensamento especiais além do método convencional. Quanto ao ensaio CRS, os mesmos autores concluíram que o efeito da velocidade de deformação sobre a compressibilidade aparentemente não se comporta conforme previsto por Sällfors (1975), que havia encontrado para o trecho normalmente adensado da curva de compressão uma relação entre o aumento da compressibilidade com o aumento da velocidade de deformação.

Leroueil et al. (1985), com o objetivo de estabelecer um modelo reológico para as argilas moles do Leste do Canadá, realizaram uma vasta campanha de ensaios edométricos, convencionais ou não. Entre esses, o ensaio CRS foi selecionado para determinar os parâmetros de compressibilidade deste solo argiloso. As velocidades de deformação adotadas foram de $8,35 \times 10^{-7}$ mm/min até 0,002 mm/min. Os autores chamaram a atenção para o fato de que os valores de poro pressão na base para velocidades menores que $2,5 \times 10^{-5}$ mm/min eram muito pequenos, sendo incapazes de medi-los.

O pioneirismo na introdução do ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS), no Brasil, se deve ao Laboratório de Mecânica dos Solos da COPPE/UFRJ. Em meados de 1988, um equipamento da marca *Tricon* foi adquirido para realização do ensaio CRS. O novo equipamento sofreu pequenos ajustes e requereu o desenvolvimento de um programa de aquisição e processamento automático de dados, além

de uma padronização da rotina de ensaio para se adequar às peculiaridades das argilas moles da Baixada Fluminense no estado do Rio de Janeiro.

Carvalho (1989) apresentou detalhadamente o estudo realizado com o novo equipamento. Foram ensaiadas cinco amostras com equipamento convencional, provenientes de dois depósitos de argila mole diferentes, situados na Baixada Fluminense. O primeiro solo foi a argila de Caju; trata-se de uma argila siltosa de cor acinzentada, com presença de mica e fragmentos de valva, com consistência muito mole a mole. O segundo solo ensaiado foi a argila de Sarapuí; trata-se também de uma argila mole de cor cinza, com teor de matéria orgânica da ordem de 5%. Após a conclusão dos ensaios convencionais, Carvalho (1989) realizou mais nove ensaios no equipamento CRS; desses, quatro, não chegaram a bons resultados devido a problemas apresentados pelo equipamento adquirido, que foram solucionados. A velocidade de deformação empregada nesses ensaios variou entre 0,002 mm/min e 0,01 mm/min, o que levou os ensaios a durarem entre 16 e 79 horas. O emprego da contrapressão foi desconsiderado por Carvalho (1989), primeiro porque o solo se encontrava saturado e depois, porque os ensaios se dedicavam exclusivamente à comparação com o ensaio convencional. A inclusão, segundo o autor, de contrapressão poderia trazer resultados que não pudessem ser comparados com os convencionais.

Os ensaios de Carvalho (1989) apresentaram valores máximos da razão u_b/σ_v entre 10% e 32%. Entre os ensaios que foram classificados como aceitáveis, todos apresentaram excelente concordância com os resultados dos ensaios incrementais. A Figura 11 demonstra essa afirmação para as curvas “ ε_v x σ'_v (esc. log)”.

As tensões de pré-adensamento, determinadas por Carvalho (1989) pelo método de Casagrande para os ensaios incrementais e CRS, apresentaram boa concordância quando comparadas. Para os ensaios incrementais os valores de σ'_{vm} variaram de 28 a 38 kPa; por sua vez o ensaio CRS apresentou uma variação entre 26 e 38 kPa. O coeficiente de adensamento, no trecho normalmente adensado, apresentou concordância razoável entre os resultados obtidos nos dois tipos de ensaio, enquanto que, para a faixa pré-adensada, ocorreu uma forte dispersão, como mostra a Figura 12.

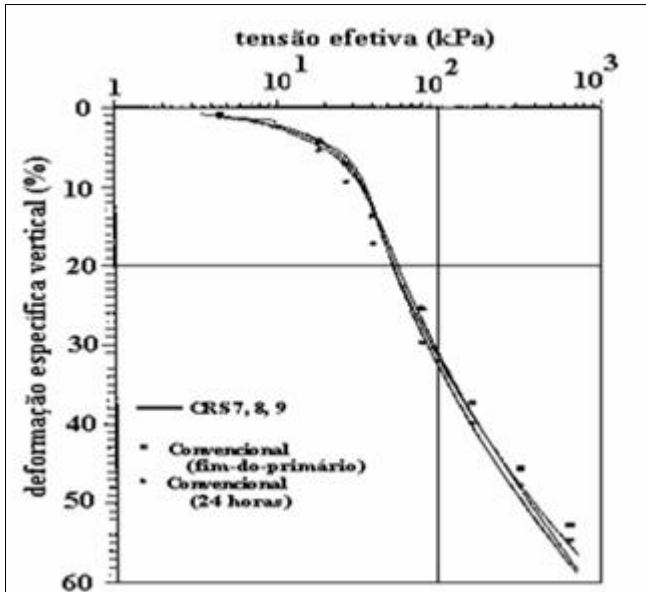


Figura 11: Curvas “ $\epsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” dos ensaios CRS n° 7, 8,9 e do ensaio convencional (prof. 5,0 a 5,5m),

Fonte: Carvalho, 1989

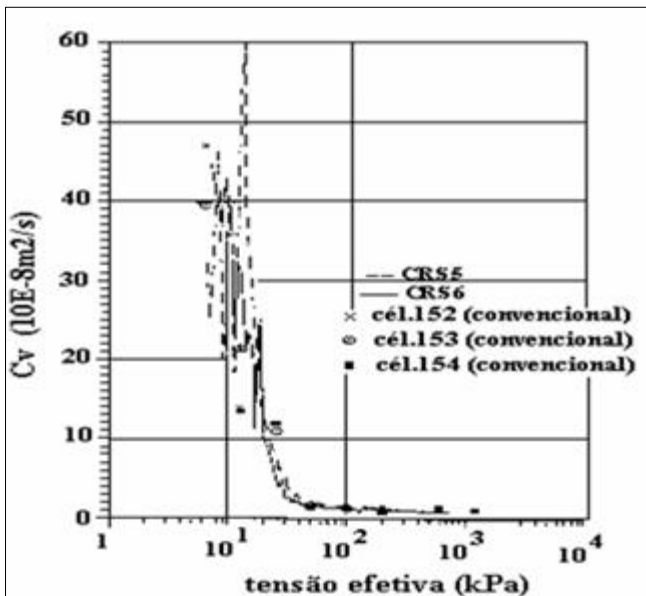


Figura 12: Comparação dos valores de coeficientes de adensamento obtidos com ensaios CRS e ensaios convencionais

Fonte: Carvalho, 1989

Sheahan e Watters (1996) utilizaram uma célula Rowe para a realização de ensaios CRS. A campanha de ensaios contemplou um total de seis ensaios, com duração variando de 10 a 12 horas por ensaio, na argila azul de Boston. Foram utilizadas duas velocidades de deformação, iguais a 0,001 mm/min e 0,01 mm/min para cada grupo de três ensaios, sendo

comparados com os resultados de quatro ensaios de adensamento convencional. A razão u_b/σ_v atingiu o valor máximo de 22%.

Nos ensaios realizados por Sheahan e Watters (1996), a tensão de pré-adensamento apresentou valores médios com boa aproximação aos valores alcançados no ensaio convencional. As curvas dos gráficos “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” mostraram boa concordância para os diferentes ensaios, especialmente no trecho normalmente adensado, conforme mostra a Figura 13.

Confirmando o que já havia sido comentado por Gorman et al. (1978), os valores de c_v abaixo da tensão de pré-adensamento se apresentaram bastantes dispersos. Isso se deve, segundo Sheahan e Watters (1996), ao comportamento transiente do solo. Entretanto, os valores de coeficiente de adensamento (c_v) encontrados no ensaio CRS com a utilização da célula de Rowe apresentaram valores semelhantes ao do ensaio de adensamento convencional, demonstrando a eficácia do emprego da célula de Rowe na determinação de parâmetros de compressibilidade do solo.

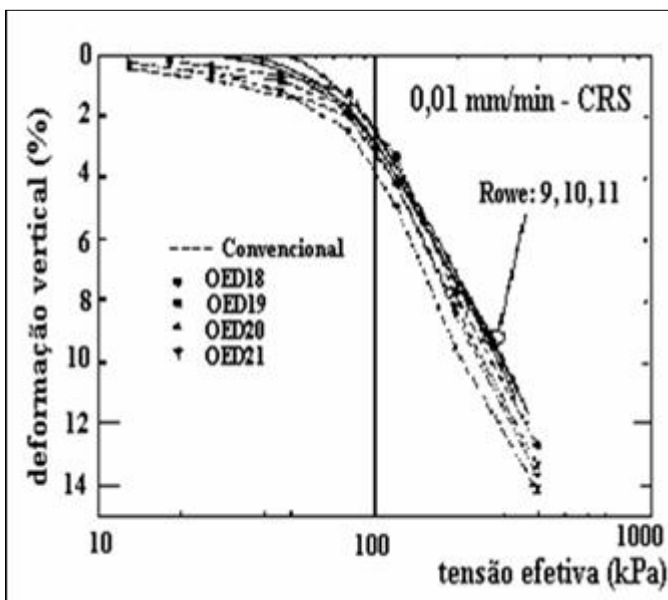


Figura 13: Comparação entre as curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc log)” obtidas no ensaio CRS com célula Rowe e no ensaio convencional

Fonte: Sheahan e Watters, 1996

Alborta (1997) realizou nove ensaios CRS em amostra reconstituída de uma argila caolínica, com a finalidade de analisar o comportamento dos ensaios quando alguns fatores são modificados. Seis desses ensaios avaliaram apenas o efeito da variação da velocidade de

deformação; os demais verificaram o efeito da variação dos demais fatores no ensaio CRS, tal como a aplicação ou não de contrapressão no corpo de prova. O material analisado apresentou valores médios de limite de liquidez de 48%, de índice de plasticidade de 22,5% e de teor de umidade natural do solo de 35%. O índice de vazios inicial variou entre 0,9 e 1,3.

Alborta (1997) utilizou velocidades de deformação que variaram entre 0,001 mm/min e 0,01 mm/min. De maneira geral, os resultados encontrados com o ensaio CRS foram similares aos alcançados pelo método convencional, apresentando boa concordância para o coeficiente de adensamento (c_v), mesmo tendo um valor um pouco menor que o obtido no ensaio convencional (Figura 14). O principal motivo da ocorrência de dispersão no ensaio de adensamento convencional se deve primordialmente à diferença de tamanho de amostra.

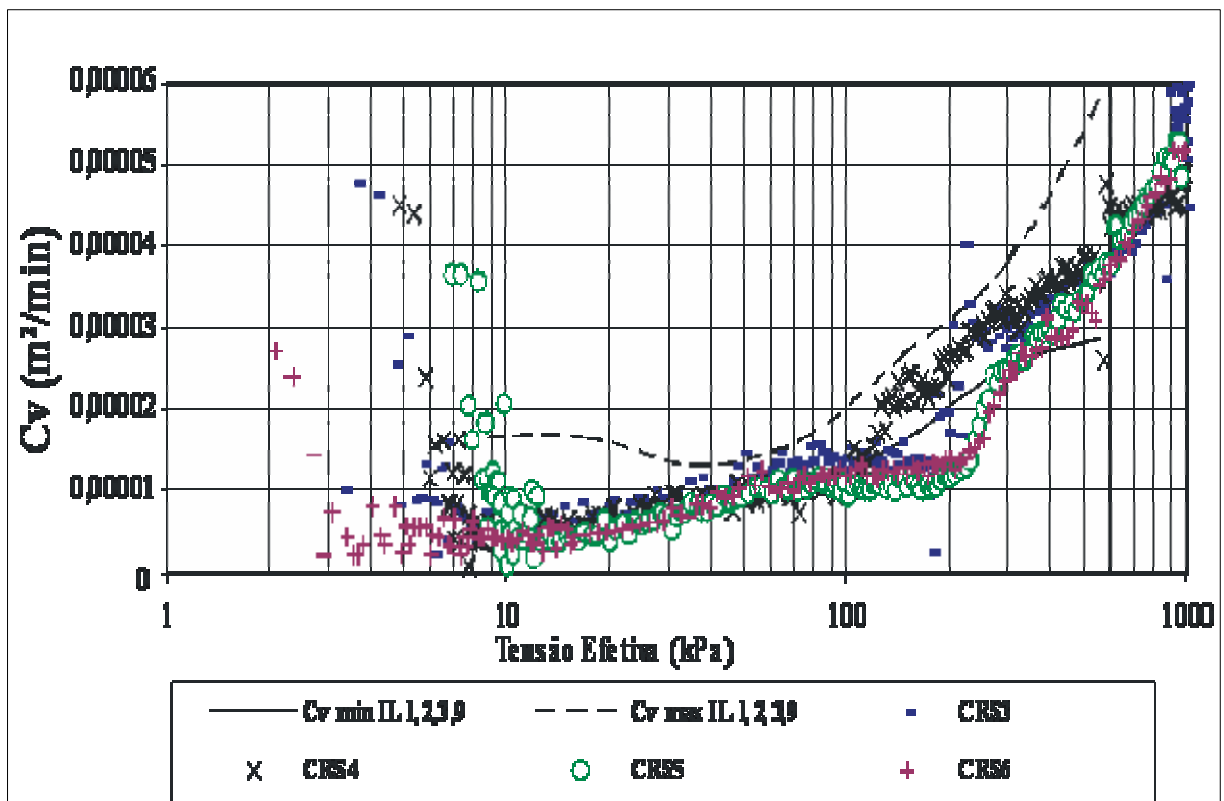


Figura 14: Curvas “ $c_v \times \sigma_v$ (esc log)” obtidas nos ensaios CRS e convencionais
Fonte: Alborta, 1997

Alborta (1997) confirma também o exposto por Sällfors (1975): quando é ultrapassada a tensão de pré-adensamento os valores de módulo edométrico (D) tendem a convergir e aproximam-se dos resultados do ensaio incremental. (Figura 15)

Alborta (1997) comenta, ainda, que a limitação imposta pela ASTM para a razão u_b/σ_v no valor máximo de 30% é conservadora, pois a razão u_b/σ_v deve variar de acordo com o tipo de solo testado e com a história de tensões apresentada pela amostra.

Sheahan e Watters (1997) e Alborta (1997) afirmam que, para as argilas reconstituídas, a velocidade de deformação influencia mais os resultados de compressão, como tensão de pré-adensamento e coeficiente de adensamento do que para as argilas naturais. Esse fato se deve à presença de uma estrutura ser menor nas amostras reconstituídas do que nas naturais, pois essas últimas apresentam uma história de tensões mais complexa. Porém, a adoção de uma velocidade de deformação muito baixa ou muito alta, independentemente do tipo de amostra, compromete a qualidade dos resultados.

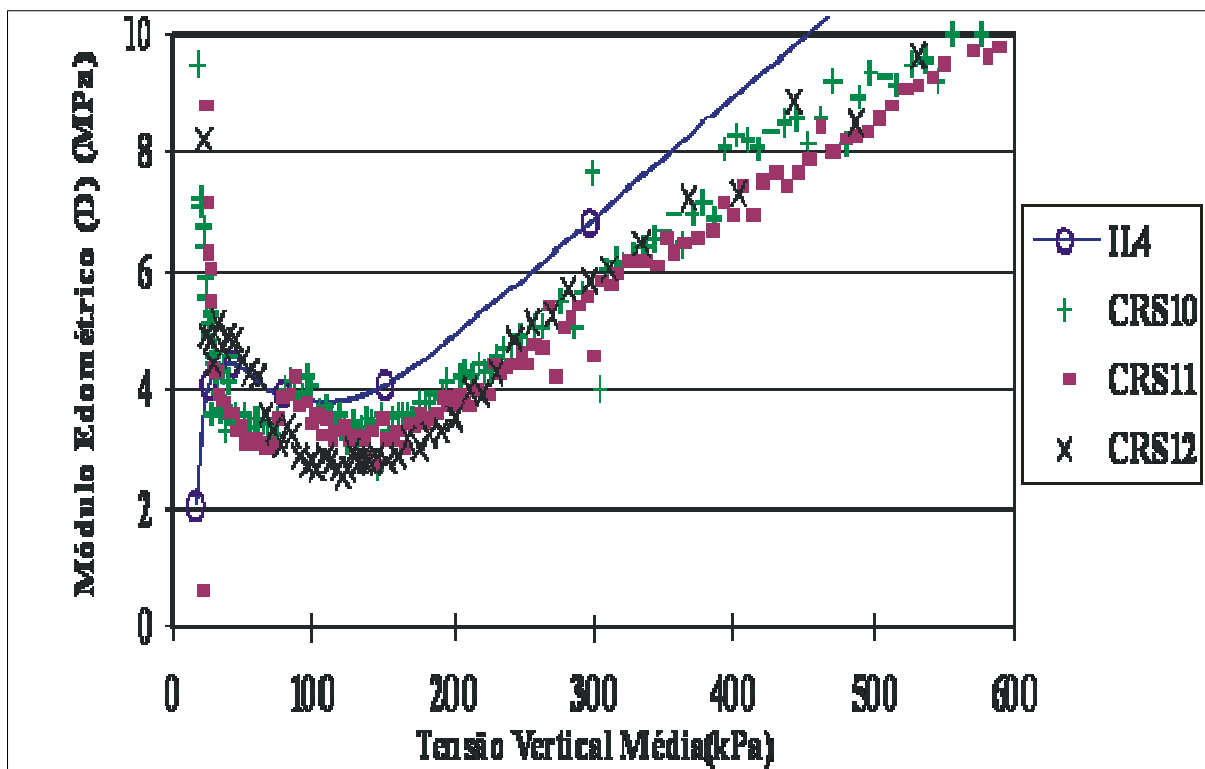


Figura 15: Curvas “D x σ_v ” obtidas nos ensaios CRS e convencionais

Fonte: Alborta, 1997

Baptista (1998) estudou as características geotécnicas da argila mole da enseada do Cabrito, em Salvador, na Bahia, onde foi implantado um aterro objetivando o assentamento de famílias. As propriedades geotécnicas do solo foram determinadas a partir de ensaios de campo e laboratório. Entre os diversos ensaios realizados por Baptista (1998) em laboratório,

o ensaio CRS foi adotado juntamente com ensaios de adensamento convencionais. O solo estudado apresentou compressibilidade elevada, apresentando valores de C_c de 0,84, para o ensaio convencional e de 0,94 para o ensaio CRS; o índice de vazios inicial variou em uma faixa de 1,70 a 2,83 e o valor de c_v encontrado para este solo foi de $3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Com a velocidade de deformação variando entre 0,0015 e 0,0090 mm/min, o ensaio CRS mostrou-se de grande utilidade para a obtenção de resultados confiáveis e semelhantes ao conseguidos pelo método convencional, além de possibilitar uma geração de pontos experimentais bem superior ao convencional.

Baptista (1998) observou a presença de altos valores de c_v no início dos ensaios CRS. Segundo o autor, isso acontece devido à existência de um fluxo transiente de água no corpo de prova, que estaria diminuindo o valor da poro pressão, tornando-a muito pequena. A Figura 16 mostra a variação de c_v com a tensão vertical efetiva para os ensaios realizados com uma amostra. O gráfico delimita uma tendência de concordância entre o ensaio CRS e o ensaio convencional para tensões verticais maiores em que a de pré-adensamento, confirmando o exposto por Gorman et al. (1978). Além disso, a figura mostra a diminuição do valor de c_v com o aumento da tensão vertical efetiva. Na Figura 17, são mostradas as curvas de compressão obtidas com ensaios CRS e convencional em uma das amostras, onde é possível observar uma boa concordância entre os ensaios, utilizando ambas as técnicas.

Kassin e Clarke (1999) verificaram a alteração das características de compressibilidade quando um solo de argila caulínica é estabilizado com cal. Além de ensaios CRS, ensaios de adensamento convencionais foram realizados com a finalidade de permitir comparações com o ensaio CRS e averiguar a eficiência desse equipamento. Os autores utilizaram para a argila pura uma contrapressão de 50 kPa e uma velocidade de deformação que variou entre 0,03 mm/min e 0,05 mm/min. Isso resultou em ensaios extremamente rápidos, que jamais ultrapassaram 3 horas de duração; a razão u_b/σ_v alcançada no ensaio foi de 10%.

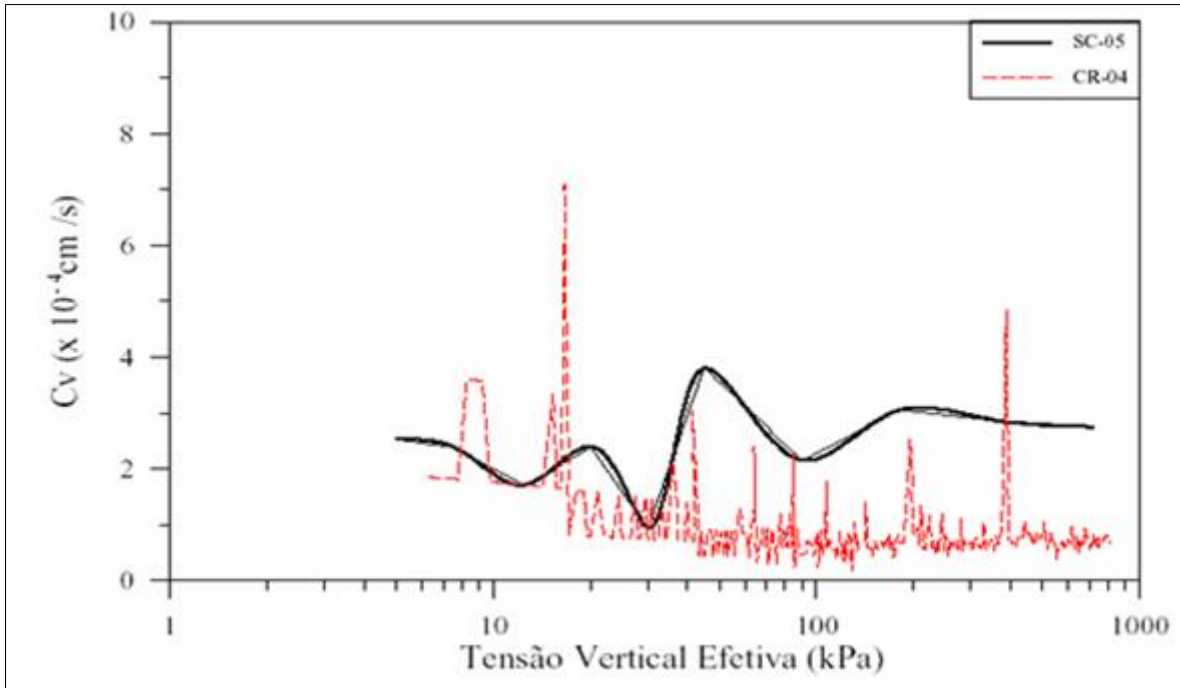


Figura 16: Variação de c_v com σ'_v observada em um ensaio CRS e um ensaio convencional
 Fonte: Baptista, 1998

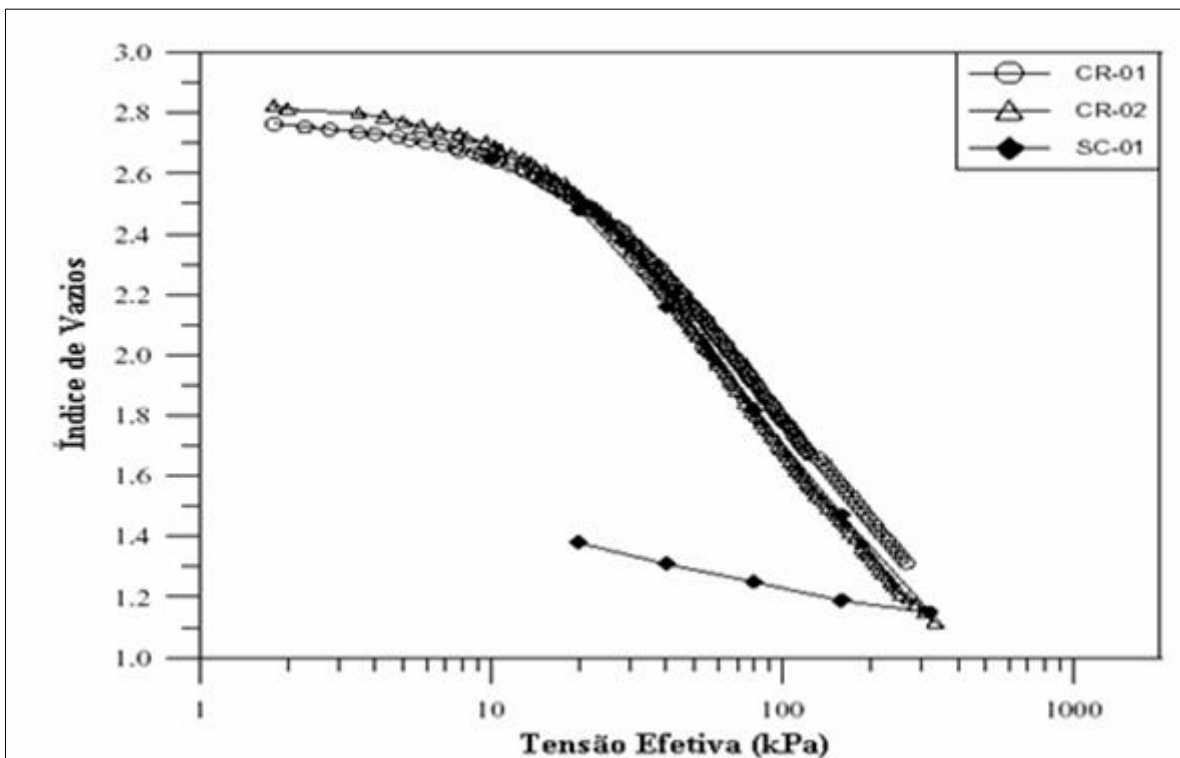


Figura 17: Curvas “ e x σ'_v (esc log)” obtidas com ensaios convencionais e CRS
 Fonte: Baptista, 1998

Para o material estabilizado com 6% de cal, foram realizados ensaios de adensamento, após 14 e 28 dias de cura, com a finalidade de comparar os resultados. A velocidade de

deformação utilizada foi de 0,065 mm/min, com o tempo de duração variando entre 27 e 90 minutos. Os resultados, conforme a hipótese levantada pelos autores, mostraram que a adição de cal e o tempo de cura da mesma resultaram num aumento de rigidez das amostras. A comparação entre os ensaios CRS e convencional mostrou boa similaridade, comprovando a eficácia do equipamento utilizado.

Leroueil e Hight (2002), ao revisarem o trabalho de Leroueil et al. (1985), demonstraram o efeito da velocidade de deformação na obtenção das curvas “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)”. Por meio desse estudo, os autores concluem que essas curvas de “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)” estão intimamente ligadas à velocidade de deformação que as criou, conforme já havia sido observado por outros autores, como Crawford (1965) e Sällfors (1975). Por consequência, segundo os mesmos autores, a tensão de pré-adensamento tem ligação direta com a velocidade de deformação utilizada no ensaio CRS. Como já havia sido afirmado por Hamilton e Crawford (1959), quanto maior a velocidade de deformação, maior será a tensão de pré-adensamento encontrada pelo ensaio.

Como em Leroueil et al. (1985), Leroueil (1988) delineou o efeito da velocidade de deformação sobre as curvas de “ $\varepsilon_v \times \sigma'_v$ (esc. log)”. Admitindo-se que o adensamento primário é completado ao final de 24 horas de ensaio, tempo adotado também como suficiente para que ocorra um novo carregamento no ensaio de adensamento convencional pela ABNT-MB-3336/90, a velocidade de deformação final do período de carregamento pode ser expressa pela equação (LEROUEIL, 1988):

$$v_{24hs} (s^{-1}) = 2 \times 10^{-7} \frac{C_c}{1 + e_0} \quad (2.10)$$

Leroueil e Hight (2002) afirmam que a velocidade de deformação calculada pela equação 2.10 geralmente é menor do que as empregadas nos ensaios CRS. Em função disso, a tensão de pré-adensamento e as tensões efetivas medidas no ensaio CRS são sempre significativamente maiores que as obtidas com os ensaios incrementais. Segundo Leroueil (1996), que comparou valores de tensão de pré-adensamento em argilas determinados em vários países com os ensaios CRS e convencional, a variação entre a tensão de pré-adensamento obtida pelo ensaio convencional e pelo ensaio CRS é sempre superior a 15%, a favor desse último.

Spannenberg (2003) realizou ensaios CRS na argila mole de Sarapuí na Baixada Fluminense, no estado do Rio de Janeiro. A velocidade de deformação empregada nos ensaios foi estudada a partir da razão de poro-pressão u_b/σ_v gerada nos corpos de prova. A Tabela 7 reproduz o critério adotado pela autora para escolher a velocidade de deformação a ser empregada em cada amostra.

Tabela 7: Velocidade de Deformação dos Ensaiois CRS

Ensaio nº	CRS-01	CRS-02	CRS-03	CRS-04	CRS-05
Velocidade (mm/min)	0,082	0,035	0,007	0,007	0,002
Velocidade deformação (s ⁻¹)	$6,8 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$0,58 \times 10^{-5}$	$0,58 \times 10^{-5}$	$0,17 \times 10^{-5}$

Nota: o ensaio CRS-04 foi realizado com amostra amolgada

Fonte: Spannenberg, 2003

Os corpos de prova CRS-03 e CRS-04 apresentaram a mesma velocidade de deformação. Porém, Spannenberg (2003) informa que a razão u_b/σ_v foi maior no corpo de prova CRS-04, pois o amolgamento da amostra gerou poro pressões superiores às encontradas no ensaio CRS-03. Segundo Spannenberg (2003), os ensaios CRS em amostras indeformadas permitiram verificar que os parâmetros de compressibilidade variaram com a velocidade de deformação imposta. A velocidade de deformação estimada para os ensaios incrementais convencionais, considerando o tempo de final de estágio, foi inferior a 0,0024 mm/min. O ensaio CRS-05 realizado com velocidade de 0,002 mm/min apresentou melhores enquadramentos nos padrões definidos como aceitáveis para a razão de poro pressão ($u_b/\sigma_v = 7\%$) no corpo de prova, além de apresentar maior semelhança nas curvas “ $\frac{e}{e_0} \times \sigma'_v$ (esc log)” com os ensaios convencionais, uma vez que as velocidades entre os ensaios CRS e convencionais estão muito próximas.

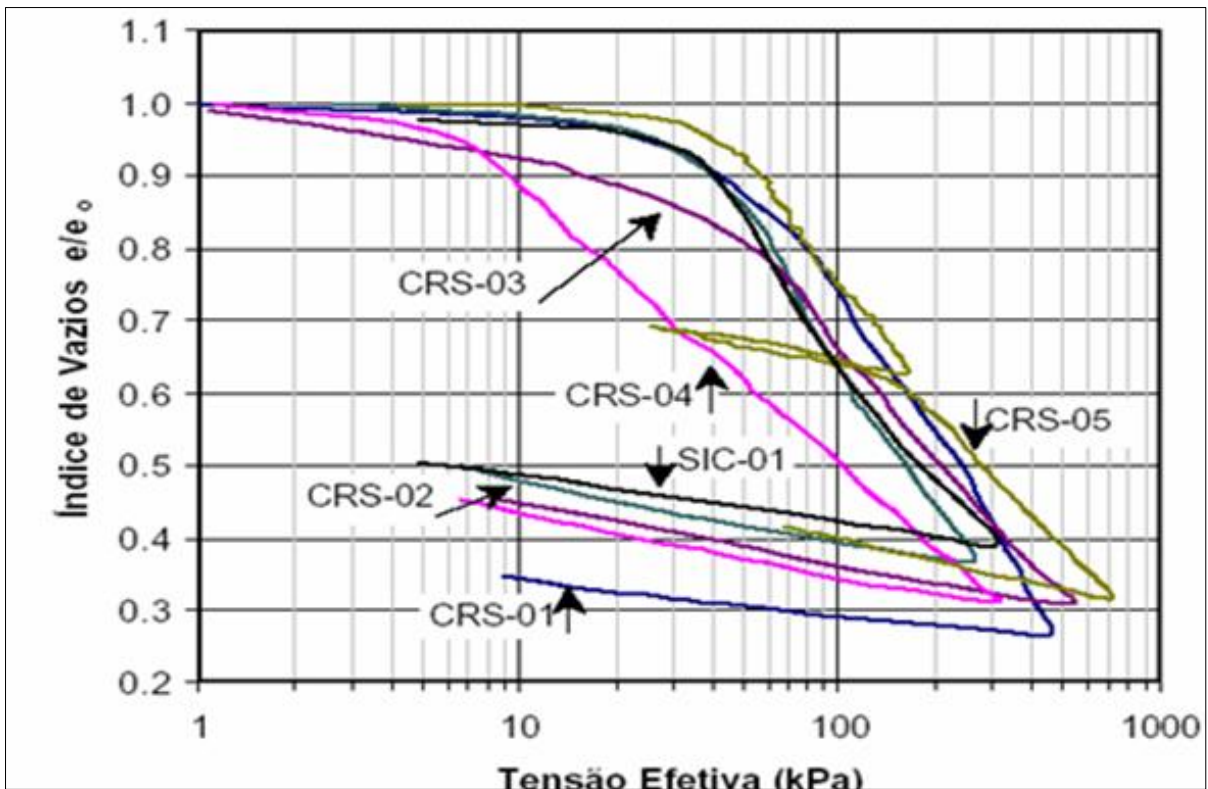


Figura 18: Comparação entre as curvas “ $e/e_0 \times \sigma'_v$ (esc log)” para os ensaios convencional e CRS para a argila de Sarapuí
 Fonte: Spannenberg, 2003

Os resultados típicos dos índices de compressibilidade, obtidos por Spannenberg (2003) para os ensaios CRS foram $C_c = 1,51$, $C_s = 0,28$ e $OCR = 1,47$ (Figura 18). A amostra amolgada indicou uma redução da tensão de pré-adensamento e, portanto, do valor de OCR. Além disso, os índices de compressibilidade e os coeficientes de adensamento e de permeabilidade são também menores que os obtidos para o material indeformado.

Os valores do coeficiente de adensamento c_v obtidos nos ensaios convencionais pelo método de Taylor ($2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$), segundo Spannenberg (2003), mostraram-se cerca de duas vezes maiores que os valores obtidos pelo método de Casagrande ($\log t$). No ensaio de adensamento CRS-05, o valor de c_v no trecho normalmente adensado, foi da ordem de $1,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$. Das análises da influência da velocidade de deformação que Spannenberg (2003) realizou, pode-se concluir que os valores de m_v , c_v e k sofrem redução quando o ensaio é mais lento. A velocidade de deformação tende a apresentar menor influência sobre os resultados do ensaio de adensamento para maiores valores de σ'_v .

Moura (2004) realizou ensaios CRS em argilas moles oriundas da costa leste do estado de Santa Catarina, sendo duas coletadas no município de Florianópolis e outras três no município de Joinville. O programa de ensaios contou, no total, com nove ensaios CRS.

A fim de comprovar a eficácia do equipamento utilizado, Moura (2004) comparou os resultados obtidos pelos ensaios CRS com os encontrados por ensaios de adensamento convencionais. A velocidade de deformação utilizada nos ensaios CRS variou de 0,0060 mm/min até 0,015 mm/min, atingindo valores máximos da razão u_b/σ_v da ordem de 41%. As curvas de “ $e \times \sigma'_v$ (esc. log)” plotadas demonstram boa concordância entre os ensaios CRS e convencional, para o trecho de compressão virgem, enquanto no trecho de recompressão os resultados apresentados por Moura (2004) apresentam pequena semelhança. A tensão de pré-adensamento para os ensaios CRS ficou acima das calculadas a partir da curva dos ensaios convencionais, conforme mostra a Figura 19.

Moura (2004) comparou a eficiência de diversas equações para determinação da velocidade de deformação a ser imposta ao corpo de prova. A equação que apresentou maior semelhança com a velocidade adotada foi a do método de Armours e Drnevich (1986).

Segundo o autor, a velocidade de deformação aplicada nos ensaios CRS mostrou maior influência em alguns parâmetros do ensaio do que em outros, como por exemplo a tensão de pré-adensamento. Foi possível perceber que, quanto maior for o valor da velocidade de deformação aplicada, maior será o acréscimo de poro pressão u_b gerada na base, ou seja a razão u_b/σ_v depende muito da velocidade do ensaio.

Moura (2004) também ressalva que os valores de c_v nos ensaios CRS são extremamente sensíveis à dispersão observada nas leituras do transdutor de poro pressão, mostrando a necessidade da utilização de um transdutor com boa precisão.

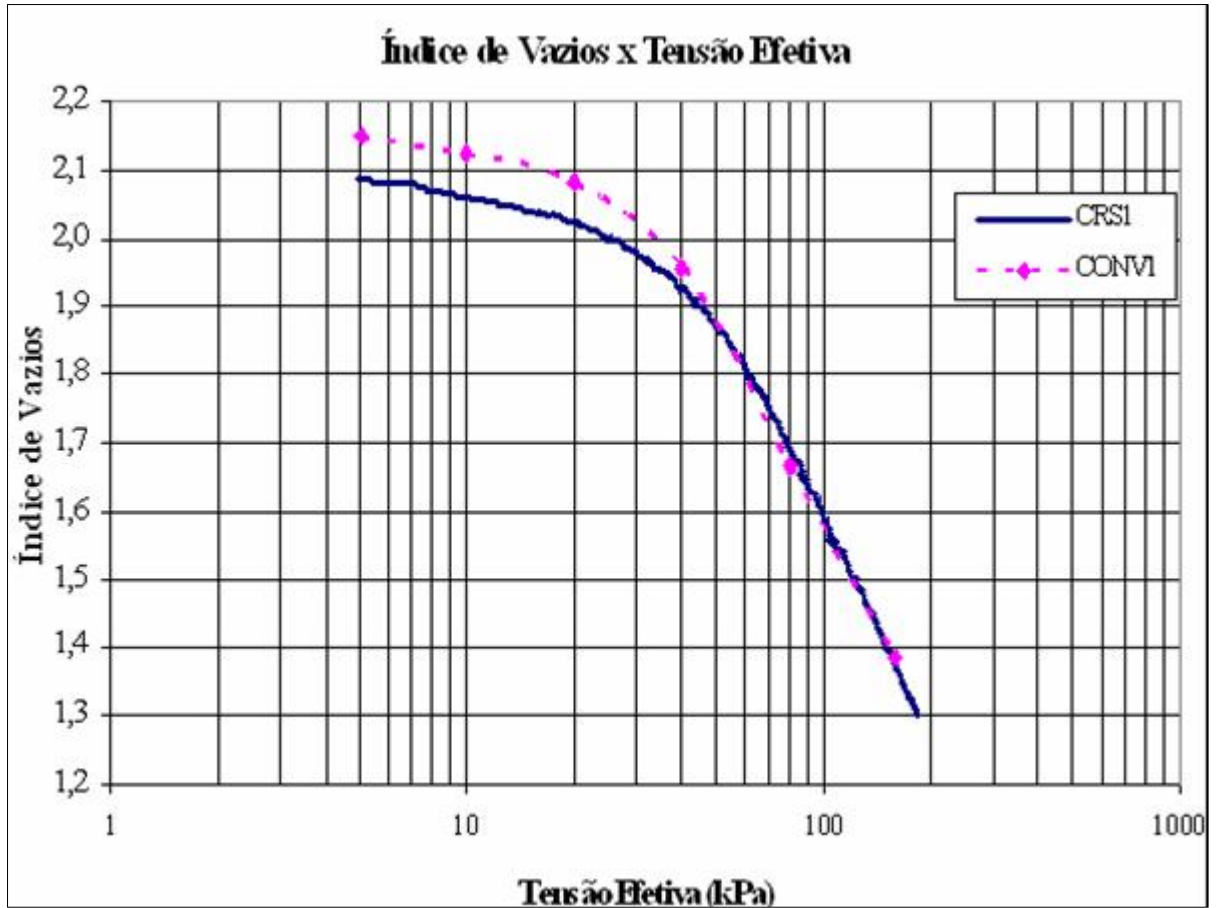


Figura 19: Comparação entre as curvas “ $e_v \times \sigma_v$ (esc log)” para os ensaios convencional e CRS para a argila mole de Florianópolis

Fonte: Moura, 2004

3 COLETA E CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS INVESTIGADOS

Este capítulo trata sobre os resultados dos ensaios de caracterização das amostras, revelando suas características físicas dos solos investigados. Foram coletados dois tipos de solos, o primeiro solo, uma areia, teve coleta junto às margens da Free Way, no trevo de acesso a Santo Antônio da Patrulha; o segundo solo, uma argila, foi extraído próximo ao prédio da administração da Infraero às margens a Av. Sertório. Neste capítulo também estão descritas as atividades de amostragem realizadas em campo.

3.1 AREIA SILTOSA

Areias em geral apresentam pequena deformabilidade em ensaios de adensamento e rapidez na dissipação do excesso de poro pressão. O emprego de um solo arenoso, nesta dissertação, deve-se à rapidez dos ensaios de adensamento convencionais e dos ensaios CRS comparativos, demonstrando a eficácia ou não do equipamento desenvolvido num pequeno espaço de tempo.

3.1.1 Localização da jazida

As amostras de solo arenoso empregadas foram coletadas às margens do km 26 da rodovia BR-290 (Free Way), no sentido Osório – Porto Alegre, junto ao entroncamento com a rodovia RS-474, no município de Santo Antônio da Patrulha. A escolha desse local de amostragem ocorreu pelo fato do terreno se encontrar limpo e escavado até uma cota um pouco abaixo da prevista para a coleta (construção de um açude no local). Para a escolha da profundidade de extração da amostra, considerou-se o fato da mesma estar pré-adensada, e a dificuldade de extração dos corpos de prova abaixo do nível do lençol freático devido a sua pequena concentração de finos, levando a uma profundidade média de amostragem entre 1,00 e 1,20 m, valores, ligeiramente, acima do lençol freático. Foram coletadas do local 11 amostras indeformadas para serem utilizadas em ensaios de adensamento convencional e ensaios CRS, além de amostras deformadas para serem empregadas em ensaios de

caracterização do solo. As Figuras 20 e 21 mostram o local de amostragem e detalhes sobre a moldagem.



Figura 20: Localização da jazida de solo arenoso de Santo Antônio da Patrulha, adaptada do web site da empresa Concepa S.A.

Fonte: www.concepa.com.br



Figura 21: Pontos de amostragem do solo arenoso de Santo Antônio da Patrulha no talude de escavação

3.1.2 Coleta e armazenamento das amostras

As amostras indeformadas foram coletadas diretamente nos próprios anéis de adensamento, com diâmetro nominal de 50 mm e altura de 19 mm, para serem utilizadas nos ensaios de adensamento convencionais. Para possibilitar a extração de um número suficiente de amostras indeformadas para o ensaio CRS, foram utilizados outros anéis de adensamento, com diâmetro de 100 mm e altura de 20 mm. O emprego de anéis de maior diâmetro para essa amostragem se deve à existência no LAGEO/UFRGS de apenas um anel de adensamento compatível com a câmara CRS construída. A Figura 22 mostra a colocação do anel de adensamento com a borda cortante voltada para baixo em uma superfície plana escavada neste solo. Cada anel foi cravado lentamente, e as arestas excedentes de solo foram cuidadosamente removidas com uma espátula.



Figura 22: Colocação de um anel de adensamento com diâmetro 49,7 mm e altura 19,2 mm sobre a superfície escavada do solo de Santo Antônio da Patrulha

Após a cravação completa do anel na amostra de solo, continuava-se a cravação por uma profundidade adicional de aproximadamente 30 mm abaixo da superfície escavada. Esse procedimento foi feito para minimizar o risco da amostra coletada, apresentando algum amolgamento significativo durante a amostragem.

Terminada a extração da amostra do talude, suas faces superior e inferior eram aparadas cuidadosamente, deixando-as em forma ligeiramente cônica. Isso permitia a manutenção de uma quantidade de solo adicional nas extremidades do corpo de prova, suficiente para ser determinado o teor de umidade do solo no momento de realização do ensaio de adensamento.

Com a finalidade de conservar o teor de umidade natural do solo, imediatamente após a retirada do anel de adensamento, o mesmo era envelopado em filme plástico. Depois da primeira embalagem os corpos de prova eram envoltos em sacos plásticos, para que o seu teor de umidade natural não fosse alterado no trajeto do campo até o laboratório. Chegando no laboratório, os corpos de prova eram imediatamente colocados em uma câmara úmida, com a

mesma finalidade, possibilitando assim o armazenamento de longo prazo. De modo a impedir que possíveis danos fossem causados às amostras durante o transporte, estas foram acondicionadas de forma cuidadosa em uma caixa de papelão, contendo um colchão de serragem umedecida que envolvia cada amostra coletada.

Por sua vez, as amostras deformadas eram coletadas imediatamente após a remoção dos anéis de adensamento, nos mesmos locais de amostragem destes, utilizando-se uma pá e sacos plásticos para armazenagem. As amostras foram utilizadas para a realização de ensaios de caracterização do material.

3.1.3 Ensaios de caracterização

Para a realização dos ensaios de caracterização no solo coletado, as amostras deformadas foram secas ao ar, como preconiza a norma brasileira ABNT NBR-6457/86. Com uma parcela da amostra seca ao ar foram realizados os ensaios de caracterização, consistindo da análise granulométrica, limite de liquidez, limite de plasticidade e determinação do peso específico real dos grãos.

O ensaio para determinação da curva granulométrica do solo seguiu os procedimentos da norma brasileira ABNT NBR-7181/84, com o emprego de defloculante. A curva granulométrica do solo amostrado em Santo Antônio da Patrulha está apresentada na Figura 23.

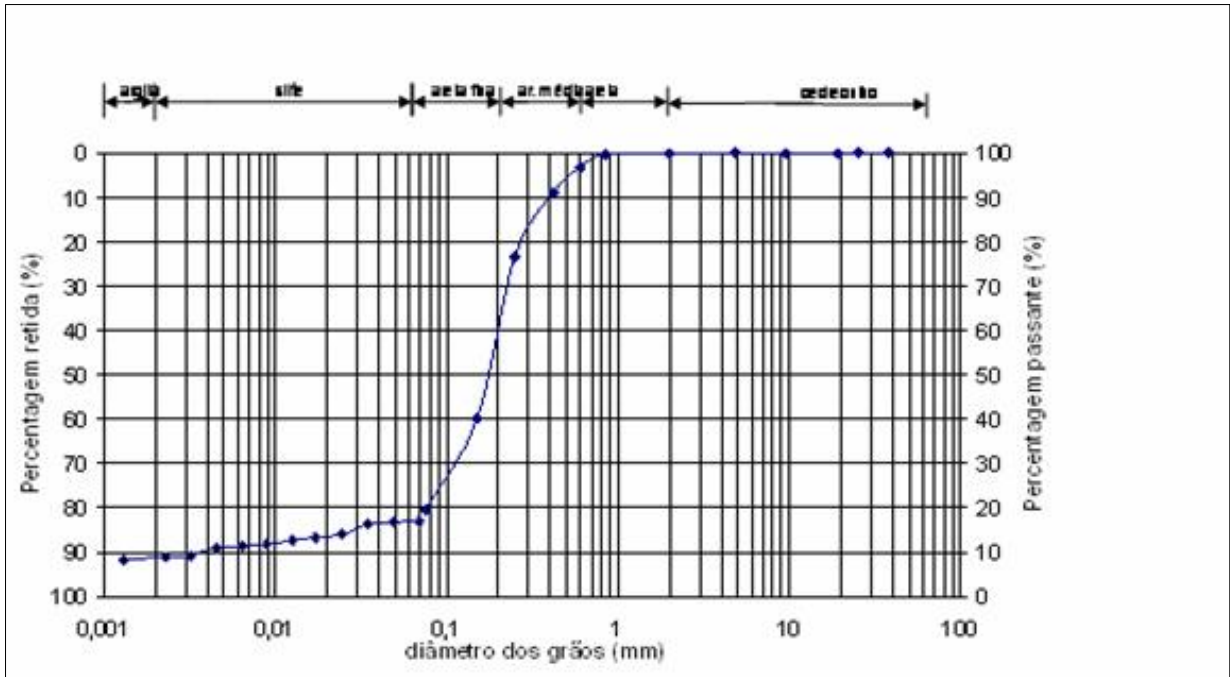


Figura 23: Distribuição Granulométrica do solo de Santo Antônio da Patrulha (com defloculante)

Para a obtenção dos limites de liquidez e plasticidade, usou-se, respectivamente, as metodologias apresentadas nas normas brasileiras ABNT NBR-6459/84 e ABNT NBR-7180/84. Porém, foi impossível a determinação dos valores dos limites de Atterberg, de tal forma que o índice de plasticidade (IP) da amostra ensaiada foi classificado como NP (Não Plástico). Isso também é consistente com a curva granulométrica do solo, onde mais de 80% em peso é de areia, enquanto a fração argila limita-se a 8,5% da amostra. A partir da curva granulométrica da amostra, apresentada na Figura 23, obteve-se um coeficiente de curvatura (c_c) igual a 20,8, e o coeficiente de uniformidade (C_u) igual a 53, que caracteriza o solo como mal graduado e desuniforme.

O peso específico real dos grãos foi determinado, conforme preconiza a norma brasileira ABNT NBR-6508/84, obtendo-se um peso específico real dos grãos (γ_s) de 26,70 kN/m³.

Com base nos coeficientes de curvatura e uniformidade, e na curva granulométrica apresentada na Figura 23, o solo amostrado consiste de uma areia siltosa, de cor acinzentada. Esse solo foi classificado, segundo o sistema H.R.B, como sendo um solo A-2-4, enquanto que, pelo Sistema de Classificação Unificada, foi classificado como sendo SM.

3.2 ARGILA SILTOSA

Argilas saturadas moles a médias apresentam grande deformabilidade em ensaios de adensamento e também requerem um tempo muito longo para a execução dos ensaios. A utilização de um solo argiloso nesta dissertação deve-se à necessidade de comprovar a maior empregabilidade do ensaio CRS, na obtenção de parâmetros de adensamento confiáveis, num intervalo de tempo menor.

3.2.1 Localização da jazida

A amostragem da argila ocorreu em uma área pertencente ao Aeroporto Internacional Salgado Filho – próximo ao prédio administrativo da Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária (Infraero) situado na Av. Sertório, em Porto Alegre. A região onde se encontra instalado o aeroporto é composta por uma camada de argila de grande extensão que chega em alguns pontos até 7,0 m de profundidade e em seguida ocorre uma alternância de camadas entre areia e argila até se encontrar um solo mais competente. A profundidade de extração foi de 1,50 a 2,10 m; essa profundidade de amostragem foi escolhida com o intuito de ser coletado um material mais rijo, basicamente consistindo de uma crosta pré-adensada. O objetivo era complementar as informações obtidas com a maioria dos solos argilosos submetidos a ensaios CRS no País, nos últimos anos, que geralmente consistiram de argilas moles a médias.

3.2.2 Retirada e armazenamento das amostras

Com o emprego de pá e enxada foi removida a cobertura vegetal de solo com aproximadamente 20 cm de espessura. A seguir, iniciou-se com trado manual a perfuração do solo; o diâmetro interno do furo aberto pelo trado era de aproximadamente 105 mm, ligeiramente superior ao diâmetro do amostrador de parede fina utilizado para a extração da amostra em campo (100 mm).

Na cota de extração desejada, foi introduzido o tubo amostrador de paredes finas (“*Shelby*”), com 0,75 m de comprimento, 100 mm de diâmetro e espessura 2 mm, de aço carbono, com a extremidade inferior apresentando borda cortante.

A cravação do tubo amostrador foi feita lentamente de forma manual até que aproximadamente 65 cm do tubo penetrassem no furo. A folga junto ao topo foi necessária para que a amostra não sofresse amolgamento pela pressão de cravação do tubo. A Figura 24 mostra as hastes que conectavam o tubo “*Shelby*” no interior do furo, quando este já havia sido cravado no solo.



Figura 24: Vista das hastes de cravação, após a cravação do tubo “*Shelby*” no furo de sondagem, e vista do trado manual empregado para abrir este furo

Após a cravação, um tempo de aproximadamente 20 minutos foi aguardado sem que a amostra ou amostrador sofressem qualquer influência externa. Esse tempo de espera foi necessário para que a amostra pudesse aderir à parede interna do amostrador. A seguir, por meio das hastes, foi aplicada uma rotação – de várias voltas - ao conjunto, com a finalidade de cisalhar a extremidade inferior da amostra, possibilitando a retirada do tubo amostrador do solo. Uma vez retirado do furo, as extremidades superior e inferior do tubo “*Shelby*” foram regularizadas com espátula e parafinadas. Todo o amostrador foi encoberto por sacos plásticos para impedir que a umidade da amostra fosse perdida no trajeto do ponto de amostragem até o

laboratório. Para o transporte, o tubo “Shelby” foi acondicionado em uma caixa de papelão com leito de serragem, a fim de impedir danos à amostra. No laboratório, o tubo “Shelby” foi imediatamente colocado em câmara úmida.

3.2.3 Ensaios de caracterização

As sobras das amostras indeformadas utilizadas nos ensaios de adensamento convencional e CRS foram empregadas para a caracterização, passando previamente por um processo de secagem ao ar, como preconiza a norma brasileira ABNT NBR-6457/86.

No ensaio para determinação da curva granulométrica do solo, foram empregados os procedimentos da norma brasileira ABNT NBR-7181/84 com a utilização de defloculante. A curva granulométrica está apresentada na Figura 24.

Para obtenção dos limites de liquidez e plasticidade seguiu-se, respectivamente, as normas brasileiras ABNT NBR-6459/84 e a ABNT NBR-7180/84, resultando na obtenção do valor de 81 para o limite de liquidez e de 34 para o limite de plasticidade. A partir desses valores, o índice de plasticidade (IP) da amostra foi calculado como sendo de 47.

Por fim, foi realizado o ensaio de peso específico real dos grãos, conforme a norma brasileira ABNT NBR-6508/84, constatando-se que o peso específico real dos grãos (γ_s) é de 26,4 kN/m³.

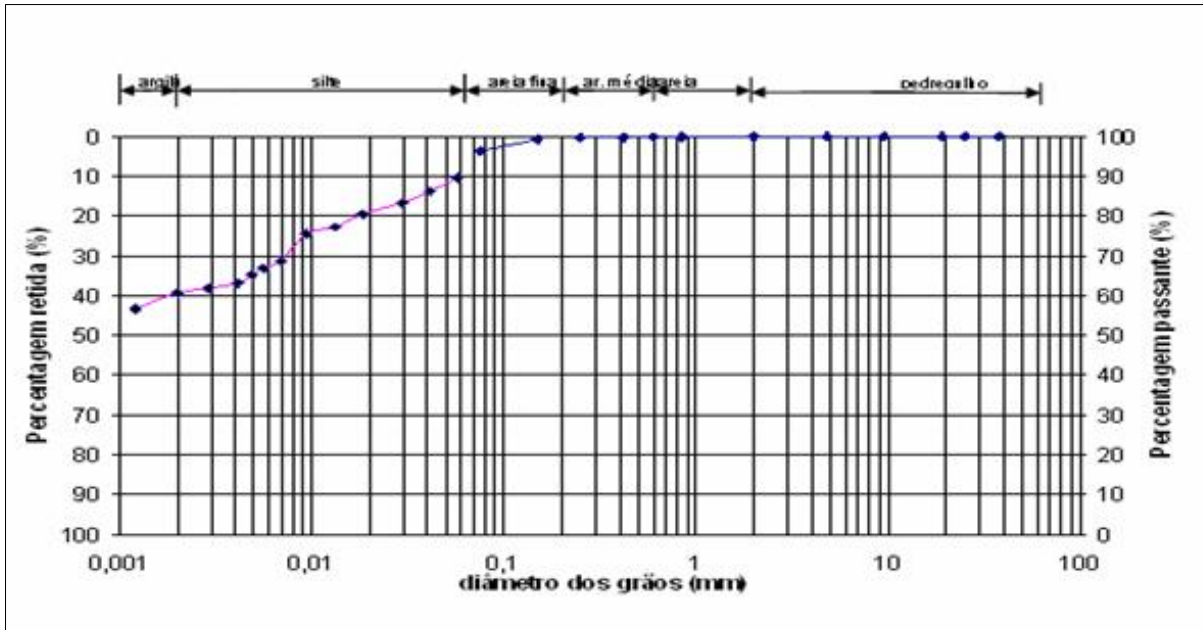


Figura 25: Distribuição Granulométrica do solo de Aeroporto Internacional Salgado Filho (com defloculante)

Essa argila foi classificada pelo Sistema de Classificação Unificada como sendo CH, ou seja, trata-se de uma argila de alta compressibilidade, de cor cinza. Pelo sistema H.R.B., esse solo foi classificado como sendo A-7-6.

Devido ao seu elevado nível de compressibilidade, as argilas requerem, além da classificação do solo, a determinação do índice de consistência (IC):

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad (3.1)$$

Donde:

w = Teor de umidade do solo.

Empregando-se os valores previamente descritos e adotando-se $w = 44,0\%$, que é a média dos valores de teor de umidade, obtidos nos ensaios de adensamento realizados, obteve-se $IC = 0,789$. Segundo Pinto (2002), esse valor permite classificá-la como sendo uma argila rija.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os principais índices obtidos nos ensaios de caracterização dos solos.

Tabela 8: Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do solo de Santo Antonio da Patrulha

Amostra	Profundidade (m)	LL (%)	LP (%)	P (%)	e_m	S_m (%)	γ_s (kN/m ³)	%argila (<2 ϕ m)	%silte (2 ϕ m-0,06mm)	% areia fina (0,06-0,2mm)	%areia média (0,2-0,6mm)	%areia grossa (0,6-2mm)	w_{nat} (%)
Areia Siltosa	1,00 – 1,20	P	NP	NP	0,43	99,0	26,70	8,5	11,0	42,5	37,0	1,0	0,9 – 13,0

OBS: e_m Índice de Vazios médio e S_m grau de saturação médio (%)**Tabela 9: Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização do solo do Aeroporto Internacional Salgado Filho**

Amostra	Profundidade (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	e_m	S_m (%)	IL	IC	γ_s (kN/m ³)	%argila (<2 ϕ m)	%silte (2 ϕ m-0,06mm)	% areia fina (0,06-0,2mm)	w_{nat} (%)
Argila	1,50-2,10	80,80	34,10	46,70	1,23	97,5	0,26	0,79	26,44	60,7	32,1	7,2	41,8 - 46,3
Argila(*)	3,00-3,75	-	-	-	2,56	99,0	-	-	25,47	-	-	-	98,9
Argila(*)	5,15-5,75	-	-	-	1,96	101,90	-	-	25,67	-	-	-	77,7

OBS: e_m Índice de Vazios médio e S_m grau de saturação médio. (*) Valores obtidos do Relatório de Ensaio – PPGE - 2004

Tabela 10: Profundidade de Extração e Características do Solo Argiloso

Ensaio	Profundidade de Extração da Amostra	e_i	$w_{inicial}$ (%)	γ_t (kN/m ³)
ECARG_I-1	1,56	1,20	44,65	17,4
ECARG_I-2	1,59	1,26	46,14	17,1
ECARG_R-1	-	1,34	50,03	17,0
PENARG_I-1	1,67	1,29	46,31	16,9
CARG_I-1	1,71	1,17	42,03	17,3
CARG_I-2	1,84	1,15	45,40	17,3
CARG_I-3	1,91	1,22	41,82	17,4
CARG_R-1	-	1,51	52,84	16,1

A Tabela 10 traz a característica da argila para os ensaios realizados, a nomenclatura adota na tabela é igual a apresentada a seguir no capítulo 5. Desta forma:

ECARG_I → Ensaio Convencional em solo Argiloso Indeformado;

ECARG_R → Ensaio Convencional em solo Argiloso Remoldado;

PENARG_I → Ensaio em Prensa Pneumática em solo Argiloso Indeformado;

CARG_I → Ensaio CRS em solo Argiloso Indeformado;

CARG_R → Ensaio CRS em solo Argiloso Remoldado.

4 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA

O desenvolvimento de novos métodos de ensaio de laboratório visa a, principalmente, possibilitar à comunidade geotécnica (i) dados adicionais sobre os solos regionais de interesse ou (ii) a diminuição do tempo necessário para a obtenção de parâmetros de modelos constitutivos já consagrados na Geotecnia. Com esse fim, o Laboratório de Geotecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LAGEO/UFRGS) desenvolveu para esta dissertação um novo equipamento para a realização de ensaios de adensamento CRS.

Nesta seção, além da descrição do equipamento desenvolvido, serão apresentados os procedimentos de ensaio e os parâmetros dos modelos constitutivos adotados para a realização e interpretação dos ensaios de adensamento incrementais e CRS.

4.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ADENSAMENTO CRS

Nesta dissertação, foi desenvolvido um equipamento a partir da adaptação e combinação de diversos equipamentos e componentes mecânicos, elétricos e pneumáticos existentes no LMS/UFRGS. Foi feita, também, a montagem de um programa para aquisição de dados, utilizando o software CATMAN disponível no LMS/UFRGS. Uma prensa pneumática foi projetada para realização de ensaios de adensamento incrementais, que permitisse a utilização nesses ensaios da célula de adensamento CRS e do sistema de aquisição automática dos dados, permitindo assim testar a instrumentação do ensaio CRS.

4.1.1 Prensa pneumática

Para a realização de um ensaio de adensamento incremental com a garantia de saturação do corpo de prova por contrapressão (o que não é possível no equipamento convencional) e também para possibilitar a utilização neste tipo de ensaio do mesmo sistema de aquisição automática de dados empregado no ensaio CRS, partiu-se - no início desta dissertação - para a construção de uma nova prensa de adensamento, com carregamento

pneumático. O equipamento a ser desenvolvido deveria (i) ser dotado de espaço interno adequado para a instalação de uma câmara triaxial adaptada como célula de adensamento CRS e (ii) suportar uma carga nominal de compressão máxima de 20 kN. A partir desses requisitos, partiu-se para a execução do projeto da prensa, sendo necessária a elaboração de desenhos detalhados para todas as peças do equipamento. A Figura 26 mostra o formato final do equipamento desenvolvido.

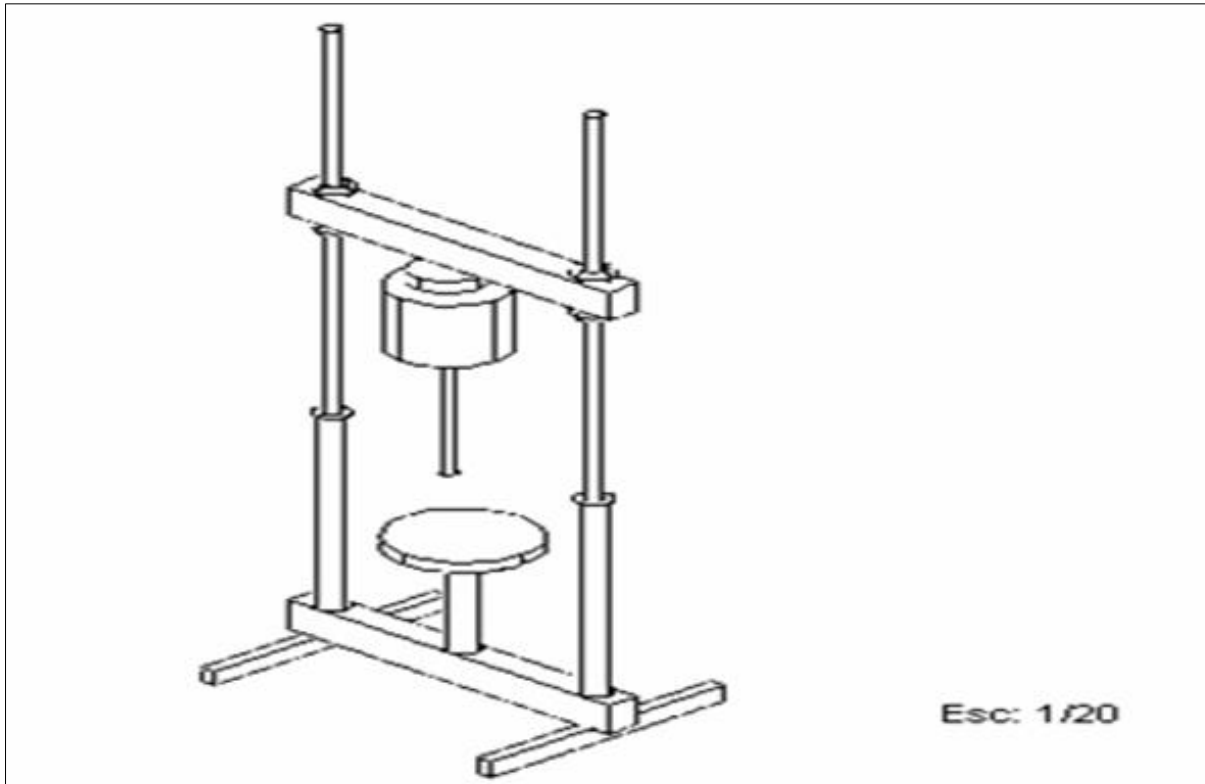


Figura 26: Vista geral da prensa pneumática desenvolvida

Para a construção da viga superior, da viga inferior e do prato da prensa pneumática, optou-se por empregar aço comum 1020. Cada coluna da prensa consistiu de uma barra roscada de aço comum 1045 (rosca triangular de 1”), com a extremidade inferior fixada a uma barra redonda de prolongamento, sendo esta também usinada em aço 1020. Em todas as peças expostas à ação corrosiva da água, foram utilizados parafusos, porcas e arruelas em aço inoxidável; nas demais ligações optou-se pelo emprego de parafusos de aço comum 1045. No centro da viga superior, foi aparafusada uma conexão rotulada, usinada em aço inoxidável, capaz de suportar cargas nominais de compressão e tração de 10 kN. A essa conexão foi aparafusado um cilindro pneumático de simples ação, capaz de aplicar uma carga nominal máxima de compressão de 8 kN. Esse cilindro possui uma vedação interna por membrana

Bellofram para minimizar o atrito com o êmbolo e foi projetado e construído no LMS/UFRGS por Ferreira (2003).

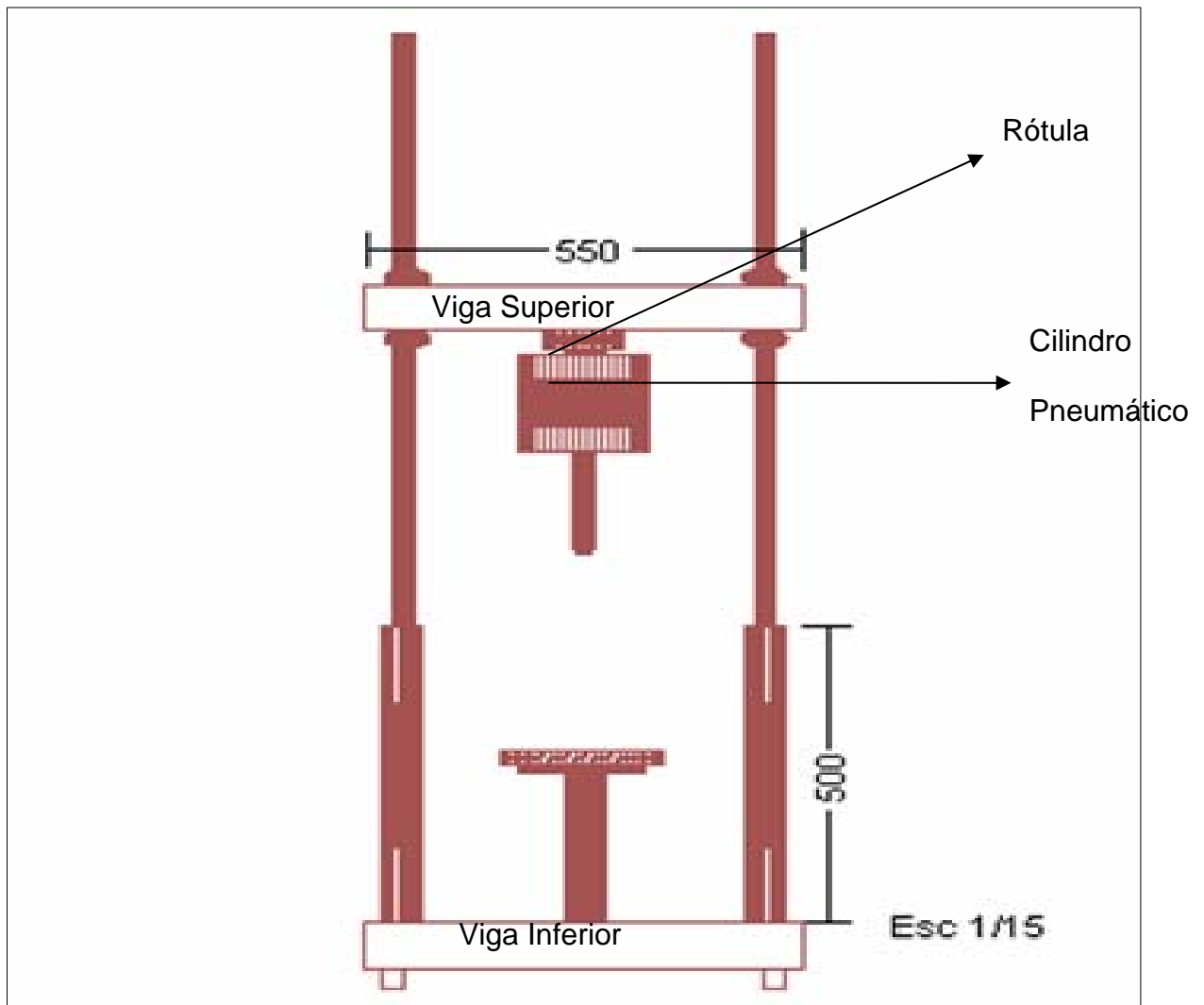


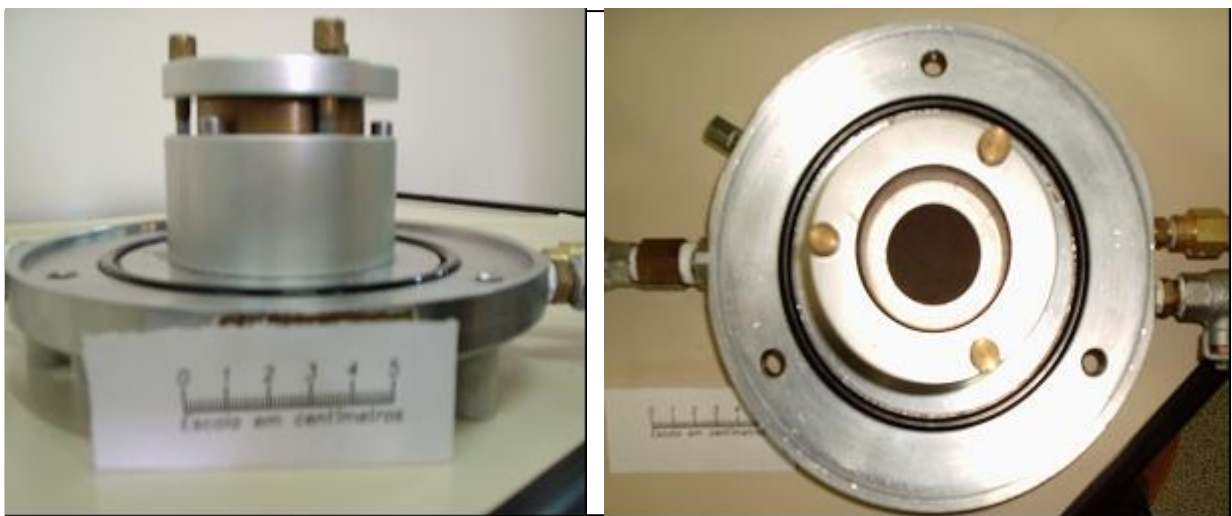
Figura 27: Vista frontal da prensa pneumática desenvolvida

4.1.2 Câmara triaxial adaptada para o ensaio CRS

Visando à confecção de uma célula de adensamento para o ensaio CRS, foram realizadas algumas adaptações em uma câmara triaxial de marca *Geonor*, para corpos de prova de diâmetro 50 mm, existente no LMS/UFRGS. Essa câmara triaxial [descrita por Andresen e Simons (1960)] havia sofrido anteriormente algumas modificações em sua base (RIGO, 2003) para receber uma célula de adensamento do tipo anel fixo, munida de pedras porosas e cabeçote, de forma similar à utilizada nos equipamentos de adensamento

convencionais. A fixação da célula de adensamento à base da câmara triaxial é feita por meio de três parafusos de aço inoxidável.

Como, em geral, os ensaios especiais de adensamento necessitam da medição da poro pressão gerada na base do corpo de prova, uma vez que não se permite drenagem por essa face, optou-se por vedar a superfície de contato entre o anel e a base da câmara por meio de um anel de vedação (do tipo O-ring). A Figura 28a mostra uma vista frontal da célula de adensamento, enquanto a Figura 28b traz uma vista superior desta célula, quando esta se encontra sem o corpo de prova.



(a) Frontal

(b) Superior

Figura 28: Vistas da célula de adensamento

Como a câmara triaxial é muito antiga (com aproximadamente 30 anos de uso no LMS/UFRGS), foi realizado um trabalho complementar de renovação. O mesmo consistiu de (i) substituição do tubo de acrílico da câmara e (ii) substituição da bucha rotatória original (Andresen e Simons, 1960) por uma bucha de rolamentos lineares para minimizar o atrito entre a tampa da câmara triaxial e o pistão de cargas. Com esse objetivo, um novo pistão de cargas com diâmetro de 16 mm foi usinado em aço inoxidável, sendo a vedação entre o pistão e a tampa feita por um anel “O-ring”. A Figura 29 mostra os principais componentes da câmara utilizada.

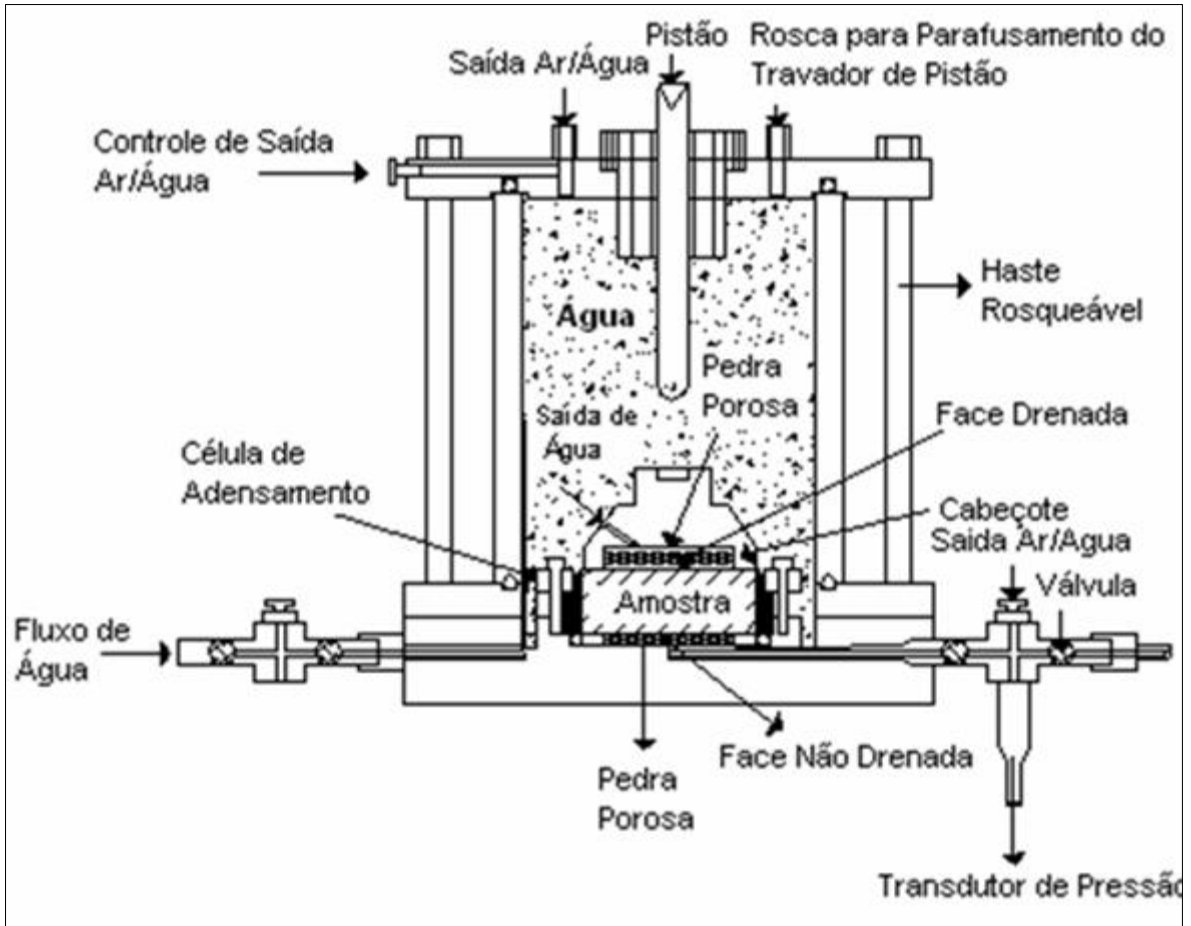


Figura 29: Desenho esquemático da Câmara Triaxial com a célula de Adensamento

4.1.3 Instrumentação e sistema de aquisição de dados

Para a instrumentação do ensaio de adensamento incremental foram empregados uma célula de carga externa, um transdutor de deslocamento, e dois transmissores de pressão convertidos em transdutores por meio de resistores elétricos. Por sua vez, a instrumentação do ensaio CRS utilizou os mesmos equipamentos do ensaio incremental, com a diferença de que o transmissor de pressão conectado ao cilindro pneumático foi desligado por não apresentar utilidade neste ensaio. A excitação da instrumentação aplicada, com exceção da célula de carga, foi realizada por uma fonte de corrente contínua de laboratório, de marca *Leader*, modelo LPS-163A, ajustada para 10 V.

A leitura dos instrumentos e a conversão dos dados foram realizadas por meio de um sistema de aquisição automática de dados, de marca *HBM*, modelo *Spider-8*. Esse equipamento permite a leitura simultânea de até oito canais de entrada analógicos, sendo que

cada canal possui seu próprio conversor analógico-digital, tendo a máxima velocidade de operação de 9600 leituras por segundo. Ser for necessário o emprego de um número maior de canais de entrada, é possível conectar em série dois ou mais módulos *Spider 8*. As leituras efetuadas pelo módulo *Spider-8* são transferidas a um microcomputador através da porta paralela LPT1; os dados são processados e plotados no monitor pelo software *Catman 4.5*, que acompanha o equipamento. A Figura 30 mostra o esquema do sistema de aquisição automática de dados, conforme empregado inicialmente para os ensaios de adensamento incrementais.

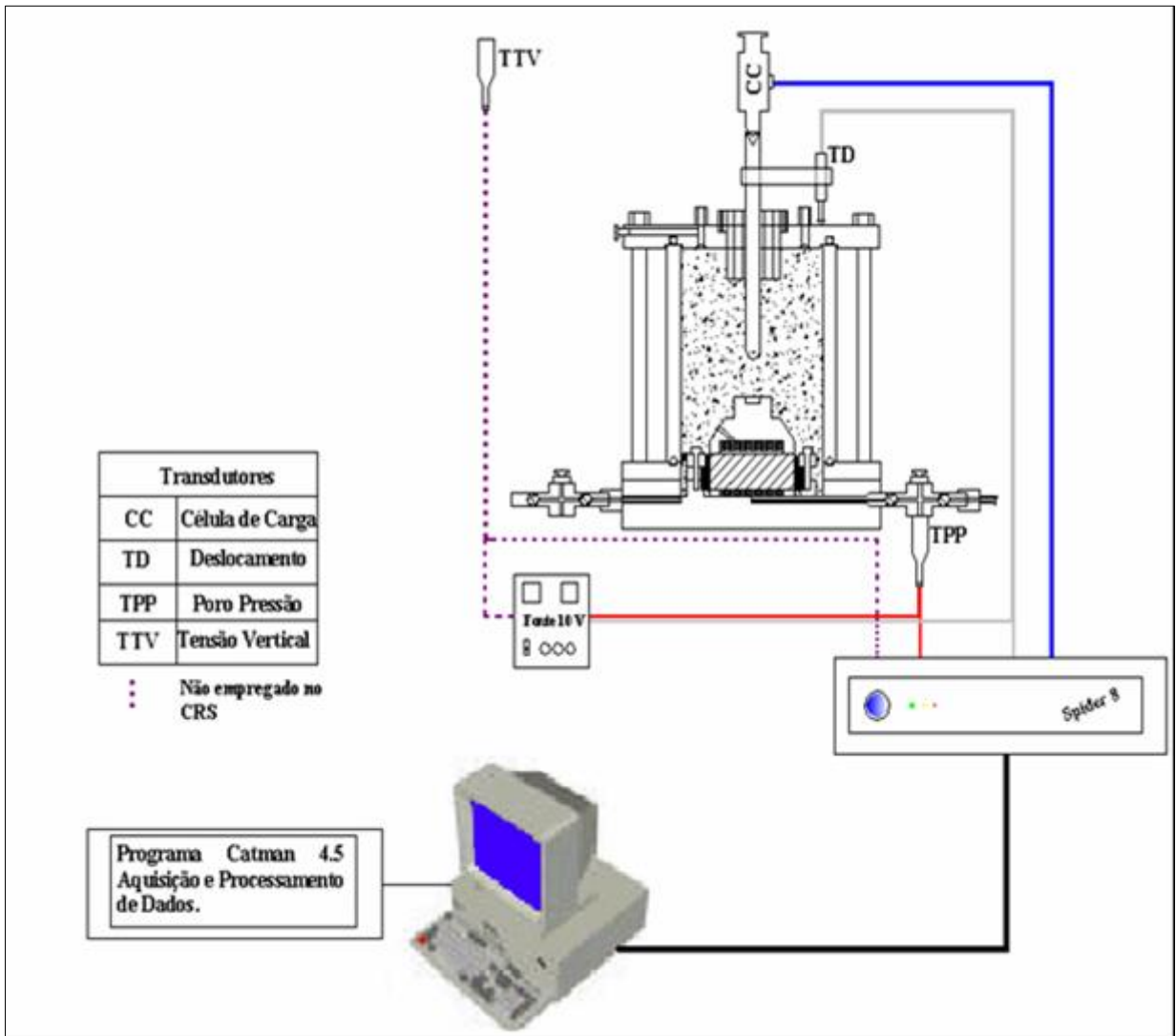


Figura 30: Desenho esquemático do sistema de aquisição automática de dados

4.1.3.1 Célula de Carga

A célula de carga utilizada no equipamento para ensaios CRS – do tipo “*strain gages*” - é de marca *Reaccion*, modelo *BCZ-200*. Sua capacidade em compressão ou tração é de 2 kN, com saída de 2mV/V e 350 Ω de resistência interna. Essa célula apresenta excelente compensação dos efeitos de temperatura e excentricidade da carga. E a sua calibração foi realizada com um pórtico e um pendural de pesos disponíveis no LMS/UFRGS. A leitura inicial (carga = 0 kN) foi tomada como a correspondente à situação em que a célula de carga suporta apenas seu peso próprio. Os demais estágios foram aferidos a partir de pesos padrões existentes no laboratório. A curva de calibração obtida é apresentada na Figura 31, que mostra também a perfeita linearidade da célula utilizada, chegando a alcançar $R^2 = 1,0000$.

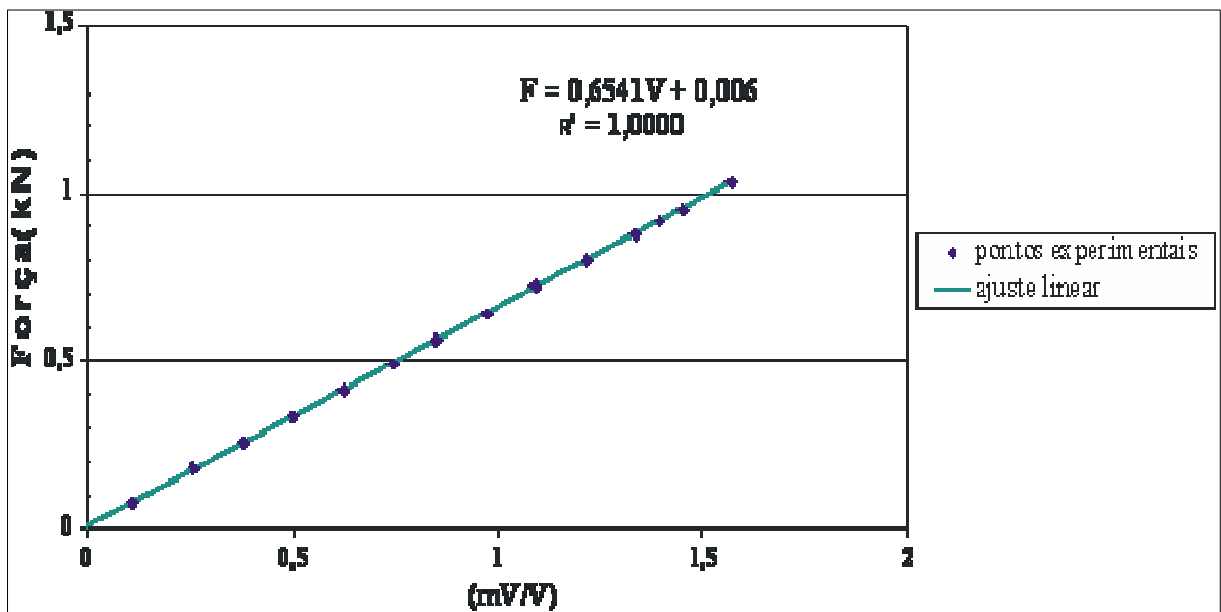


Figura 31: Curva de Calibração da célula de carga

A leitura dos dados foi realizada pelo programa *Catman 31* e a conversão dos resultados de mV/V para kN foi feita de forma automática, através de uma tabela dos dados, obtida por meio dos resultados apresentados na Figura 31.

Efetuada a calibração da célula de carga, restava ainda determinar a sua estabilidade de leituras. Para alcançar esse objetivo, a célula foi totalmente descarregada e deixada somente com seu peso próprio durante quase 2 horas, sendo encontrada uma pequena dispersão das leituras, com valor máximo de 0,08 N. Isso corresponde, para uma escala de trabalho de zero a 1962 N, a uma dispersão da ordem de 0,004%, considerada pequena e

aceitável frente à amplitude do ensaio. As Figuras 32 e 33 mostram a dispersão para a célula de carga utilizada neste estudo.

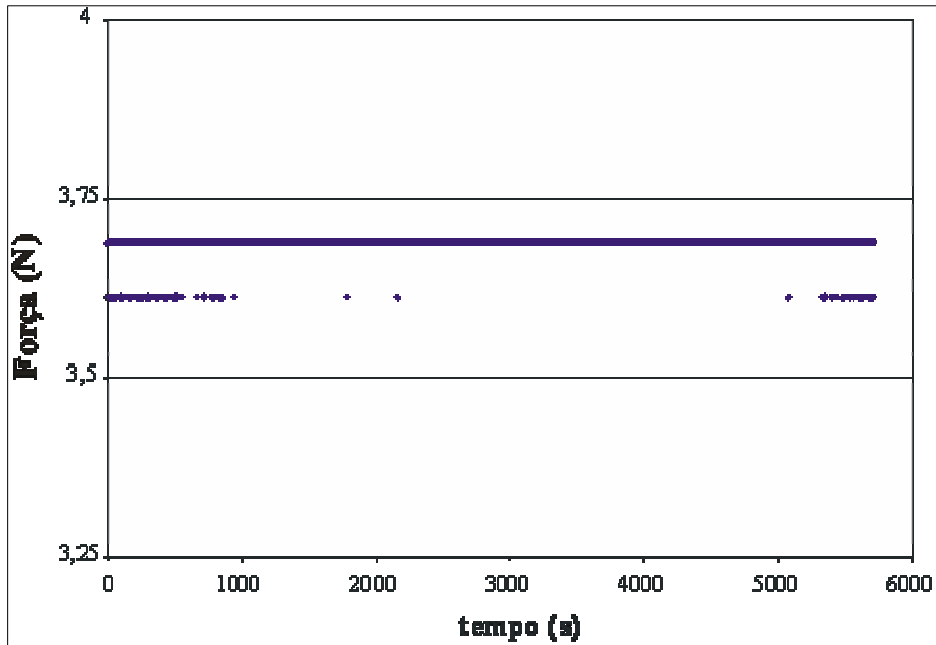


Figura 32: Dispersão das leituras da célula de carga durante o teste da estabilidade do zero

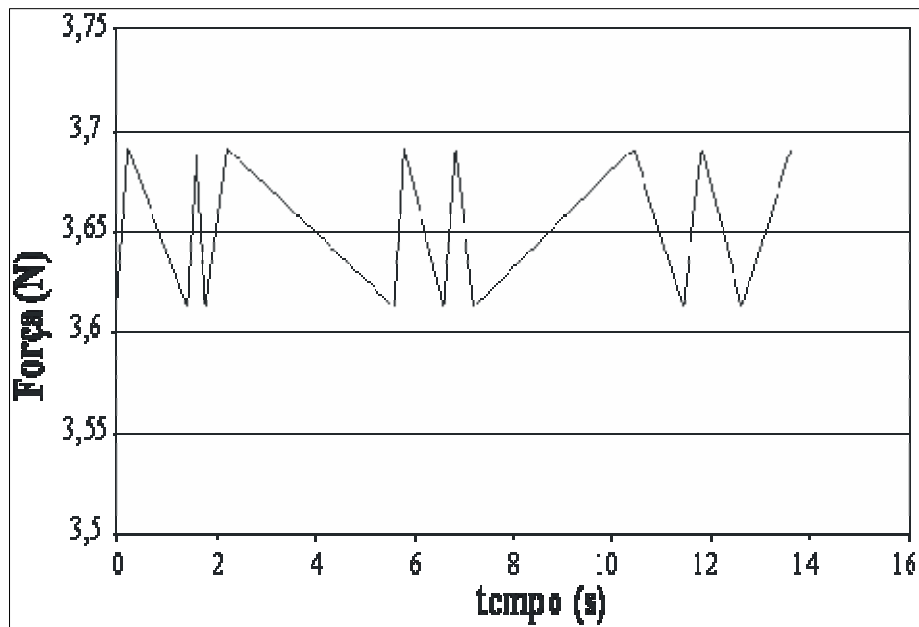


Figura 33: Dispersão das leituras da célula de carga durante o teste da estabilidade do zero, durante os primeiros 15 s

4.1.3.2 Transdutor de deslocamentos

O instrumento utilizado é um transdutor de deslocamentos, de marca *Wykeham Farrance*, modelo *HS25*, que pode funcionar com corrente contínua de amplitude até 10 V, pois é composto por uma ponte completa de “*strain gages*”. A calibração foi realizada por meio de um pórtico munido de um parafuso micrométrico, com fundo de escala igual 25 mm, coincidente com a do instrumento. O transdutor tem sua saída amplificada internamente de modo que, no fundo de escala, a leitura é de 0,1 V. Durante a calibração e a realização dos ensaios, no canal de medição utilizado pelo sistema de aquisição automática de dados, optou-se por empregar a maior sensibilidade possível, sendo adotada uma escala de leitura de 0,1 V. Isso mostrou ser altamente satisfatório pois, quando a escala de leitura era aumentada, a sensibilidade do instrumento era significativamente diminuída. A curva de calibração do transdutor de deslocamentos mostrou excelente linearidade, atingindo valores de $R^2 = 1,0000$. A Figura 34 mostra estes resultados.

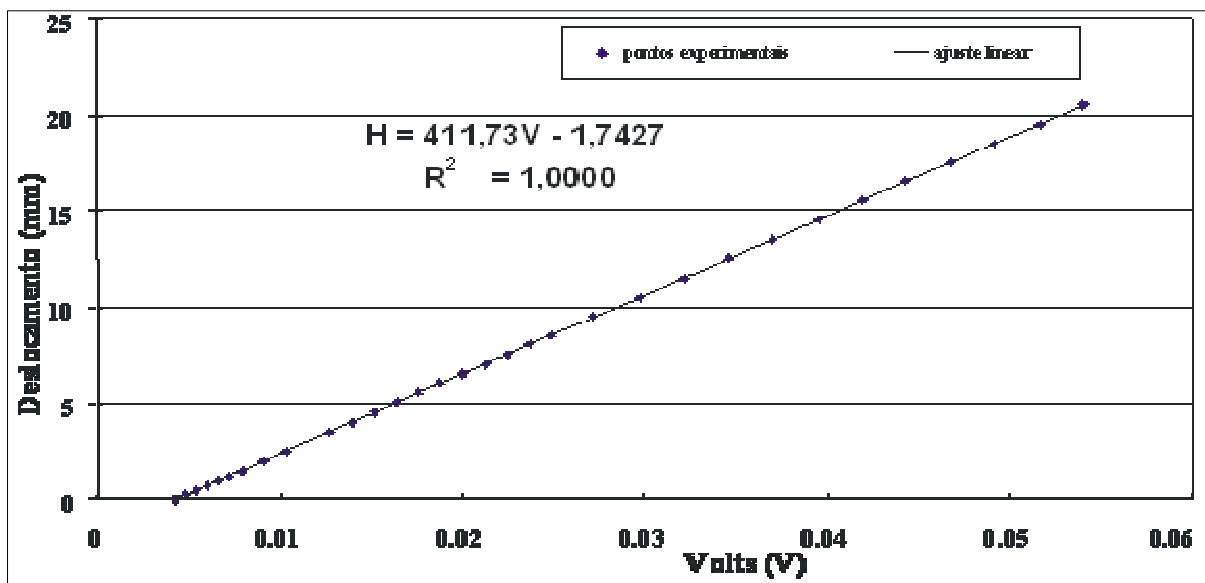


Figura 34: Curva de Calibração do Transdutor de Deslocamentos

Também foi verificada a estabilidade do zero do equipamento. A técnica empregada foi a de fixar o eixo do instrumento sobre o pistão da célula de adensamento e deixá-lo imóvel ao longo de quase 2 horas. A pequena dispersão encontrada nessas leituras foi da ordem de 0,006 mm. Ou seja, para um curso de 25 mm, isso representa 0,024% do fundo de escala,

valor considerado como pequeno e aceitável. A Figura 35 mostra os resultados do teste de estabilidade do zero para o transdutor de deslocamentos empregado nesta dissertação.

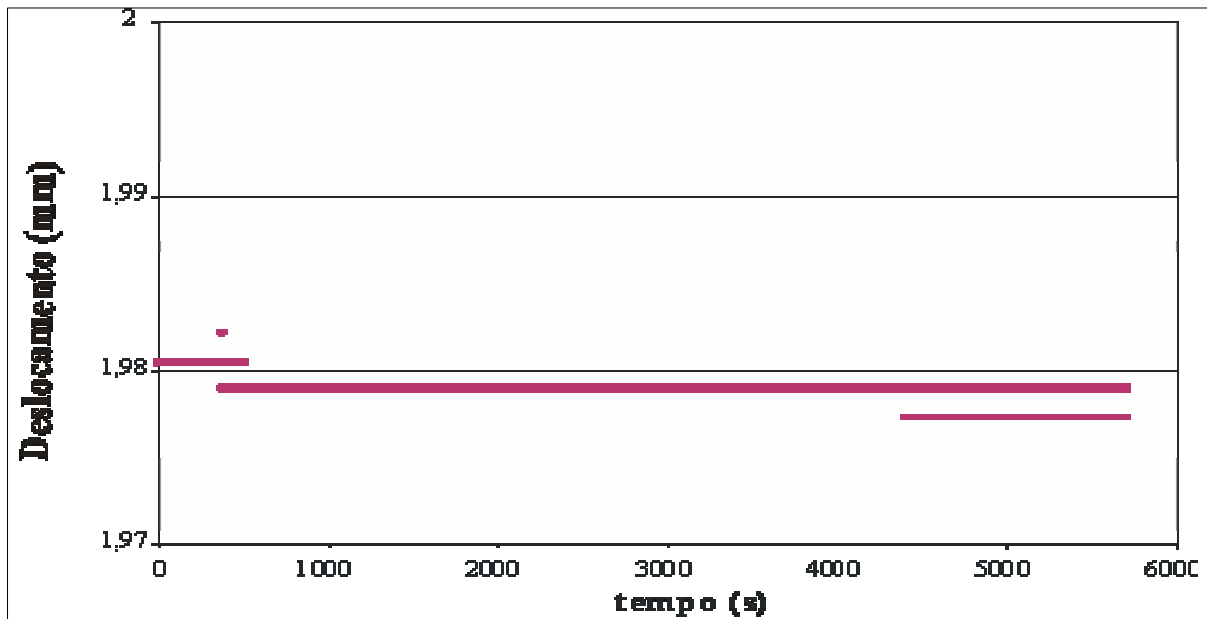


Figura 35: Dispersão das leituras durante o teste de estabilidade do zero do transdutor de deslocamentos

4.1.3.3 Transdutores de pressão

Durante os ensaios de adensamento incrementais, empregando a prensa pneumática, foram utilizados dois instrumentos distintos para medir as pressões; um com a função de ler a poro pressão gerada na base do corpo de prova; e o outro, de monitorar a pressão enviada pela válvula reguladora de pressão de ar até o cilindro pneumático da carga axial. Com a conclusão dos ensaios incrementais e o início dos ensaios CRS, o transdutor de pressão foi desconectado do equipamento de ensaio.

Os instrumentos utilizados se tratam de transmissores de pressão da marca *Ashcroft*, modelo *K1*, com capacidade de 1000 kPa e resolução nominal de 0,003 kPa. Como o manual de instruções do sistema de aquisição automática de dados não estava suficientemente claro quanto à maneira de realizar a conexão elétrica de transmissores (ou seja, instrumentos com leitura baseada em corrente, de 4 a 20 mA), cada transmissor foi empregado nos ensaios de adensamento configurado como um transdutor de pressão (isto é, como um instrumento com leitura baseada em voltagem), por meio da ligação em série com um resistor de precisão de 500 Ω e da medição, pelo sistema de aquisição de dados, da diferença de voltagem entre as

extremidades do resistor. O emprego do resistor diminuiu a capacidade de leitura do instrumento, passando-a de 1.000 kPa para 600 kPa, embora ainda com excelente resolução. A curva de calibração também foi afetada como descrito abaixo.

Para a obtenção da curva de calibração de cada transdutor de pressão, foi empregada uma bomba de peso morto de marca *Budenberg*, disponível no LMS/UFRGS. O zero da escala de pressão foi adotado como sendo a situação em que o transdutor se encontrava aberto ao ar; os demais incrementos de pressão foram aplicados com a bomba, iniciando em 100 kPa e aumentando constantemente a pressão de 50 em 50 kPa. As curvas de calibração dos transdutores de pressão são idênticas e estão mostradas na Figura 36. Note a não linearidade das curvas, possivelmente resultante da conexão elétrica utilizada. Embora o programa *Catman 4.5* possua diversas funções de calibração, lineares ou não, nenhuma se mostrou suficientemente capaz de aproximar, com boa exatidão, os resultados. Partiu-se então para a adoção pequenos segmentos de reta entre os pontos calibrados, através da inclusão no programa de uma tabela dotada de todos os pontos da calibração. Dessa forma, toda vez que era retirada uma leitura, o programa de forma automática a enquadrava em seu segmento e calculava a pressão imposta ao transdutor.

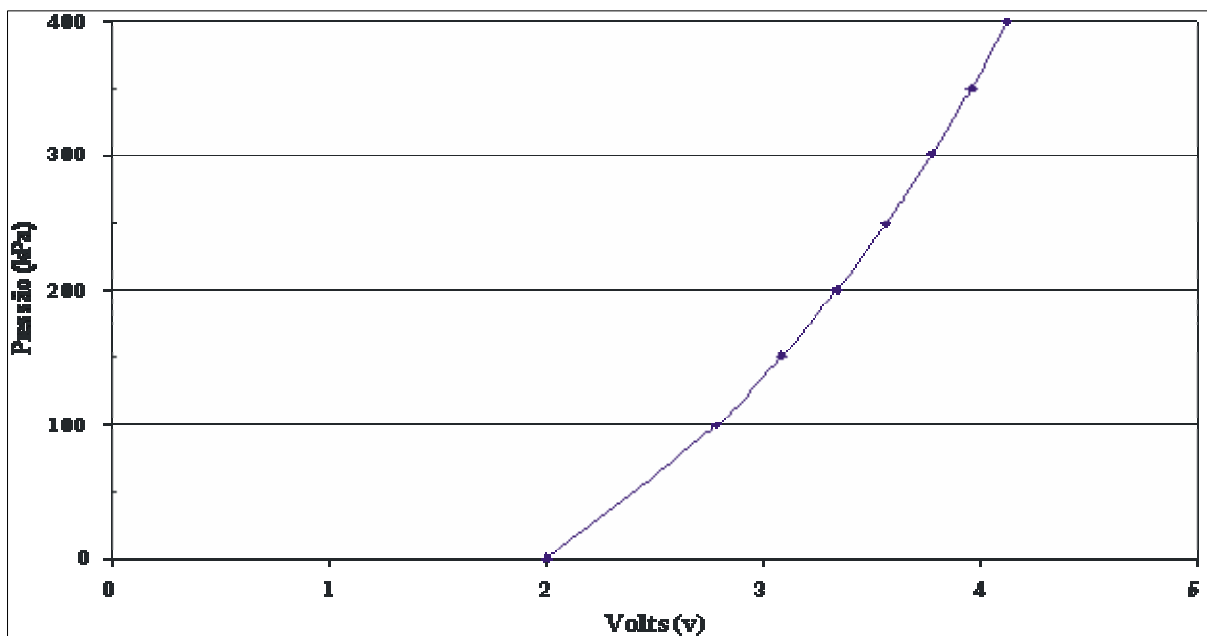


Figura 36: Curvas de calibração dos transdutores de pressão


A determinação da estabilidade do zero mostrou que os dois transdutores, para um teste que durou quase 2 horas, apresentaram valores máximos de dispersão da ordem de 0,15

kPa, o que representa, adotando-se fim de escala igual a 600 kPa, algo em torno 0,025%. Isso permite considerar a dispersão como sendo pequena e aceitável.

4.1.3.4 Aquisição dos dados

A aquisição automática dos dados foi feita por meio do programa *Catman 4.5*, que acompanha o equipamento *HBM Spider-8*. Com esse programa, pode-se configurar o tipo de instrumento a ser lido em cada canal, bem como determinar a escala de leituras e o intervalo de tempo entre as leituras. A transferência de dados entre o *HBM Spider-8* e o microcomputador pode ser feita através das portas serial, paralela e até mesmo USB; a escolha fica a cargo do operador e da disponibilidade da conexão no microcomputador. Nesse estudo foi escolhida a porta paralela *LPT1*, uma vez que o microcomputador utilizado não estava conectado a nenhum tipo de impressora.

Ao iniciar-se o programa, é necessário determinar o equipamento empregado na leitura da instrumentação, nesse caso o sistema de aquisição automática de dados *HBM Spider-8*, bem como os canais de entrada utilizados para capturar os dados, através do menu *IO-Channels* do programa. Para simplificar o processo, um arquivo denominado *CRS1.iod* foi gerado a partir da configuração básica. Toda vez que se iniciava o programa *Catman 4.5*, bastava entrar no menu *IOD-Channels*, abri-lo e automaticamente estavam selecionados o tipo de equipamento, os canais de acesso aos dados e o número de canais disponíveis para leituras. A Figura 37 ilustra a tela do programa no instante em que se abria o arquivo *CRS1.iod* e se configurava o programa para o sistema *HBM Spider-8* com apenas quatro canais de leitura.

Os canais são identificados como 0 até 7 no programa *Catman 4.5* e permitem leituras de pontes completas ou meias pontes de “*strain gages*”, voltagem DC, voltagem AC, resistência, potenciômetros. Porém, o tipo de leitura e a escala de medição devem ser previamente configurados. Para esse fim, existe na barra de ferramentas do menu *IO-Channels* a opção  que chama o assistente de formatação, através do qual se pode ajustar o tipo de leitura que será realizado no canal e a sua escala de medição. Com a finalidade de padronizar o processo, o assistente de formatação era chamado e em seguida abria-se o

arquivo CRS1.cs8 que, automaticamente, configurava o tipo de leitura e a faixa de medição dos canais empregados.

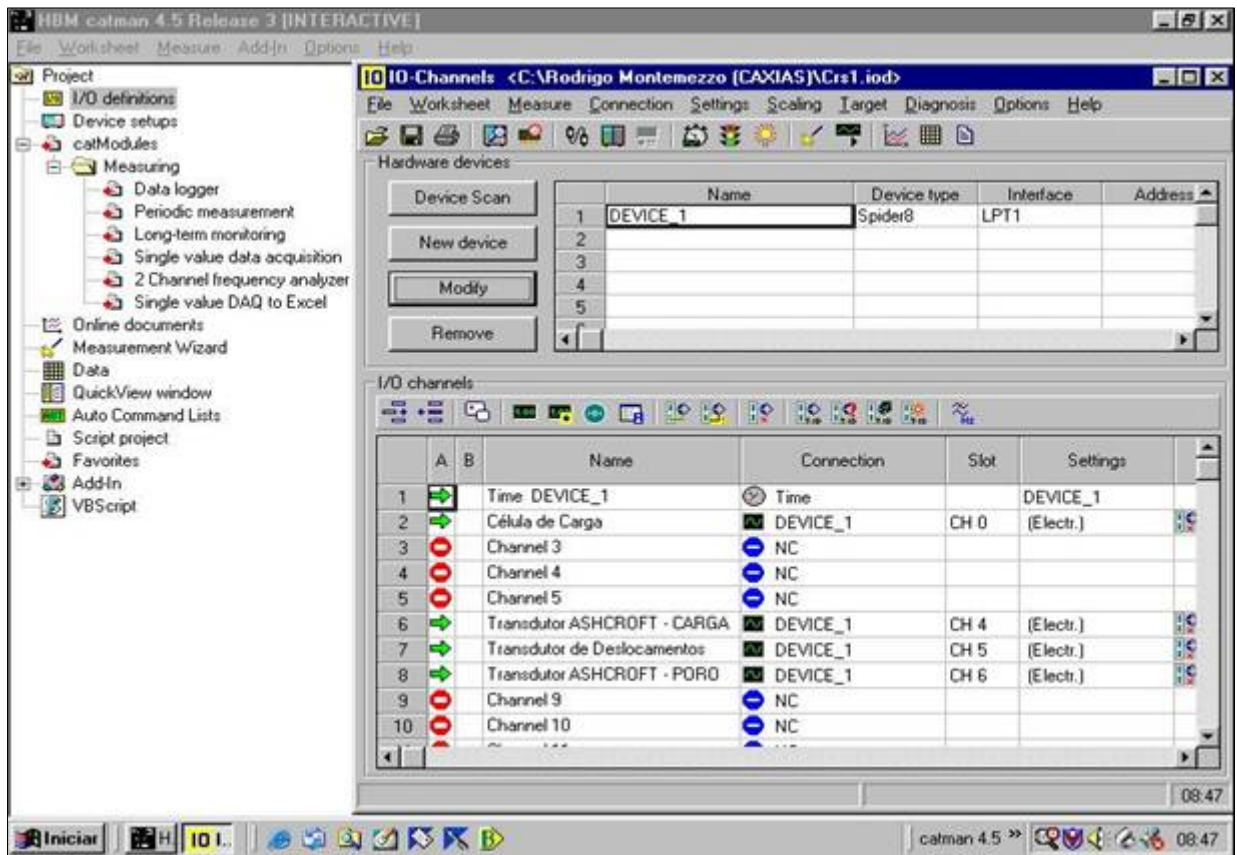


Figura 37: Vista geral do programa *Catman 4.5* em seu menu de configuração inicial

Devido à duração do ensaio de adensamento e à variação dos tempos de leitura no ensaio incremental, entre as diversas formas de aquisição de dados disponíveis no programa *Catman 4.5*, a que se melhor ajustou a essas condições foi a denominada “*Long-term monitoring*”. A mesma permite ao usuário determinar, por meio de uma tabela, os intervalos entre os tempos de aquisição de dados ao longo do ensaio, além de possibilitar a gravação automática dos dados após um determinado número de leituras ter sido alcançado. Entretanto, existe o inconveniente de que os dados ao serem salvos utilizam linguagem binária somente reconhecida pelo programa. Para sanar esta lacuna, o programa *Catman 4.5* permite uma posterior exportação de dados em diversos formatos, entre os quais o de planilha eletrônica *Excel*. A Figura 38 mostra a tela “*Long-term monitoring*” durante uma operação de aquisição de dados. O tratamento matemático dos resultados dos ensaios de adensamento foram feitos através da planilha eletrônica *Excel*.

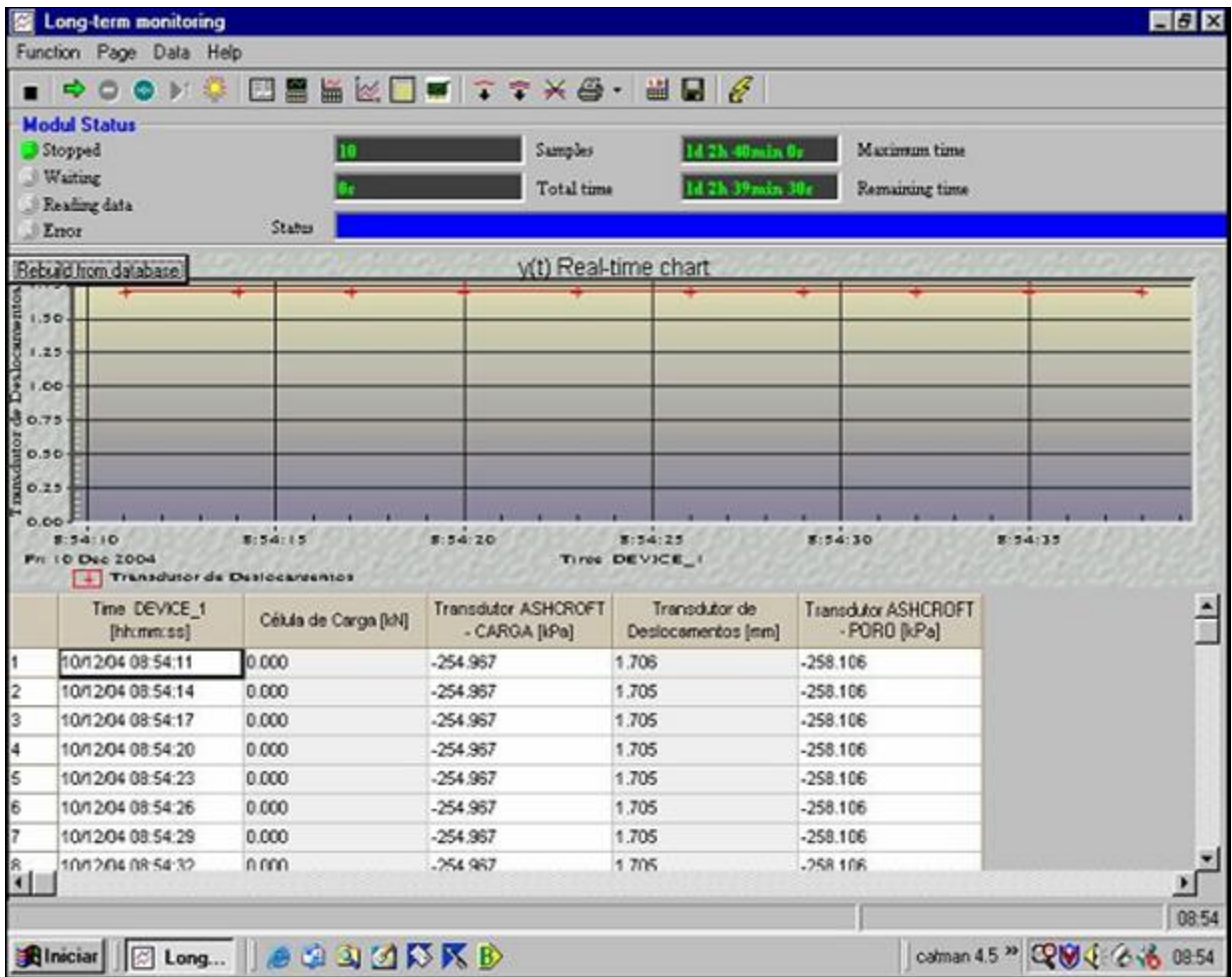


Figura 38: Tela “Long-term monitoring” do programa *Catman 4.5* durante a realização de testes de aquisição de dados

4.1.4 Sistema de adensamento incremental na célula CRS

A realização de um ensaio de adensamento incremental em célula CRS, além de solicitar a confecção de uma prensa pneumática apropriada para esse fim, permitiu que se alcançasse saturação completa do corpo de prova e serviu para otimização dos processos comuns ao CRS. Ao longo da realização dos ensaios de adensamento incrementais, pequenas mudanças foram realizadas no equipamento, com a finalidade aprimorá-lo e permitir, de forma segura, a realização desses ensaios.

A primeira modificação realizada foi a usinagem de uma rosca, na ponta do eixo do cilindro pneumático, para permitir a fixação da célula de carga. Também foi instalada uma válvula de esfera na entrada do ar do cilindro, a fim de possibilitar o carregamento instantâneo do corpo de prova. Devido a uma imprecisão da válvula reguladora de pressão de ar, que

alimentava o cilindro pneumático, em pressões muito baixas, os carregamentos de menor magnitude sofriam mudanças significativas de pressão durante o ensaio. Para sanar o problema, foi incorporada à célula CRS um equipamento destinado ao adensamento anisotrópico inicial dos corpos-de-prova.

Esse equipamento, adaptado do equipamento para adensamento anisotrópico em câmara triaxial (ANDRESEN e SIMONS, 1960), consiste basicamente de uma alavanca horizontal apoiada sobre duas rótulas do tipo ponta de faca, que recebe um pendural para pesos numa extremidade e, na outra, um pequeno peso que tem a função de contrabalançar e aprumar o equipamento. O peso deste conjunto – magnificado por uma razão 1:3,70 - é transmitido ao pistão de cargas da célula CRS por meio de um cabeçote de carga sobreposto ao mesmo. A Figura 39 mostra o equipamento já montado sobre a célula CRS.

O equipamento para carregamento anisotrópico foi utilizado para a aplicação de tensões verticais de até 50 kPa, por duas razões: (a) o peso necessário para ultrapassar esta tensão era demasiadamente grande em relação ao tamanho do pendural; (b) a partir de tensões verticais maiores que 100 kPa, a oscilação da válvula reguladora de pressão de ar pode ser considerada ínfima, não causando prejuízos ao ensaio.

Foi feita uma avaliação da deformabilidade do novo equipamento. Para esse fim, realizou-se um carregamento incremental empregando um corpo de prova construído em aço comum, com dimensões ligeiramente inferiores às de um corpo de prova normal de solo. Na Tabela 11 estão apresentados os resultados encontrados, a partir dos quais se percebe a baixa deformabilidade do sistema de aplicação de carga empregado nesta dissertação.

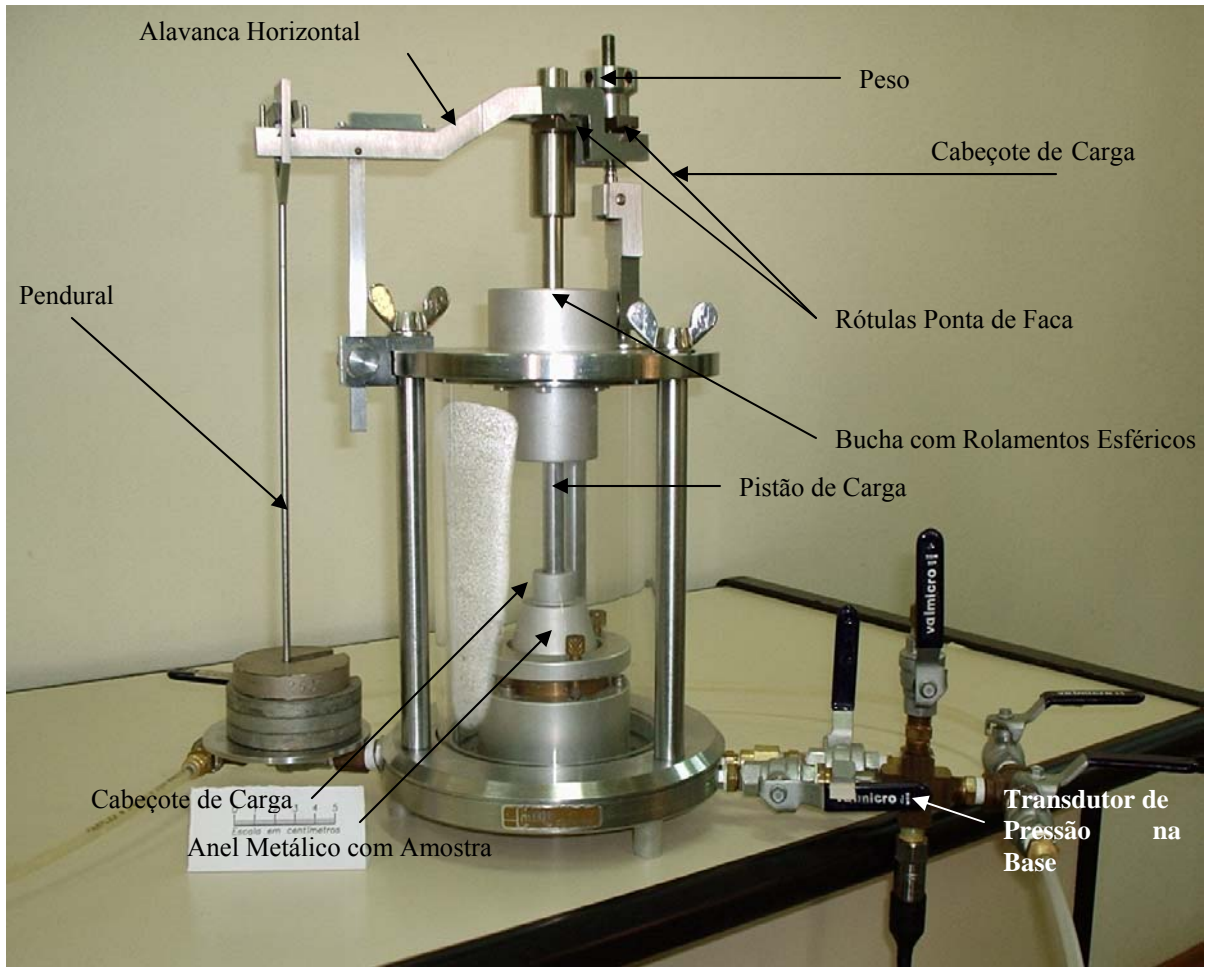


Figura 39: Equipamento anisotrópico montado sobre a câmara de adensamento

Tabela 11: Deformabilidade do equipamento para ensaios de adensamento incrementais construído

σ_v (kN/m ³)	Δ Leit. Transdutor de Deslocamento (mm)	Leit. Transdutor de Deslocamento (mm)
0	0.0000	0.0000
6.25	0.0011	0.0011
12.5	0.0013	0.0024
50	0.0019	0.0044
100	0.0002	0.0045
200	0.0005	0.0050
400	0.0011	0.0062
800	0.0011	0.0073

4.1.5 Prensa de aplicação de carga

Para a realização do ensaio CRS, era necessária uma prensa com velocidade de deslocamento constante. Entre as diversas prensas disponíveis no LMS/UFRGS, foi empregada, nesta pesquisa, a de marca *Wille*, modelo *UL 60-1*, que permite a variação contínua da velocidade de deslocamento entre 50 mm/min e 0,0001 mm/min, sendo capaz de aplicar uma carga nominal de 50 kN e máxima de 60 kN. Essa prensa pode ser controlada através de um painel digital local ou, remotamente, mediante conexão a um microcomputador. A Figura 40 traz um desenho esquemático da prensa utilizada no ensaio CRS.

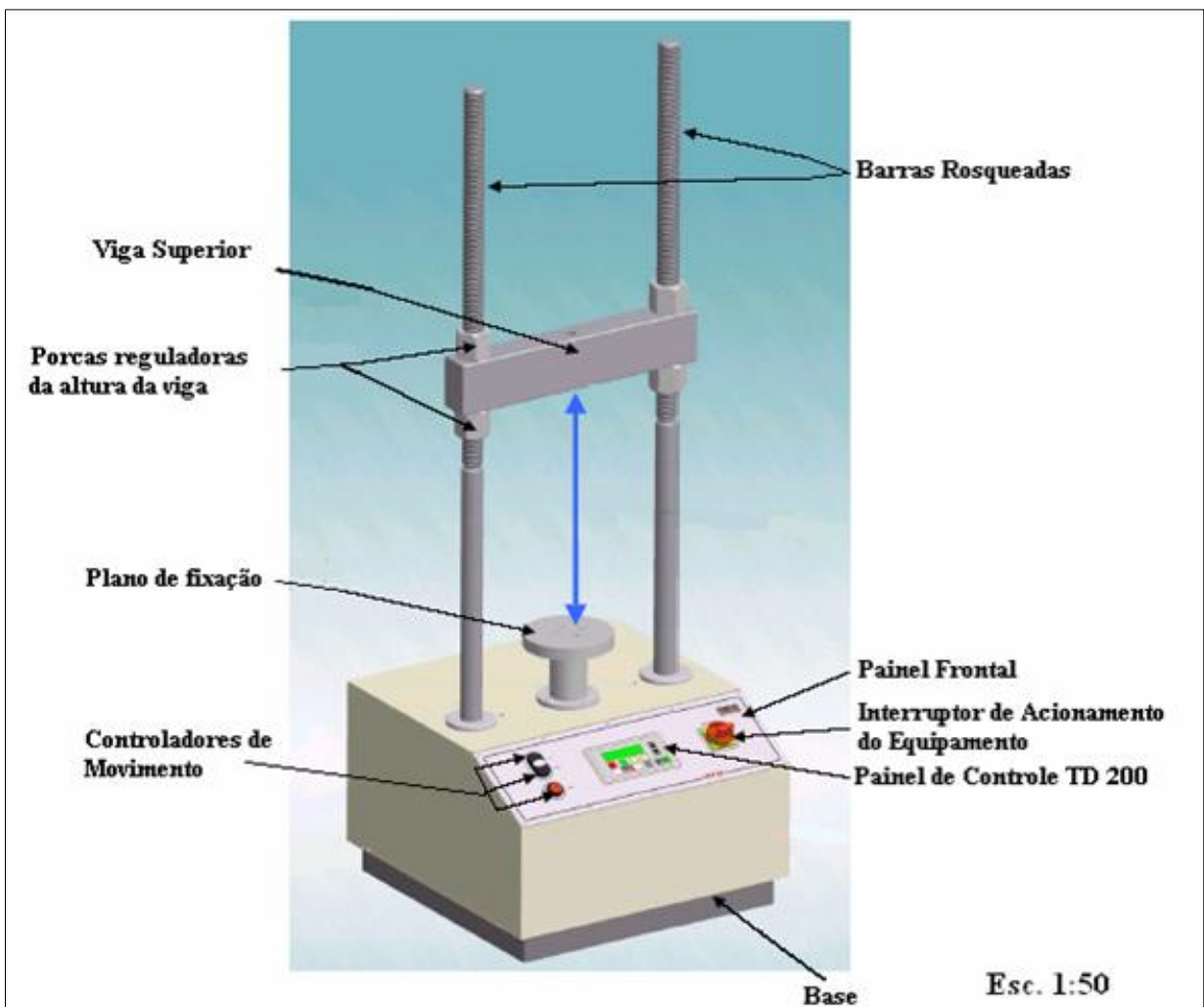


Figura 40: Desenho da prensa utilizada no ensaio CRS

4.2 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

A padronização dos procedimentos para a realização dos ensaios de adensamento é necessária para que todos os ensaios possam ser desenvolvidos de forma idêntica e assim os corpos de prova apresentem resultados comparáveis. Isso possibilita comparações e análises posteriores dos resultados encontrados.

4.2.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios de adensamento sofreram dois tipos de procedimento de moldagem diferentes. As amostras de areia siltosa de Santo Antônio da Patrulha, como já vinham de campo no interior de anéis metálicos especiais para emprego no equipamento convencional de adensamento, sofriam apenas um arrasamento cuidadoso das extremidades com fio de arame. As sobras eram utilizadas para a determinação do teor de umidade da amostra.

As amostras retiradas de campo no interior de anéis com diâmetro maior que o necessário para a realização dos ensaios de adensamento convencionais foram empregadas no equipamento para ensaios CRS. As amostras eram extraídas dos anéis de maior diâmetro enquanto se realizava a cravação cuidadosa do anel metálico da célula CRS no centro da amostra. O excesso de solo era removido por meio de um fio de arame.

As amostras para o ensaio de adensamento da argila siltosa do Aeroporto Internacional Salgado Filho sofriam primeiramente a retirada da parafina de ambas as faces do amostrador de paredes finas (Shelby) e a posterior remoção da amostra era feita empregando-se um extrator vertical. Durante a extração, o sentido de movimento da amostra era o mesmo da amostragem em campo. Os primeiros 3 cm de solo extraídos do amostrador não eram aproveitados para a moldagem do corpo de prova, uma vez que a parafina praticamente os envolvia. Após ultrapassar esse trecho, outra amostra era extraída, em geral com comprimento de 3 a 3,5 cm, de onde era moldado um corpo de prova no interior do anel da célula CRS. Nessa amostra recém-extraída, o anel metálico com bordas cortantes era lentamente cravado

no centro da amostra, e o solo excedente era removido de forma cautelosa por meio do emprego de um fio de arame.

4.2.2 Procedimentos do ensaio de adensamento convencional

Terminada a fase de moldagem dos corpos de prova, as amostras em seus anéis metálicos eram pesadas por meio de uma balança digital com resolução de 0,01 g. O anel metálico contendo o corpo de prova era instalado em um consolidômetro do tipo anel fixo, munido de papel filtro, pedras porosas e cabeçote. O consolidômetro era preenchido com água e colocado na prensa de adensamento de marca *Wykeham Farrance Ltd*. O braço de alavanca da prensa era balanceado, nivelado e, em seguida, era zerado o deflectômetro.

O corpo de prova permanecia por um tempo mínimo de 12 horas neste estado antes de iniciarem-se os carregamentos. Os carregamentos impostos às amostras eram os seguintes: 6,25 kPa, 12,50 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1.600 kPa. Os estágios de carga em argila siltosa foram aplicados a intervalos de 24 horas, como preconiza a norma ABNT MB-3336/90. Porém, para a areia siltosa, os estágios de carga eram aplicados a intervalos de 1 hora, uma vez que todo o adensamento primário ocorria nos primeiros 30 s de ensaio. Para cada estágio de carregamento, as leituras de deslocamento vertical do cabeçote eram tomadas aos 7,5 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, para os ensaios em areia siltosa. Para a argila siltosa, os intervalos iniciais de leituras se repetiam, porém no restante do tempo se distribuíam da seguinte forma 2 h, 4h, 8h e 24 h.

4.2.3 Procedimentos dos ensaios incrementais na célula CRS

Acabada a moldagem das amostras, realizada de forma análoga aos ensaios de adensamento incrementais, os corpos de prova para os ensaios CRS eram pesados, com seus respectivos anéis metálicos, em uma balança digital com resolução de 0,01 g.

O anel metálico contendo o corpo de prova era instalado no pedestal da célula de adensamento, munido de papel filtro, pedras porosas e cabeçote, tomando-se cuidado na hora de colocação e aperto do colar de fixação, a fim de possibilitar a vedação adequada do ensaio

através do anel “O-ring” situado na base. Terminada a montagem da célula de adensamento, a célula CRS era fechada novamente, tomando-se cuidado para a completa vedação do conjunto. Posteriormente era introduzido o pistão de cargas e feito o enchimento da câmara com água.

Com a câmara CRS cheia, aplicava-se uma contrapressão, geralmente de 100 kPa, em um único estágio, e aguardava-se até que a leitura da poro pressão na base do corpo de prova alcançasse o mesmo valor. Em geral, para os ensaios realizados em argila siltosa, a espera se prolongava por aproximadamente 18 horas, enquanto que, nos ensaios em areia siltosa, esse tempo não passava de alguns poucos minutos.

Garantida a saturação do corpo de prova, iniciava-se o ensaio. Para a argila siltosa foram adotados os intervalos normais até a primeira hora e, a partir daí, uma nova leitura era realizada a cada intervalo de 30 min. Isso possibilitou que as curvas de adensamento no novo equipamento fossem dotadas de mais pontos experimentais do que os realizados em prensas convencionais.

Tratando-se do ensaio CRS, antes de iniciar cada ensaio, a prensa era programada com a velocidade de deformação desejada. Ao longo do ensaio eram lidos: o tempo decorrido, a força aplicada, o deslocamento vertical do corpo de prova e a poro pressão gerada na base. Os ensaios duraram entre 10 min e 5 horas, sendo o tempo menor para os ensaios em areia siltosa com a maior velocidade de deformação e o tempo maior, para o ensaio em argila siltosa de menor velocidade de deformação. Devido à presença da aquisição automática de dados e seguindo o que preconiza a prática nacional do ensaio CRS, descrita por Carvalho (1989) e Moura (2004), as leituras dessas grandezas eram realizadas a intervalos de 1 min, até que o ensaio atingisse 90% da capacidade da célula de carga.

4.3 CÁLCULOS DOS ENSAIOS DE ADENSAMENTO

Para o cálculo das diversas grandezas e parâmetros envolvidos nos ensaios de adensamento de solos, foram empregadas as equações clássicas apresentadas abaixo:

a) Coeficiente de Compressibilidade (a_v)

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (4.1)$$

b) Coeficiente de Compressibilidade Volumétrica (m_v)

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_1} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v (1 + e_1)} \quad (4.2)$$

c) Módulo oedométrico

$$D = \frac{1}{m_v} = \frac{1 + e_1}{a_v} = \frac{\Delta \sigma'_v (1 + e_1)}{\Delta e} \quad (4.3)$$

d) Índice de Compressão (C_c) e Recompressão (C_r)

$$C_c = C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (4.4)$$

e) Relação de Compressão (C_R)

$$C_R = \frac{C_C}{1 + e_i} \quad (4.5)$$

f) Relação de Recompressão (R_R)

$$R_R = \frac{C_R}{1 + e_i} \quad (4.6)$$

g) Coeficiente de Adensamento (c_v)

O coeficiente de adensamento pode ser determinado a partir de dois procedimentos distintos, conforme a norma ABNT-MB-3336/90. Nesta dissertação, foi empregado apenas o método de Taylor devido às características dos solos ensaiados.

$$c_v = \frac{0,848 \cdot (0,5 \cdot H_{90})^2}{t_{90}} \quad (4.7)$$

onde: H_{90} é a altura do corpo de prova correspondente a 90% do adensamento primário

t_{90} tempo correspondente à ocorrência de 90% do adensamento primário

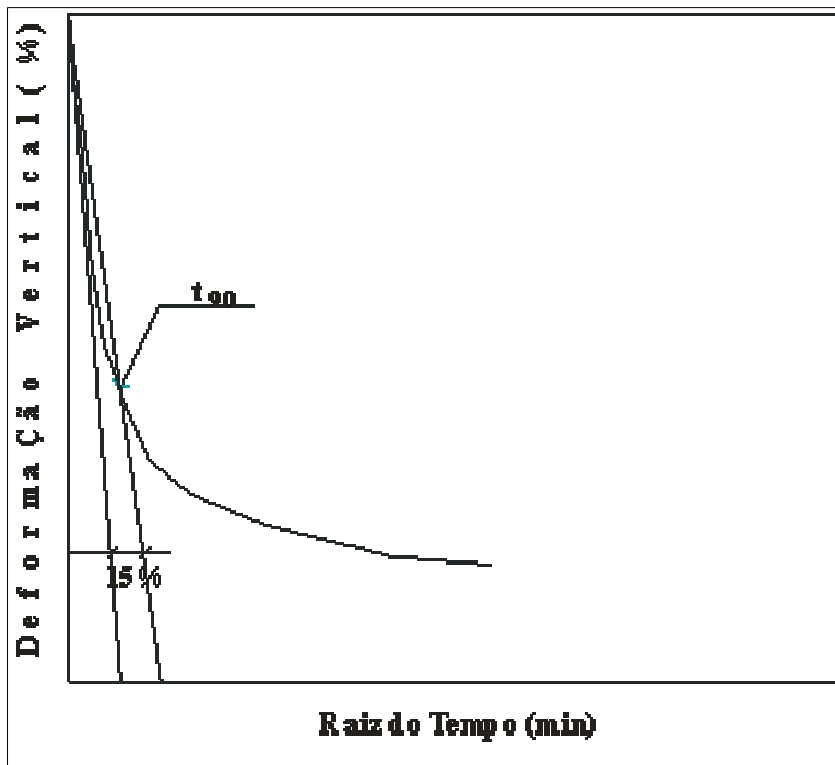


Figura 41: Determinação de t_{90} pelo Método de Taylor

Fonte: Norma ABNT-MB-3336/90

Os parâmetros do ensaio CRS, nesta dissertação, foram calculados conforme o método de Wissa et al. (1971), apresentado anteriormente na seção 2.4.2, e para determinação da velocidade do ensaio foram empregados os métodos expostos na seção 2.4.3.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são primeiramente apresentados os resultados obtidos de ensaios de adensamento (i) incrementais, utilizando um equipamento convencional (sem saturação do corpo de prova por contrapressão); (ii) incrementais utilizando a câmara oedométrica instalada em uma prensa munida de cilindro pneumático (neste caso, com saturação do corpo de prova por contrapressão); (iii) ensaios tipo CRS utilizando o novo equipamento. Os resultados são analisados e comparados com os obtidos com o equipamento CRS na seção 5.4.

5.1 ENSAIOS DE ADENSAMENTO INCREMENTAIS NO EQUIPAMENTO CONVENCIONAL

Foram realizados sete ensaios de adensamento incrementais, sendo quatro em areia siltosa e três em argila siltosa, seguindo a norma brasileira ABNT MB-3336/90. Foram utilizadas duas prensas de adensamento convencionais do tipo Bishop, ambas de carregamento frontal. Os resultados desses ensaios foram utilizados como comparativos aos resultados dos ensaios CRS e, também, para avaliar os possíveis efeitos da estrutura natural destes solos sobre os parâmetros de deformabilidade.

5.1.1 Resultados dos ensaios em areia siltosa

Na areia siltosa foram realizados dois ensaios de adensamento com amostras indeformadas e outros dois com material remoldado no interior de anéis metálicos, que apresentavam diâmetro de 50 mm e altura de 20 mm. Os carregamentos aplicados aos corpos de prova atingiram tensões verticais de 6,25 kPa, 12,50 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa. Os estágios de cargas duraram 1 h, o que possibilitou que cada ensaio durasse um dia.

Os ensaios de adensamento convencional realizados nas amostras indeformadas de areia siltosa receberam a denominação ECAS_I-1 e ECAS_I-2 [Ensaio Convencional em

Areia Siltosa _ Indeformados], enquanto os ensaios realizados a partir de amostras remoldadas foram denominados de ECAS_R-1 e ECAS_R-2 [Ensaio Convencionais em Areia Siltosa _ Remoldados].

5.1.1.1 Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma'_v$]

Nesta seção são mostradas as curvas e x $\log \sigma'_v$ (Figura 42) obtidas por meio dos ensaios convencionais, realizados em prensa do tipo Bishop com areia siltosa. Como esperado para areias, as amostras indeformadas desse solo se mostraram pouco deformáveis.

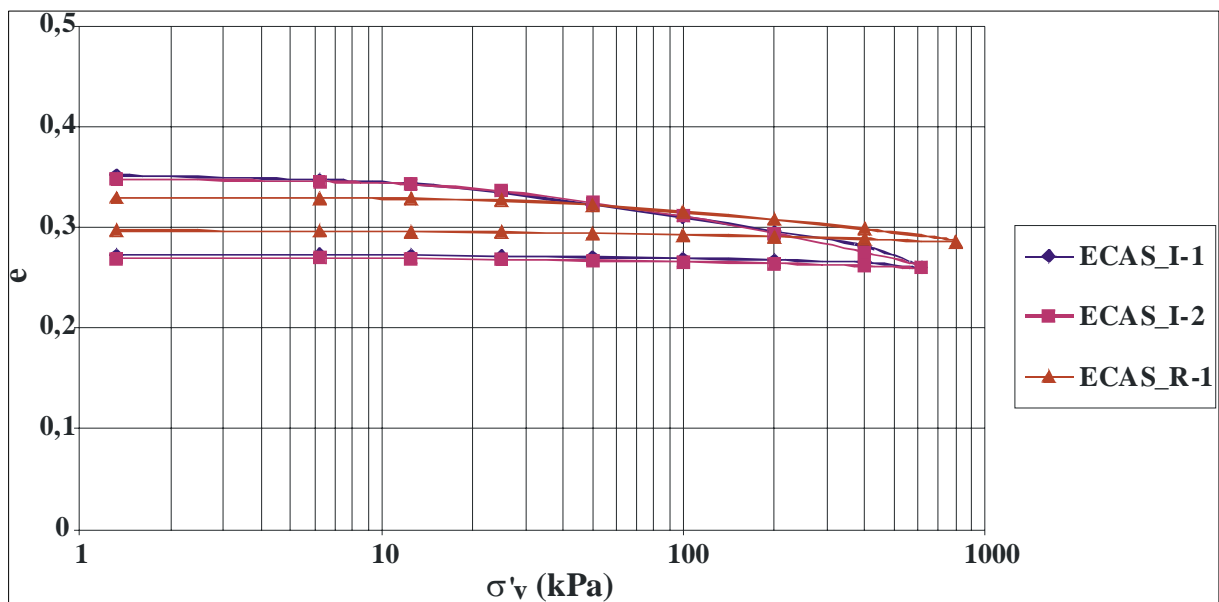


Figura 42: Curvas de e x σ'_v (esc. log) para a amostra indeformada de areia siltosa ECAS_I-1, ECAS_I-2 e para a amostra remoldada em índice de vazios próximo ao de campo (ECAS_R-1), ensaiada no equipamento convencional

Devido aos resultados obtidos, foi realizado um novo ensaio remoldado, tendo a amostra sido moldada para alcançar um índice de vazios próximo a 1, permitindo assim avaliar a importância do índice de vazios inicial do solo. A Figura 43 mostra os resultados indicando compressibilidade acentuada, mas com índices de vazios finais ainda bastante altos.

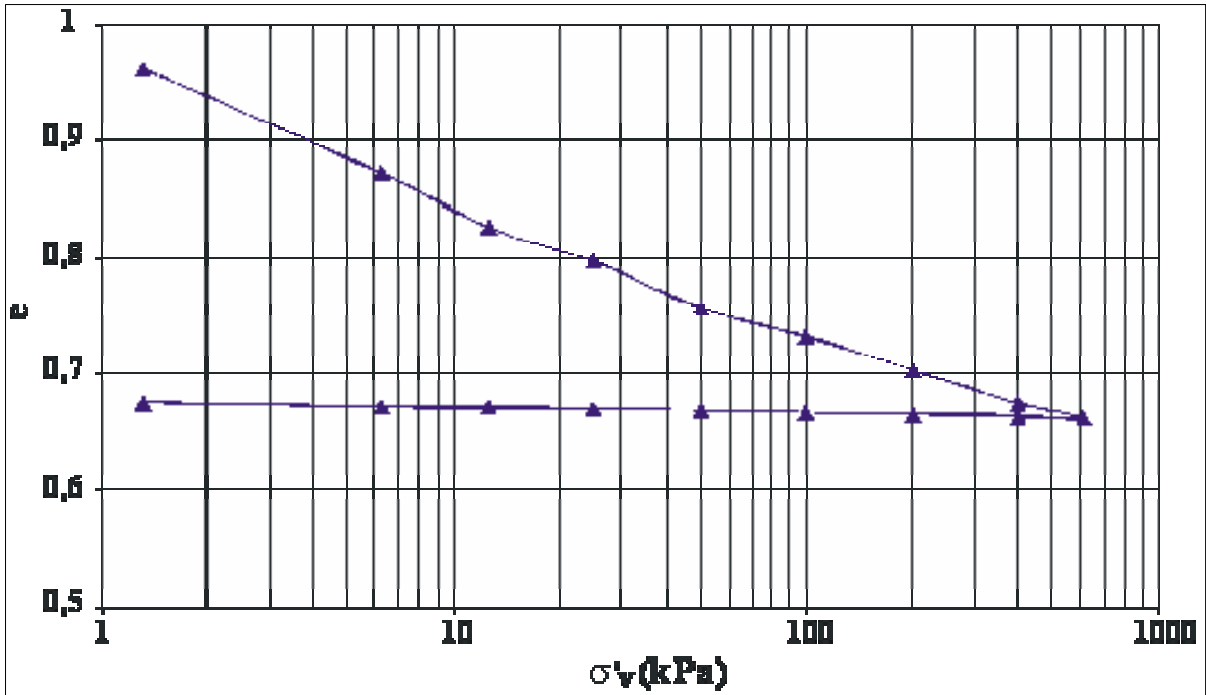


Figura 43: Curva $e \times \sigma'_v$ (esc. log) para a amostra remoldada de areia siltosa (ECAS_R-2), preparada com índice de vazios inicial próximo de 1, ensaiada no equipamento convencional

A partir desses resultados, pode-se determinar que o comportamento das areias apresenta uma compressibilidade reduzida, mas dependente dos índices de vazios iniciais. Não foi possível definir uma pressão de pré-adensamento no ensaio com índice de vazios inicial igual a 1, porém para os demais ensaios os valores variaram entre 13 e 44 kPa, e o valor de C_C variou entre 0,030 e 0,059 para $e_0 \approx 0,3$ e $C_C = 0,113$ para $e_0 \approx 0,95$. (Tabela 14)

5.1.1.2 *Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t]*

As curvas recalque x tempo obtidas para os ensaios de adensamento incrementais realizados em areia siltosa com o equipamento convencional, estão apresentadas nas Figuras 44 e 45. Percebe-se a quase estabilização dos deslocamentos verticais depois de transcorridos os primeiros 30 s de ensaio, o que era esperado para esse tipo de material.

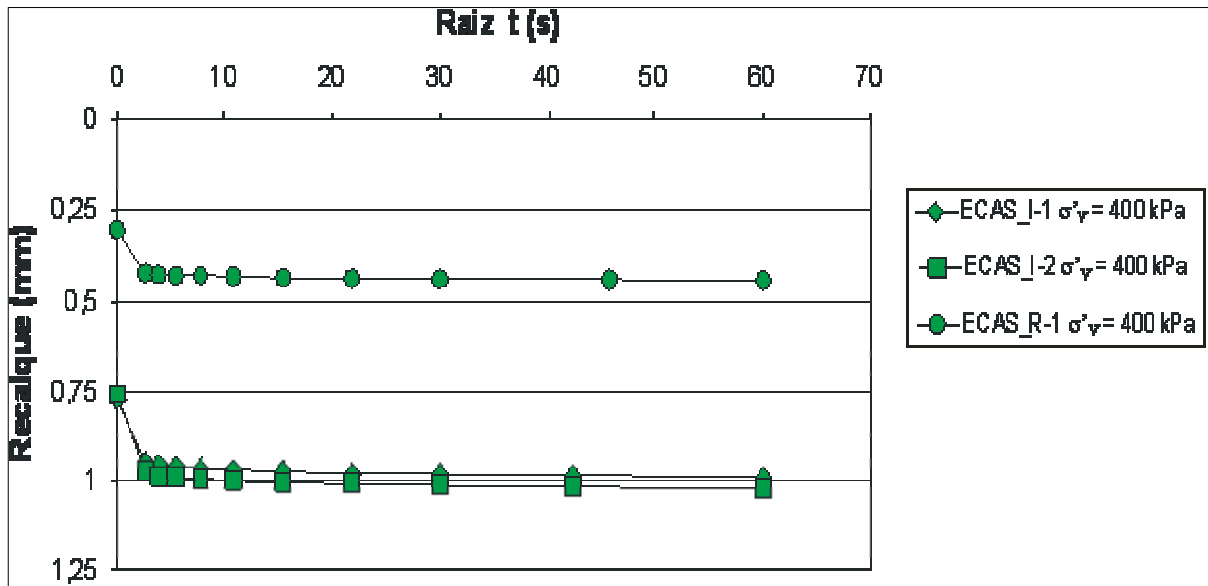


Figura 44: Curvas recalque x tempo obtidas com a amostra indeformada de areia siltosa nos ensaios ECAS_I-1, ECAS_I-2, e na amostra deformada com índice de vazios próximo ao de campo ECAS_R-1 ensaiada com o equipamento convencional, para a tensão de 400 kPa

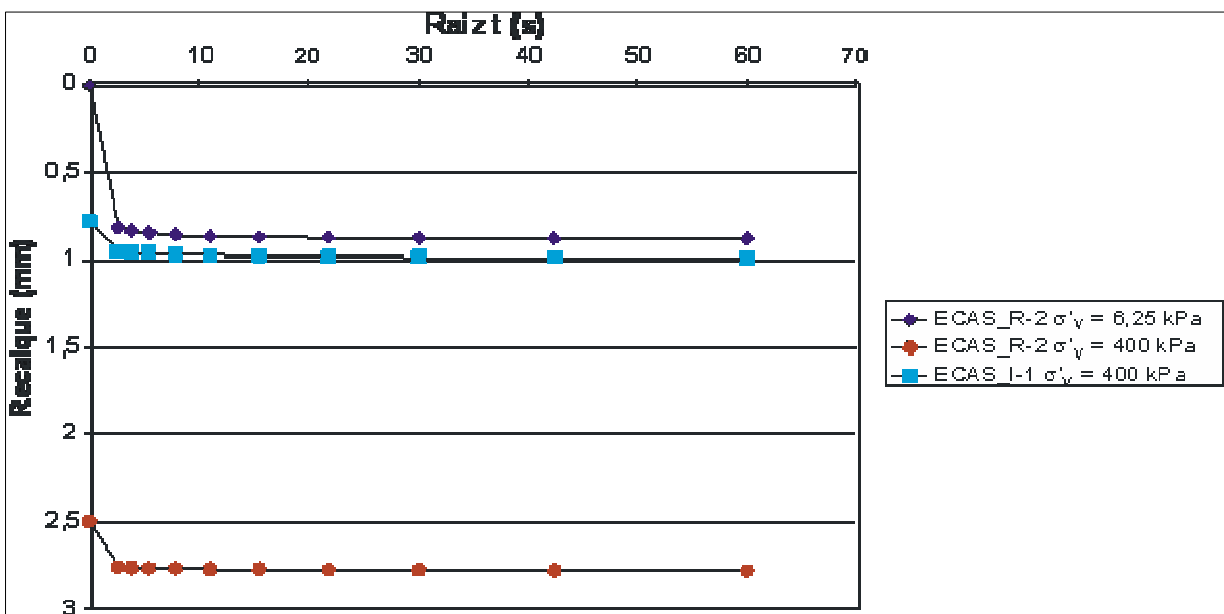


Figura 45: Curvas recalque x tempo obtidas com a amostra remoldada de areia siltosa ECAS_R-2, preparada com índice de vazios inicial igual a 1 e ensaiada no equipamento convencional e na amostra indeformada ECAS_I-1

5.1.2 Resultado dos ensaios em argila siltosa

Na argila siltosa foram realizados dois ensaios de adensamento incrementais com amostras indeformadas e um ensaio com o mesmo solo remoldado no interior de anéis

metálicos que apresentavam diâmetro de 50 mm e altura de 20 mm. Os carregamentos aplicados às amostras atingiram tensões verticais de 6,25 kPa, 12,50 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa, 800 kPa e 1.600 kPa. Os estágios de carregamento duraram 24 horas.

Os ensaios de adensamento incrementais nas amostras indeformadas do solo argiloso receberam a denominação ECARG_I-1 e ECARG_I-2 [Ensaio Convencional em Argila Siltosa _ Indeformados], enquanto o ensaio realizado com a amostra remoldada foi denominado de ECARG_R-1 [Ensaio Convencional em Argila Siltosa _ Remoldados].

5.1.2.1 *Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x log σ'_v]*

Nesta seção estão mostradas as curvas $e \times \log \sigma'_v$, obtidas com ensaios de adensamento incrementais, utilizando equipamento convencional, realizados em amostras de argila siltosa rija (Figura 46). Foram testadas amostras indeformadas, obtidas de 1,56 m e 1,59 m de profundidade (ECARG_I-1 e ECARG_I-2, respectivamente) e na amostra remoldada com o mesmo material e índice de vazios semelhante. Pode-se notar que as amostras indeformadas, extraídas da crosta do depósito de solos moles do Aeroporto Salgado Filho, mostraram-se pouco compressíveis e com comportamento semelhante. Os valores de C_c variaram entre 0,147 e 0,152 para as amostras indeformadas e 0,214 para a amostra remoldada. (Tabela 15).

5.1.2.2 *Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t]*

Na Figura 47 são apresentadas as curvas recalque x tempo obtidas dos ensaios de adensamento incrementais realizados em argila siltosa, utilizando o equipamento convencional. A partir das curvas, pode-se dizer que o tempo de 24 horas entre estágios de carregamento é perfeitamente aceitável, observando-se uma estabilização dos recalques ao final do intervalo.

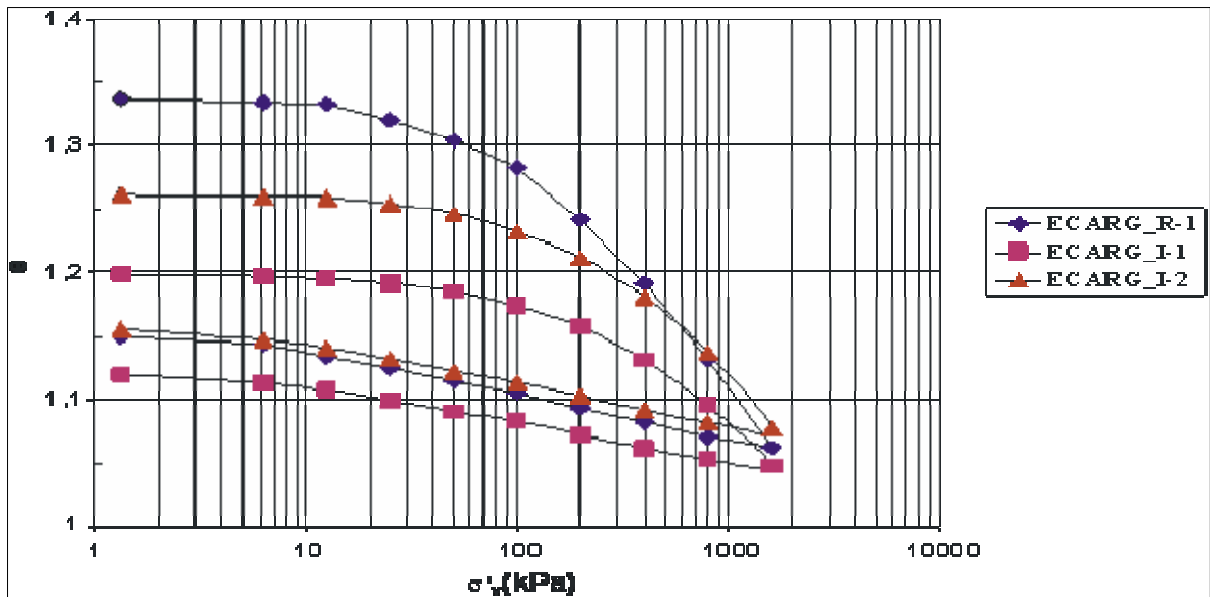


Figura 46: Curvas e x σ'_v (esc. log) obtidas com o ensaio de adensamento incremental, em equipamento convencional, para as amostras indeformadas e remoldada de argila siltosa

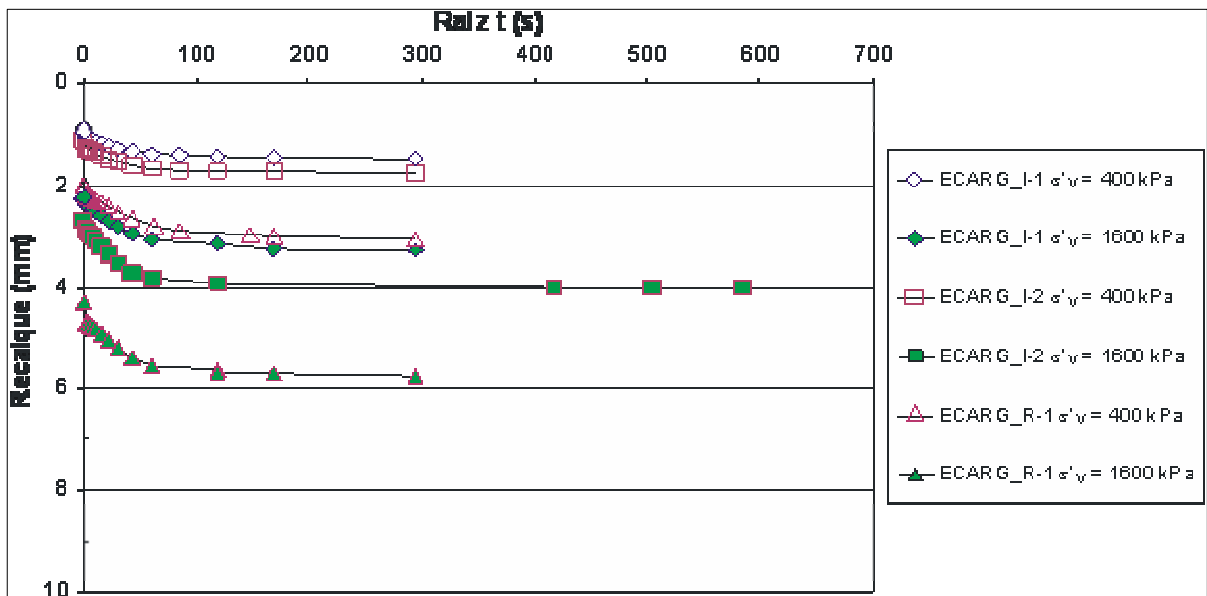


Figura 47: Curvas recalque x raiz do tempo obtidas com o ensaio de adensamento incremental, em equipamento convencional, para as amostras indeformadas e remoldada de argila siltosa

5.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO INCREMENTAIS EM PRENSA PNEUMÁTICA

A norma brasileira ABNT MB-3336/90 foi utilizada como referência para os procedimentos de ensaio descritos na seção 4.2.3. Esses procedimentos foram aplicados em

três ensaios de adensamento incrementais, os quais foram realizados com o corpo de prova instalado no interior de uma câmara CRS e saturado com uma contrapressão de 100 kPa. Dois ensaios foram executados em areia siltosa e um em argila siltosa, todos utilizando amostras indeformadas desses solos. Esses ensaios serviram principalmente para preparar a instrumentação e detectar possíveis problemas para os ensaios CRS, mais complexos, a serem realizados posteriormente.

De forma análoga ao CRS, a drenagem do corpo de prova foi permitida somente na face superior do corpo de prova, portanto a altura de drenagem foi igual à própria altura do corpo de prova. Na face inferior, estava conectado um transdutor de pressão, com a finalidade de medir o excesso de poro pressão ao longo do ensaio.

5.2.1 Resultados dos ensaios em areia siltosa

Na areia siltosa foram realizados dois ensaios de adensamento incrementais com amostras indeformadas no interior de anéis metálicos de diâmetro 50,8 mm e altura 19,9 mm. Os carregamentos aplicados às amostras atingiram tensões verticais de 6,25 kPa, 12,50 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa. Os estágios de cargas duraram 1 h, possibilitando que cada ensaio não ultrapassasse um dia de duração. Os ensaios de adensamento em areia siltosa, realizados com uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, receberam a denominação de PENAS_I-1 e PENAS_I-2 [Ensaio com a Prensa Pneumática em Areia Siltosa _ Indeformados] .

5.2.1.1 Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma'_v$]

As curvas e x $\log \sigma'_v$, apresentadas na Figura 48, comprovam, de forma análoga aos ensaios realizados no equipamento convencional, a baixa compressibilidade da areia siltosa empregada neste estudo, com resultados similares de C_c que variaram entre 0,023 e 0,065. (Tabela 14).

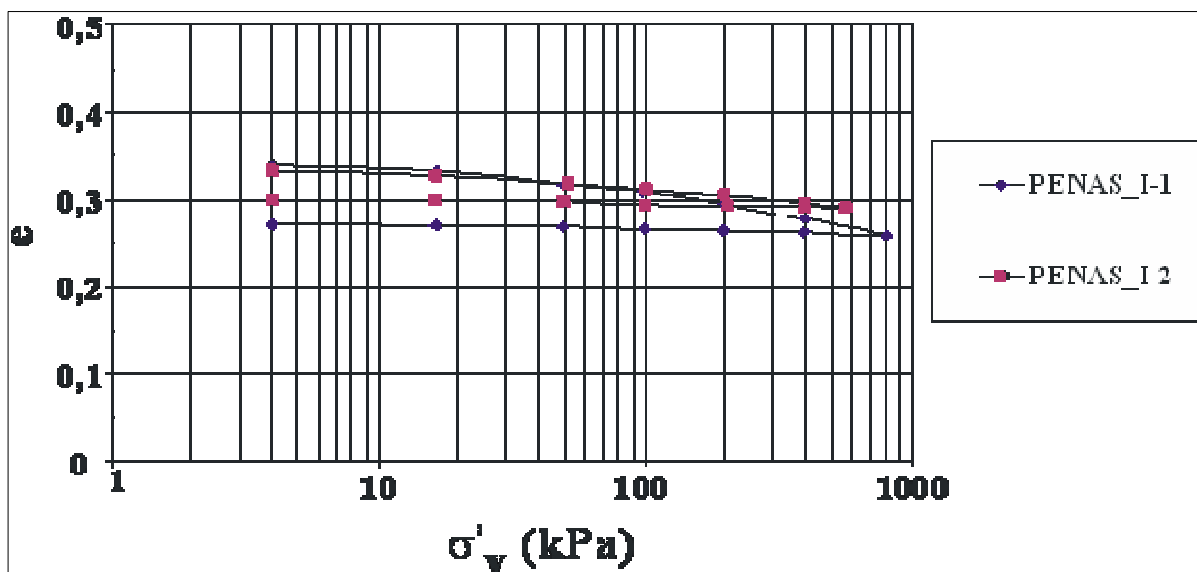


Figura 48: Curvas e x σ'_v (esc. log) obtidas com o ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para as amostras indeformadas de areia siltosa

5.2.1.2 Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t]

De forma análoga aos ensaios em equipamento convencional, os ensaios de adensamento realizados com uma câmara CRS instalada no interior de uma prensa pneumática permitiram gerar curvas de recalque x tempo adequadas para os solos ensaiados. Porém, como foram utilizados nesse equipamento transdutores conectados a um sistema de aquisição automática de dados, obteve-se um número maior de pontos experimentais para cada curva, em comparação ao ensaio convencional. Isso possibilitou uma análise mais confiável destas curvas. (Figura 49)

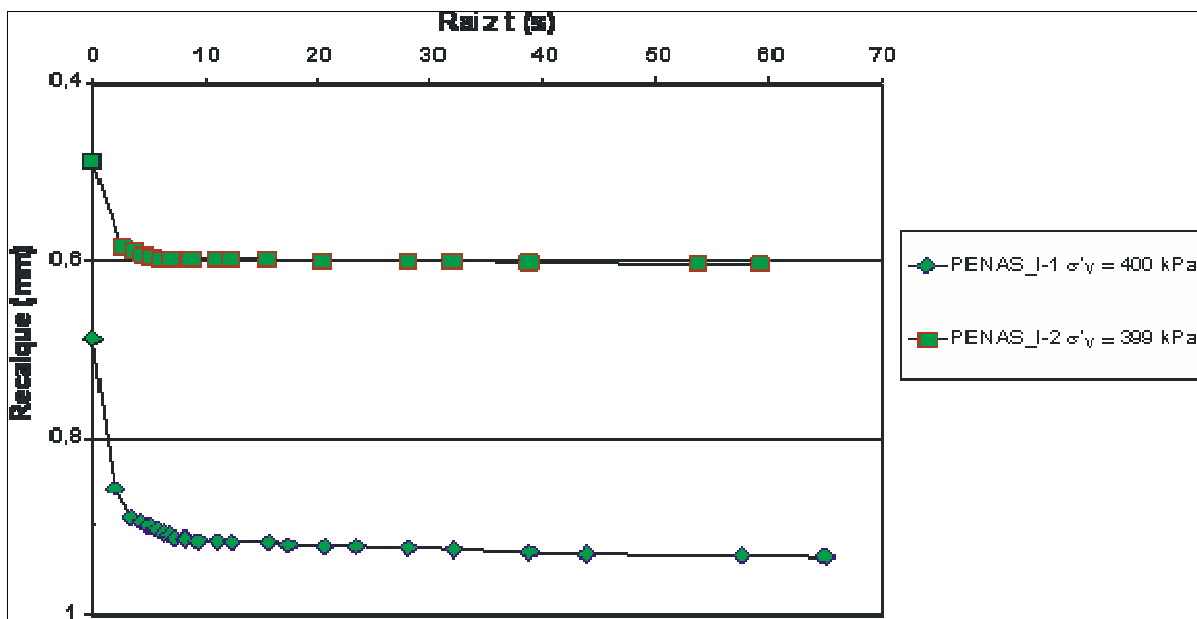


Figura 49: Curvas recalque x raiz de t obtidas com o ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática

5.2.1.3 Curvas poro pressão versus tempo [u_b x t]

A realização de ensaios de adensamento realizados com a câmara CRS instalada sob uma prensa pneumática, permitiu a leitura da poro pressão gerada na base da amostra. Conforme esperado para areia, a geração de excesso de poro pressão na base foi pequena. A Figura 50 mostra a poro pressão gerada durante a realização do ensaio PENAS_I-1 e percebe-se que somente na tensão vertical efetiva de 800 kPa, houve uma pequena geração de excesso de poro pressão na base. Nas demais tensões, a poro pressão gerada na base foi instantaneamente dissipada nestes solos arenosos.

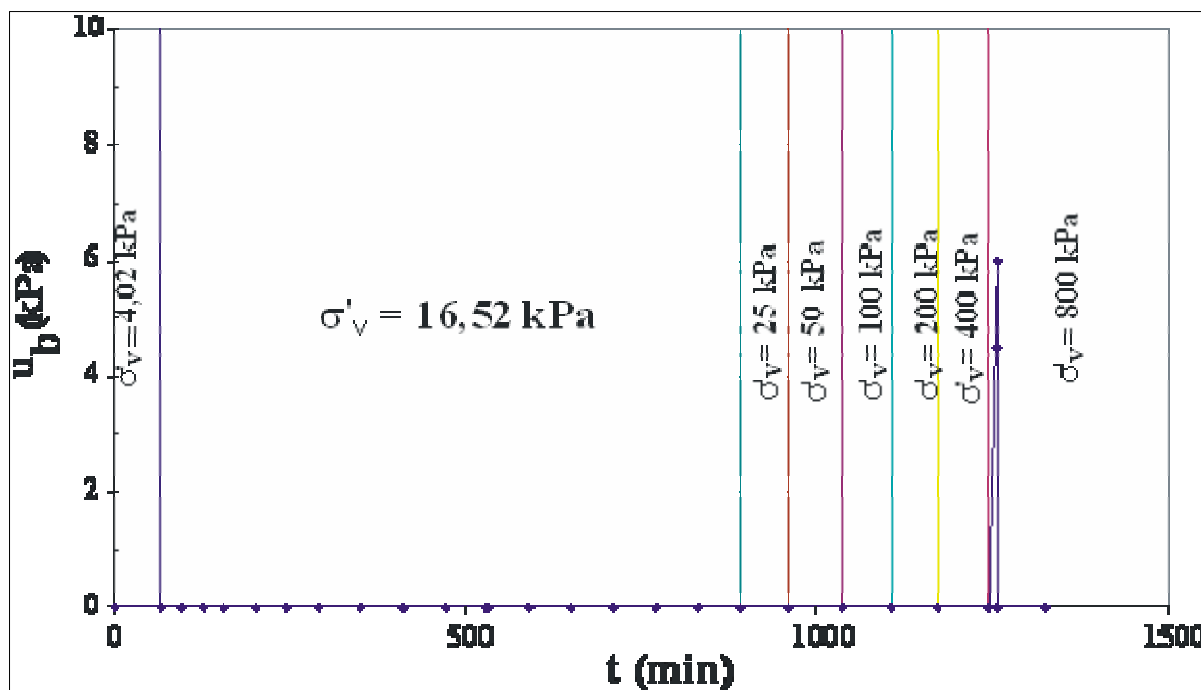


Figura 50: Poro pressões x tempo obtidas em um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática (amostra indeformada de areia siltosa PENAS_I-1)

5.2.2 Resultado dos ensaios em argila siltosa

Na argila siltosa foi realizado apenas um ensaio de adensamento incremental com câmara CRS e prensa pneumática. Utilizou-se uma amostra indeformada da profundidade de 1,67 m, cujo anel metálico apresentava diâmetro de 49,7 mm e altura de 20 mm. Os carregamentos aplicados a esta amostra atingiram tensões verticais de 6,25 kPa, 12,50 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa e 800 kPa, sendo o maior valor limitado pela capacidade da célula de carga empregada. Os estágios de cargas duraram 24 horas, e o ensaio foi denominado de PENARG_I-1 [Ensaio com a Prensa Pneumática em Argila Siltosa _ Indeformado].

5.2.2.1 Curvas de índice de vazios versus tensão vertical efetiva [e x $\log \sigma'_v$]

A curva e x $\log \sigma'_v$ mostrou que a compressibilidade da argila siltosa, obtida da profundidade de 1,67 m (amostra PENARG_I-1), é um pouco superior à compressibilidade das amostras ensaiadas no equipamento convencional, obtidas de profundidades menores (isto

é, da parte superior do tubo amostrador). Com o aumento do índice de vazios com a profundidade e $C_c = 0,276$ (Tabela 15), denota-se uma diminuição na rigidez do solo, conforme esperado por ter-se ultrapassado a camada da crosta superficial do depósito.

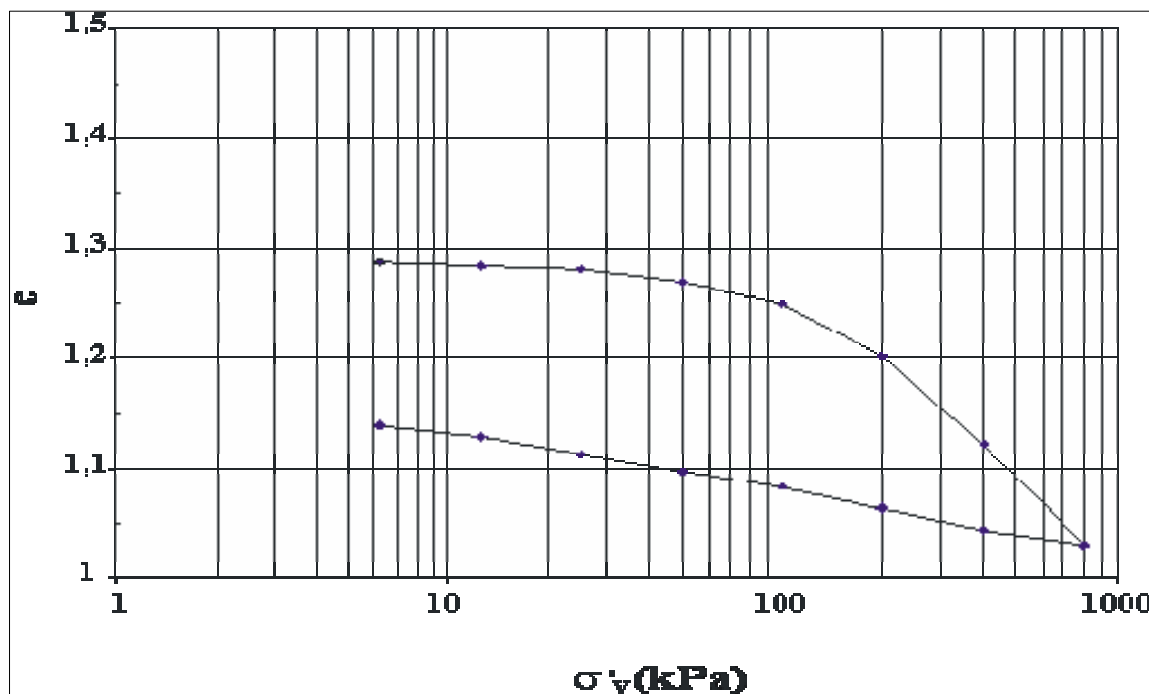


Figura 51: Curva e x σ'_v (esc. log) obtida com um ensaio de adensamento incremental utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para a amostra indeformada de argila siltosa

5.2.2.2 *Curvas recalque versus raiz de tempo [H x raiz t]*

A Figura 52 apresenta a curva recalque x tempo do ensaio de adensamento incremental realizado na amostra indeformada de argila siltosa (profundidade de 1,67 m), utilizando a câmara CRS. Devido à utilização de um sistema de aquisição automática de dados, um número bem superior de pontos foi obtido para traçar as curvas, permitindo uma melhor resolução para o ensaio.

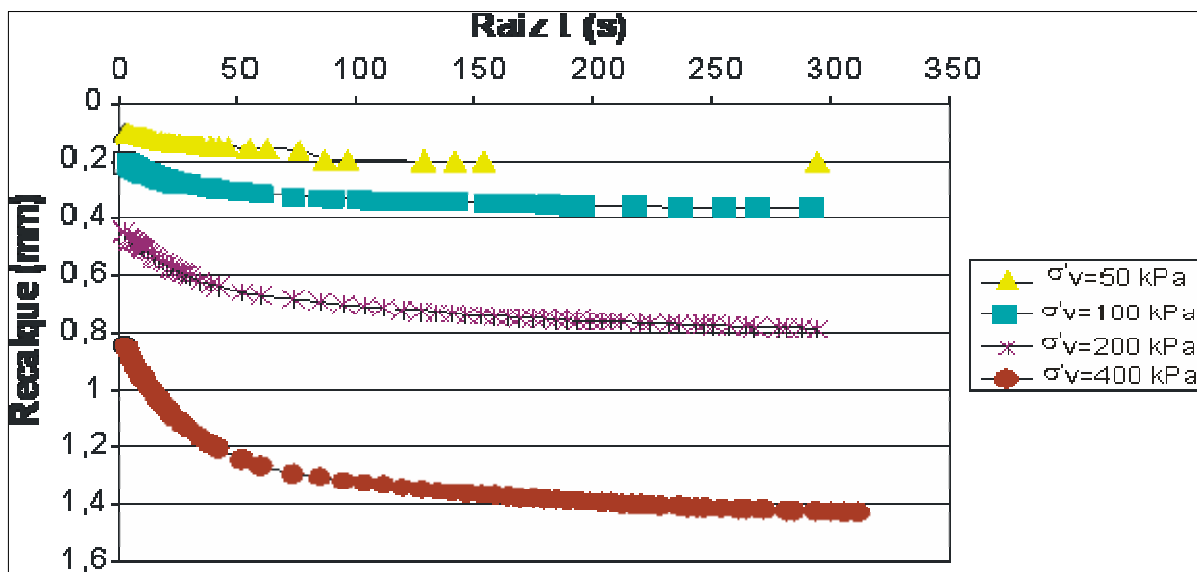


Figura 52: Curva recalque x tempo obtida com um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática, para a amostra indeformada de argila siltosa

5.2.2.3 Curvas poro pressão versus tempo [u_b x t]

A realização de ensaios de adensamento com a utilização da câmara CRS permitiu a leitura da poro pressão gerada na base da amostra. Conforme esperado para argila, a geração de excesso de poro pressão na base foi considerável. O aumento da tensão de carregamento faz crescer linearmente a máxima poro pressão gerada e, a partir daí, há uma dissipação bem conformada.

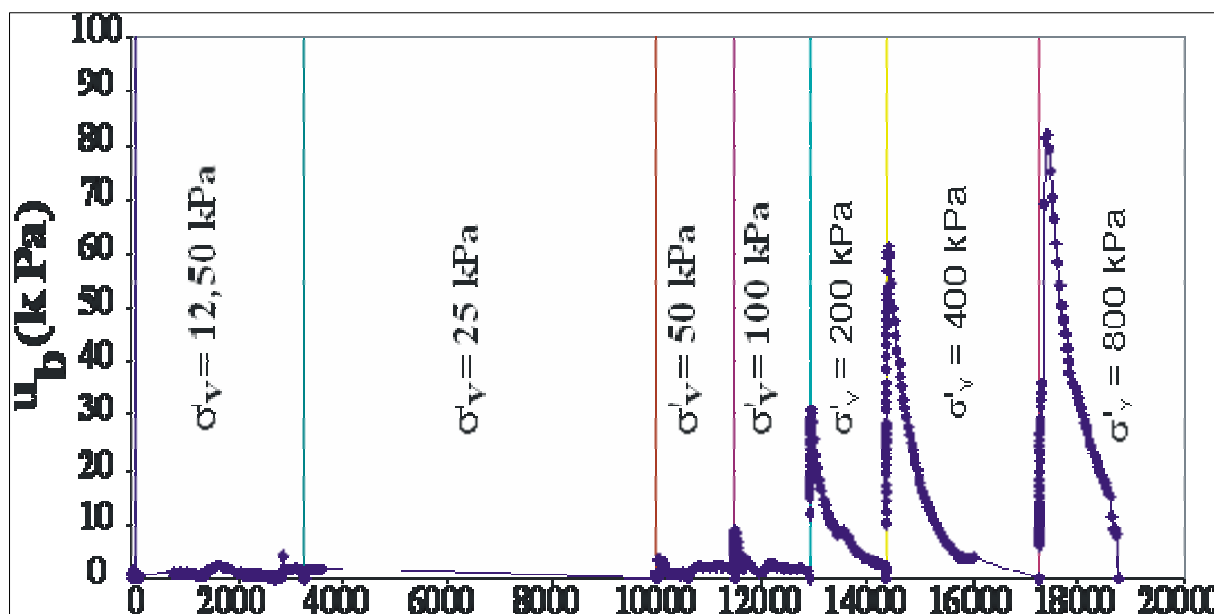


Figura 53: Curva poro pressão x tempo obtida com um ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática (amostra indeformada de argila siltosa PENARG_I-1, extraída a 1,67 m de profundidade)

5.3 ENSAIOS DE ADENSAMENTO COM VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO CONTROLADA (CRS)

Nesta dissertação foram realizados 7 ensaios de adensamento com velocidade de deformação controlada (CRS), sendo 3 em amostras de areia siltosa e 4 em amostras de argila siltosa. A duração desses ensaios variou de 10 min até 7 horas. Os resultados encontrados estão descritos nesta seção, juntamente com uma discussão sobre as velocidades de deformação empregadas.

As amostras foram divididas segundo o tipo de solo, a quantidade e a qualidade da amostra, recebendo conforme o caso a seguinte nomenclatura:

- Dois ensaios CRS em areia siltosa com amostras indeformadas, denominados de CAS_I-1 e CAS_I-2;
- Um ensaio CRS em areia siltosa com amostra remoldada, denominado de CAS_R-1;
- Três ensaios CRS em argila siltosa com amostras indeformadas, denominados de CARG_I-1, CARG_I-2, CARG_I-3;

- Um ensaio CRS em argila siltosa com amostra remoldada, denominado de CARG_R-1.

5.3.1 Velocidade de deformação aplicada no ensaio CRS

O primeiro passo, para a correta realização do ensaio CRS, passa pela determinação da velocidade de deformação a ser empregada ao ensaio. Nos ensaios realizados para esta dissertação, os quatro métodos para determinação da velocidade de deformação do ensaio apresentados na revisão bibliográfica (seção 2.4.3) foram utilizados.

5.3.1.1 Velocidade de deformação para os ensaios em areia siltosa

O primeiro método empregado para a determinação da velocidade de deformação, utilizada nos ensaios CRS em areia siltosa, foi o da norma americana ASTM D4186/98, que se baseia na Tabela 6. Para um solo não-plástico, como a areia siltosa ensaiada nesta dissertação, resultou uma velocidade de deformação de 0,04%/min. Para um anel metálico de altura 20 mm, isto resulta em uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote igual a 0,008 mm/min. O ensaio de adensamento, para atingir uma deformação de 1,23 mm a mesma encontrada no ensaio de adensamento para a amostra indeformada PENAS_I-1, demoraria aproximadamente 155 min.

O segundo método utilizado foi o descrito por Smith e Wahls (1969), que se baseia na Equação 2.6. Adotando-se para os parâmetros da equação: $m = 0,938$, que é a porcentagem remanescente da altura da amostra no momento de maior poro pressão do ensaio PENAS_I-1, (Figura 49), $H_i = 20$ mm, $c_v = 2,61 \times 10^{-2}$ cm²/s (Tabela 14), $C_c = 0,065$ (Tabela 14) e admitindo-se uma razão u_b / σ_v de 30%, obtém-se uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote igual a 0,164 mm/min, que é mais de 20 vezes o valor encontrado pelo método ASTM.

O terceiro método estudado se deve a Carvalho (1989) e consiste em utilizar a velocidade de deformação igual a alcançada por um dos estágios do carregamento convencional. Por exemplo, da curva recalque x tempo mostrada na Figura 49, para a tensão

vertical de 400 kPa, conclui-se que a velocidade de deslocamento vertical do cabeçote a ser empregada deveria ser de 0,003 mm/min, o que representaria 44% do valor determinado pelo método da ASTM. Com base nesses resultados, optou-se por realizar os ensaios com velocidades intermediárias, conforme apresentado na tabela 12.

Tabela 12: Velocidades de deslocamento vertical do cabeçote adotadas nos ensaios CRS em areia siltosa

Velocidade de deslocamento vertical do cabeçote (mm/min)		
CAS_I-1	CAS_I-2	CAS_R-1
0,0625	0,0313	0,0625

5.3.1.2 Velocidade de deformação para a argila siltosa

Novamente, o primeiro método considerado para a determinação da velocidade de deformação do ensaio CRS em argila siltosa foi o da norma americana ASTM D4186/98. A partir do limite de liquidez desse solo (80,8%), pode-se entrar na Tabela 6 e verificar que a velocidade de deslocamento vertical do cabeçote do corpo de prova deveria ser 0,001%/min. No caso de um anel metálico de altura 20 mm, deveria assim ser empregada uma velocidade de deslocamento vertical de 0,0002 mm/min. Para se alcançar o recalque final na amostra indeformada PENARG_I-1, isso levaria a um ensaio com duração de aproximadamente oito dias. Isso representa um intervalo de tempo excessivamente alto para um ensaio de laboratório que prima pela obtenção rápida dos parâmetros de adensamento do solo, ou seja, quase se igualando ao tempo necessário para a realização de ensaio de adensamento convencional.

O segundo método utilizado foi o descrito por Smith e Wahls (1969), que sugere o emprego da equação 2.8. Adotando-se para os parâmetros da equação 2.8: $m = 0,886$, que é a porcentagem remanescente da altura da amostra no momento de maior poro pressão do ensaio PENARG_I-1 (Figura 52), $H_i = 20$ mm, $c_v = 6,32 \times 10^{-4}$ cm²/s (Tabela 15), $C_c = 0,276$ (Tabela 15) e admitindo-se uma razão u_b / σ_v de 30%, obtém-se uma velocidade de deslocamento do

cabeçote igual a 0,011 mm/min. Isso é mais de 50 vezes superior ao valor encontrado pelo método da ASTM.

O terceiro método empregado para determinação da velocidade de deformação na argila siltosa foi o de Armours e Drnevich (1986), que propõem a utilização da equação 2.7. Entrando-se nesta equação com os seguintes parâmetros:

$H_i = 20$ mm, $LL = 80,80$ %, $LP = 34,10$ %, $\square = 44,65$ %, $K_i = 6,32 \times 10^{-4}$ cm/s, $\gamma_a = 1$ g/cm³, $p_{atm} = 1.010,33$ g/cm² e a razão u_b / σ_v igual 30%, obtém-se uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote igual a 21.915,54 mm/min, que é milhares de vezes superior ao valor encontrado pelo método ASTM. O quarto método empregado foi o devido a Carvalho (1989). Utilizando-se da curva de recalque x tempo para tensão vertical de 400 kPa, mostrada na Figura 52, conclui-se que a velocidade de deslocamento vertical do cabeçote a ser empregada deveria ser de 0,00021 mm/min, que é a mesma prevista pelo método da ASTM. Com base nesses resultados, optou-se por realizar os ensaios CRS em argila siltosa, conforme apresentado na Tabela 13. Esses valores foram adotados, partindo do pré-suposto que o adensamento ocorrido ao longo do ensaio convencional deveria durar, a princípio, um dia no ensaio CRS, o que se mostrou bastante satisfatório.

Tabela 13: Velocidades de deslocamento vertical do cabeçote adotadas nos ensaios CRS em argila siltosa

Velocidade de deslocamento vertical do cabeçote (mm/min)			
CARG_I-1	CARG_I-2	CARG_I-3	CARG_R-1
0,0078	0,0156	0,0313	0,0078

5.3.2 Ensaios CRS em areia siltosa

Foram realizados três ensaios CRS em areia siltosa, sendo dois com amostras indeformadas e um com amostra remoldada. As curvas e x σ'_v (esc. log), c_v x σ'_v (esc. log), D

u_b x σ'_v (esc. log) e u_b/σ'_v x σ'_v (esc. log) para esses ensaios estão apresentadas a seguir, nesta mesma ordem.

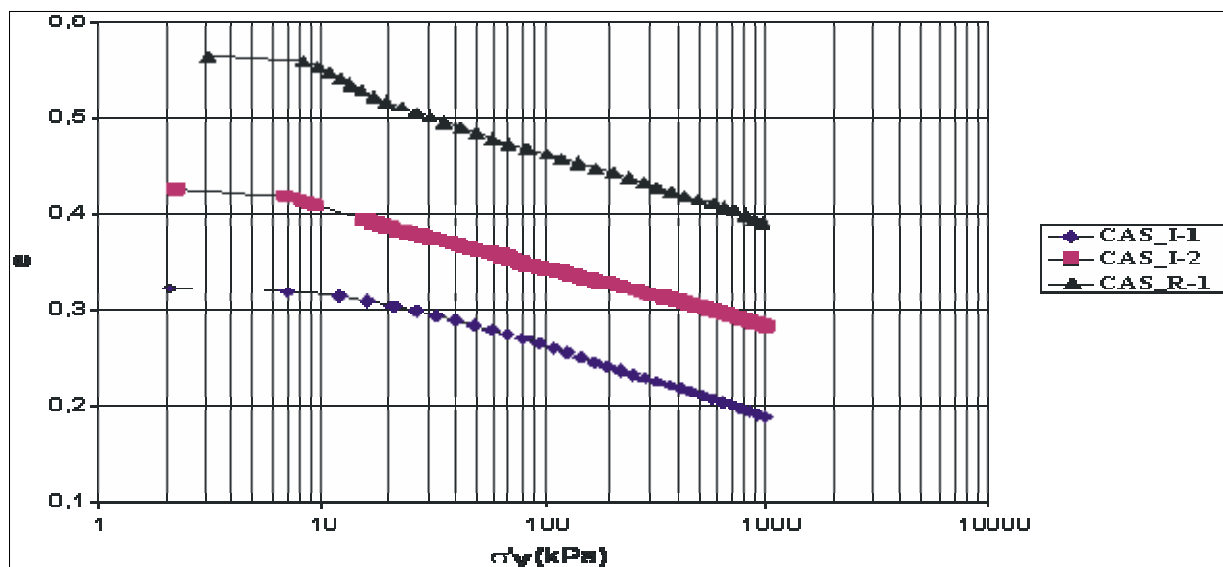


Figura 54: Curvas u_b x σ'_v (esc. log) obtidas no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de areia siltosa CAS_I-1, CAS_I-2, e para amostra remoldada CAS_R-1

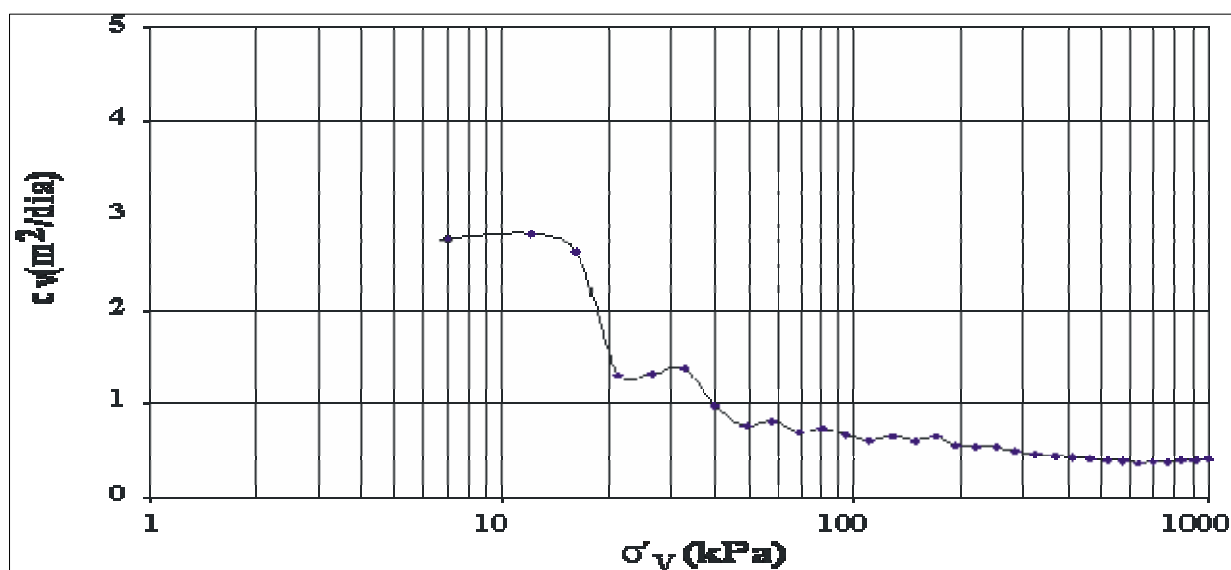


Figura 55: Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min

A diminuição da velocidade de ensaio, conforme esperado, ocasionou a diminuição da pressão gerada na base do corpo de prova causando valores de u_b inferiores a 1 kPa. (Figura 56) Em função deste fato, variações muito pequenas de u_b provocaram variações significativas em c_v .

O emprego de uma amostra remoldada em índice de vazios próximo ao do campo em velocidade de deformação igual a CAS_I-1 mostrou uma diminuição significativa na poro pressão gerada na base do corpo de prova, causando valores de u_b inferiores a 0,50 kPa. A Figura 61 demonstra que o excesso de poro pressão no final do ensaio CAS_R-1 é muito pequena (próxima a 0 kPa) o que causou um aumento significativo no valor de c_v no final desse ensaio, conforme pode ser percebido na Figura 57.

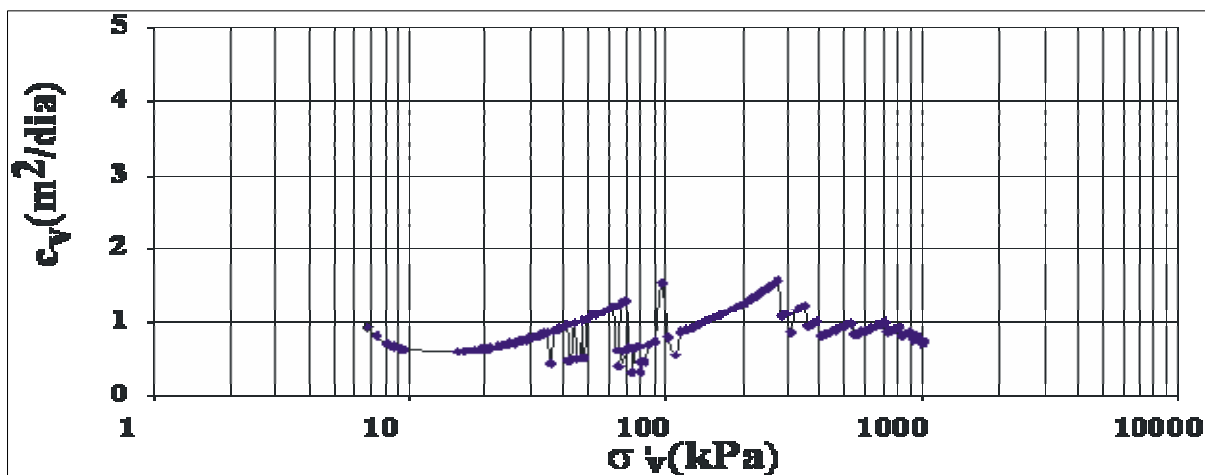


Figura 56: Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-2, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min

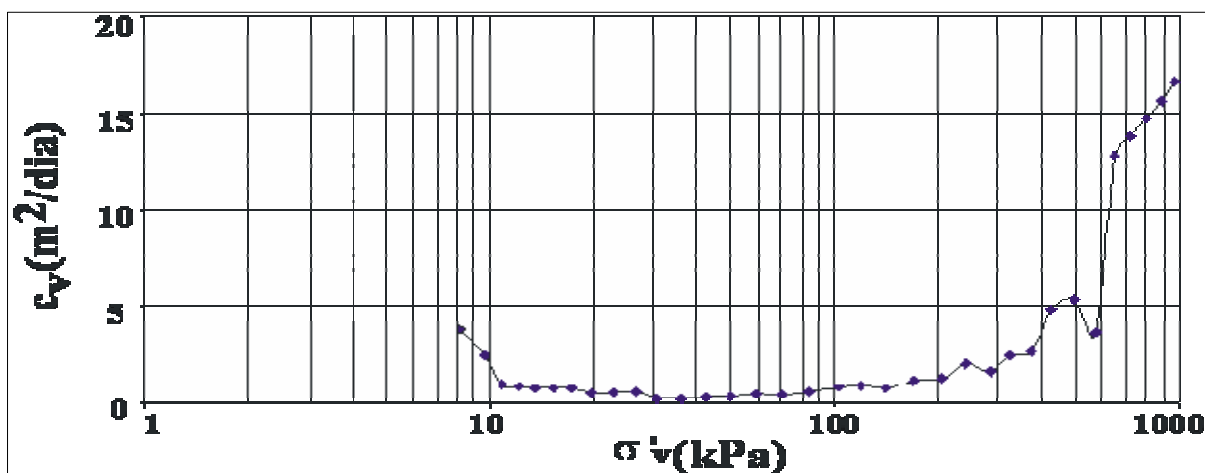


Figura 57: Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de areia siltosa CAS_R-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min

As curvas de D x σ'_v mostram excelente concordância de forma especial entre os ensaios CAS_I-1 e CAR_R-1, cuja velocidade de deformação foi a mesma, mostrando que o solo silto-arenoso utilizado nesta dissertação não apresenta qualquer tipo de estruturação, e como esperado, comparando-se às curvas obtidas dos ensaios CAS_I-1 e CAS_R-1 com a

obtida através do ensaio CAS_I-2 se percebe uniformidade nos valores alcançados. (conforme mostra a Figura 58).

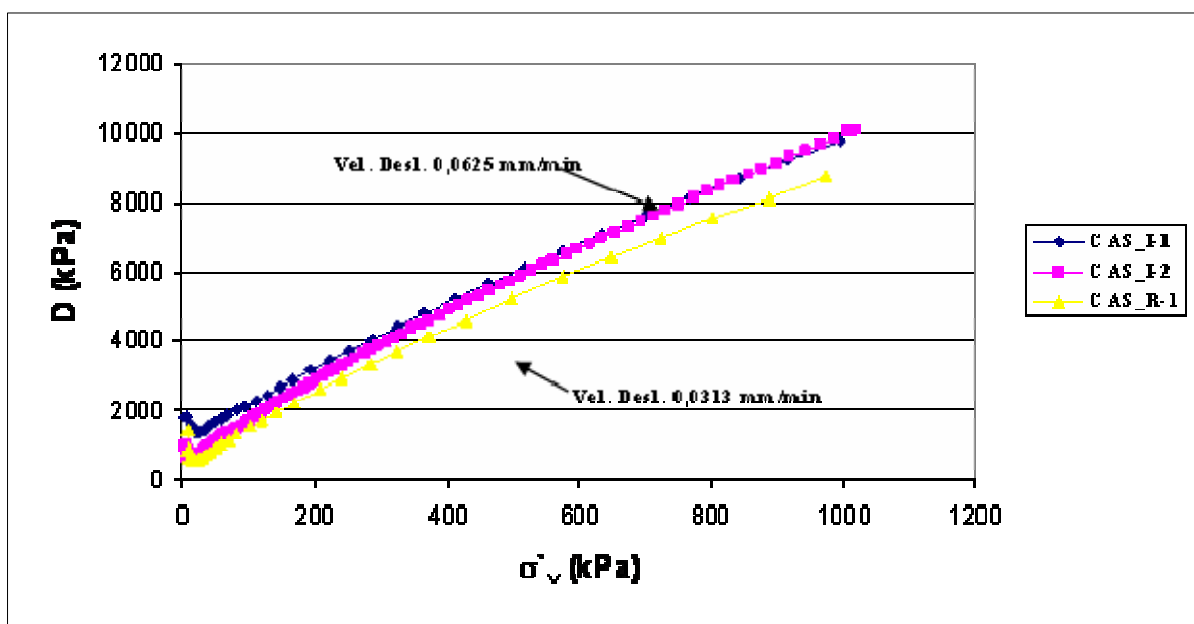


Figura 58: Curvas de $D \times \sigma'_v$ obtidas nos ensaios CRS, para areia siltosa, CAS_I-1, CAS_R-1 com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min e para o ensaio CAS_I-2 com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min

As curvas de $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas nos ensaios CRS (Figuras 59, 60 e 61) se comportam de forma análoga às obtidas nos ensaios PENAS_I-1 e PENAS_I-2, apresentando pequenos valores de excesso de poro pressões na base do corpo de prova, conforme esperado para solos arenosos. Da mesma forma as curvas de $u_b/\sigma'_v \times \sigma'_v$ se mostraram com pequena amplitude, alcançando valores entre 0 e 1%, o que permitiria a elevação da velocidade de deformação da amostra. Isso não foi feito, porque os ensaios CRS na areia siltosa duraram entre 15 minutos e 2h30min, o que tornou um novo aumento de velocidade desnecessário. (Figura 62).

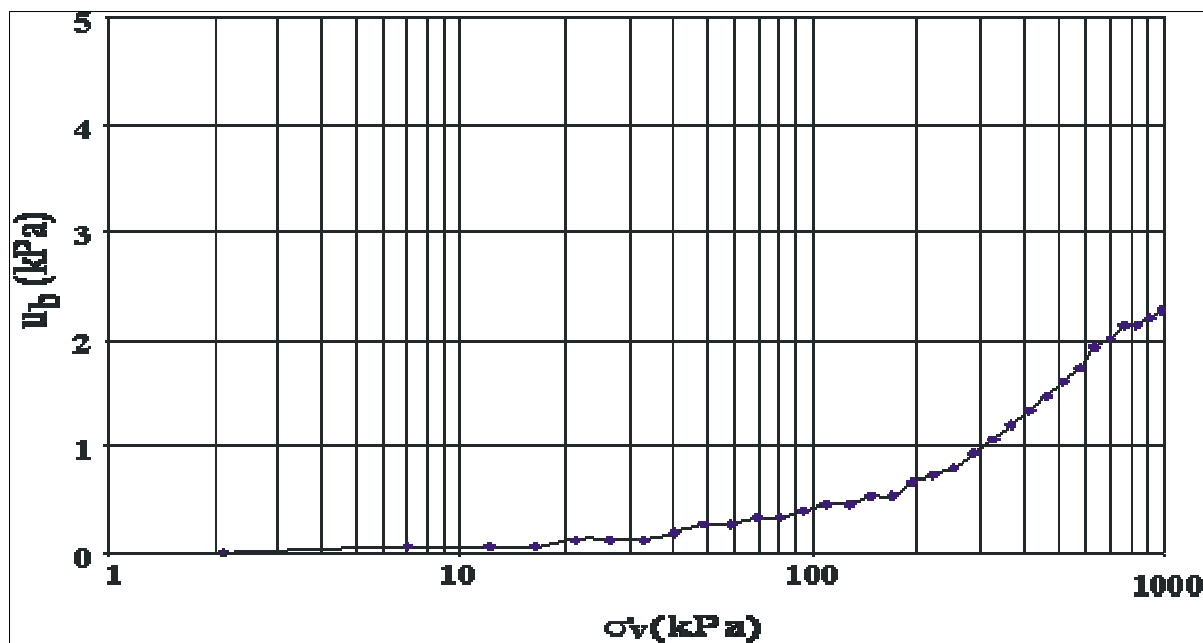


Figura 59: Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min

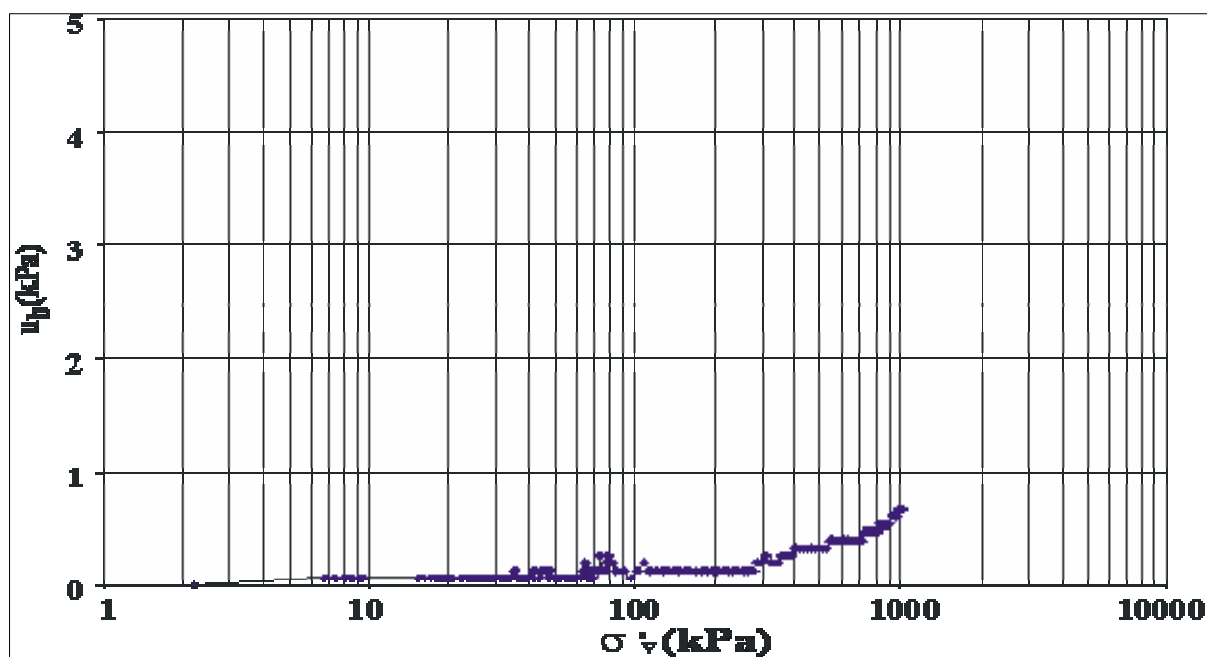


Figura 60: Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de areia siltosa CAS_I-2, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min

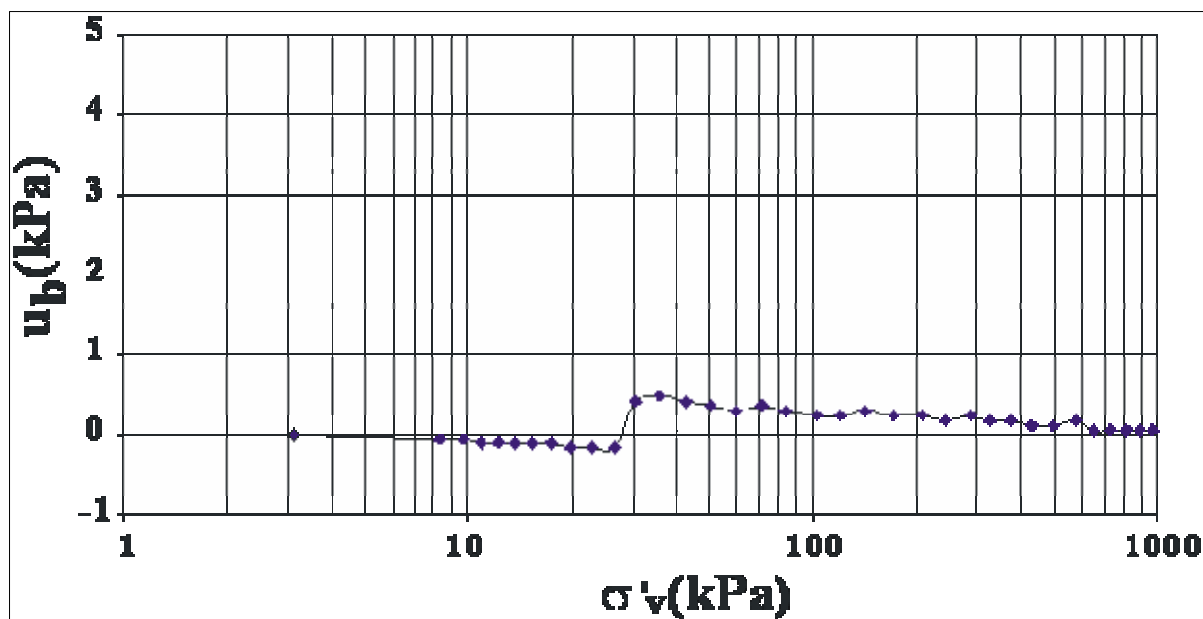


Figura 61: Curva u_b x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de areia siltosa CAS_R-1, com velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0625 mm/min

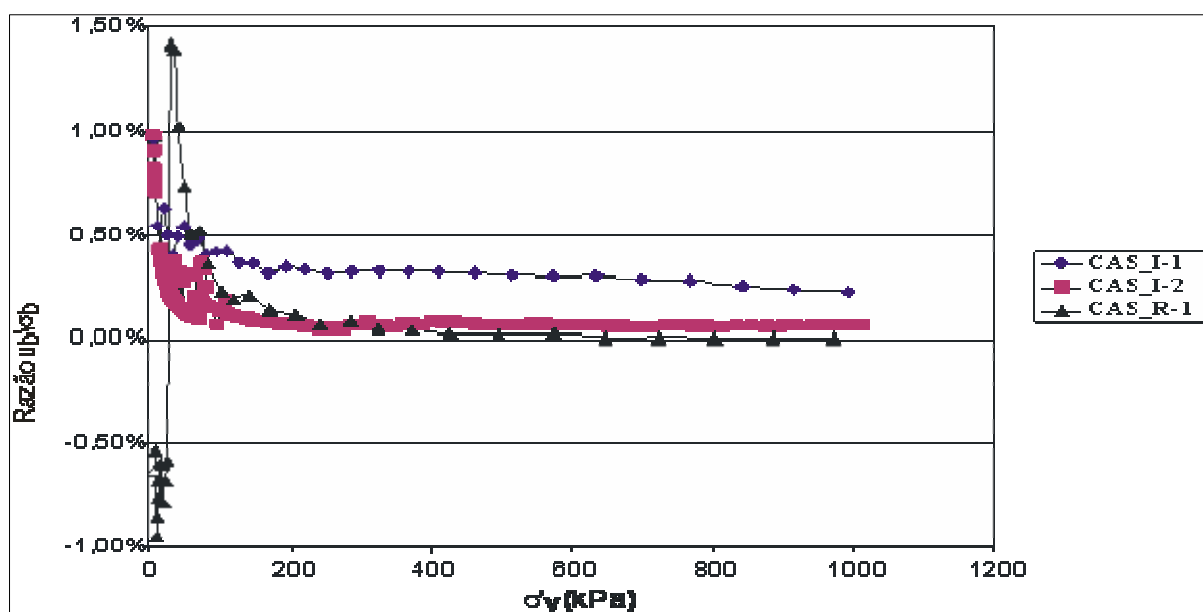


Figura 62: Curvas da razão u_b/σ'_v x σ'_v determinada no ensaio CRS, para a amostras indeformadas de areia siltosa CAS_I-1, e CAS_I-2, e para a amostra remoldada CAS_R-1

5.3.3 Ensaios CRS em argila siltosa

Foram realizados quatro ensaios CRS em argila siltosa, sendo três com amostras indeformadas e um com amostra remoldada. As curvas e x σ'_v (esc. log), c_v x σ'_v (esc. log), D x σ'_v , u_b x σ'_v (esc. log), $\frac{u_b}{\sigma'_v}$ x σ'_v (esc. log) desses ensaios estão apresentadas a seguir, nesta mesma ordem.

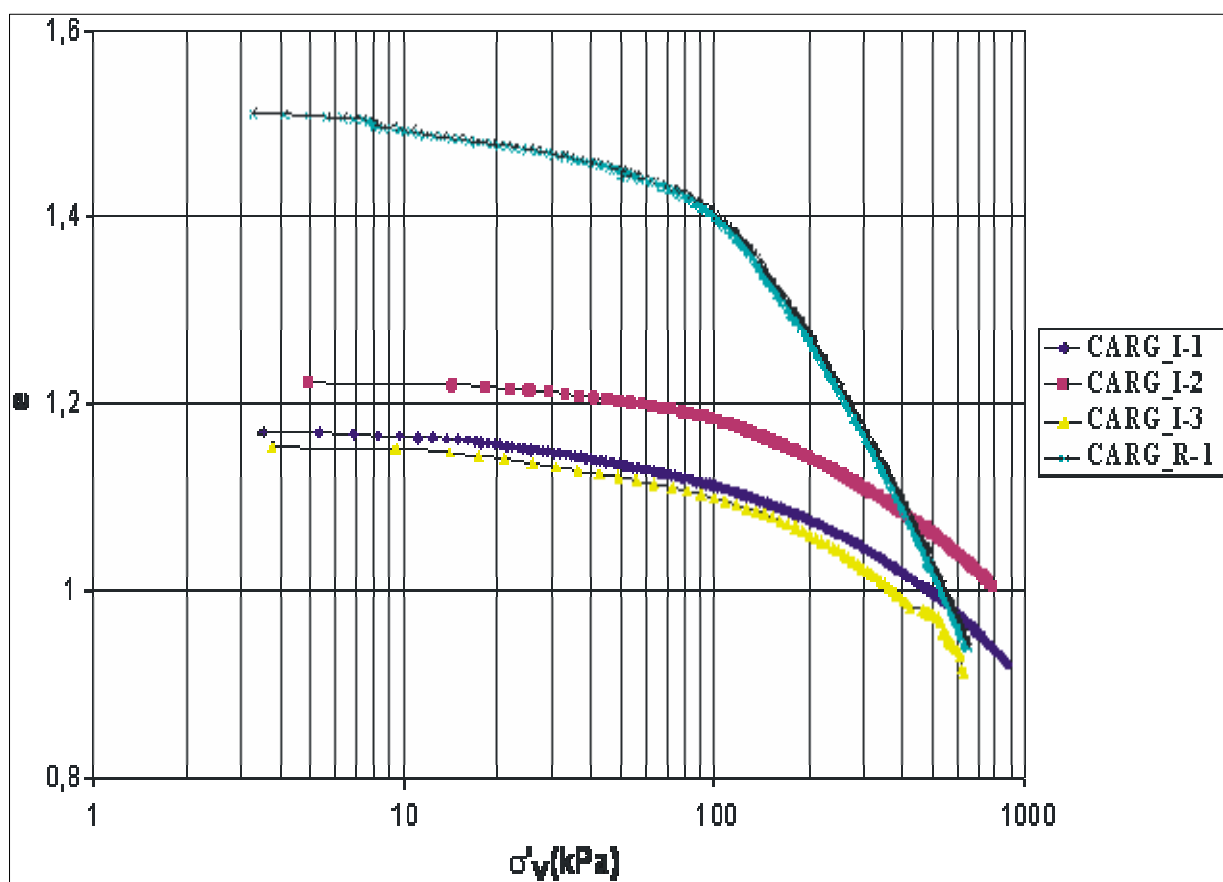


Figura 63: Curvas e x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de argila siltosa CARG_I-1, CARG_I-2 e CARG_I-3 e para a amostra remoldada CARG_R-1

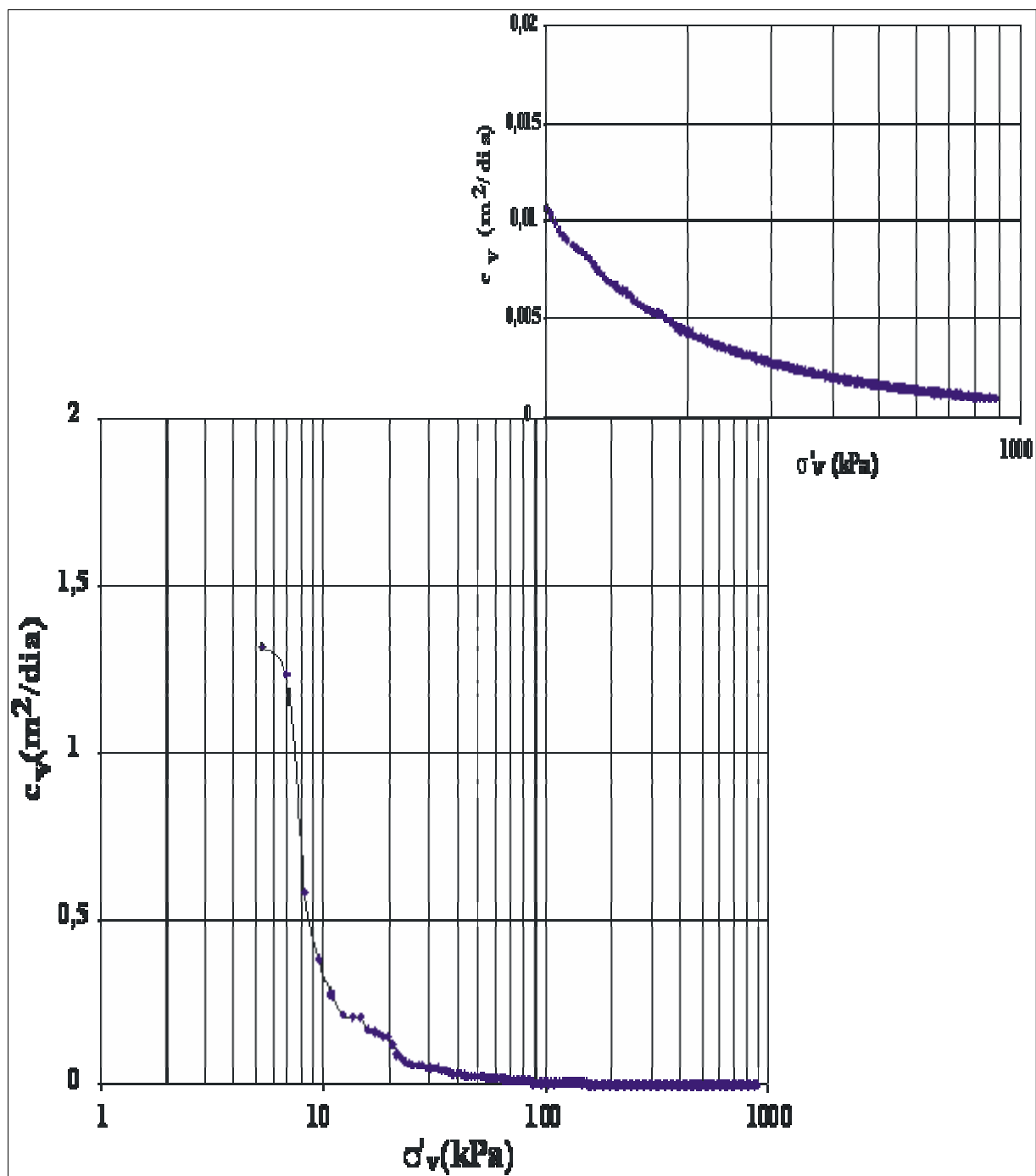


Figura 64: Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-1, extraída a 1,71 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min

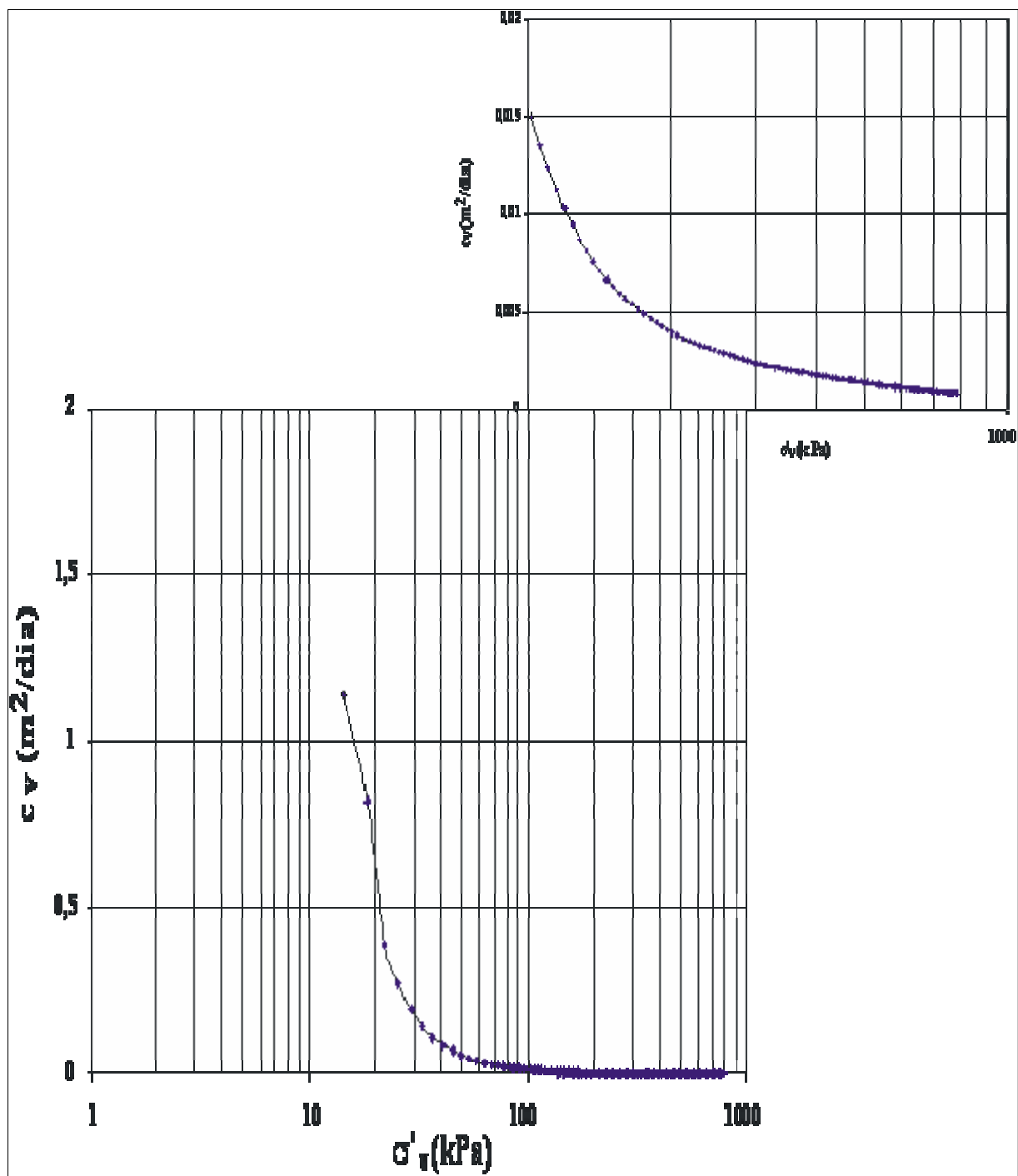


Figura 65: Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-2, extraída a 1,91 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0156 mm/min

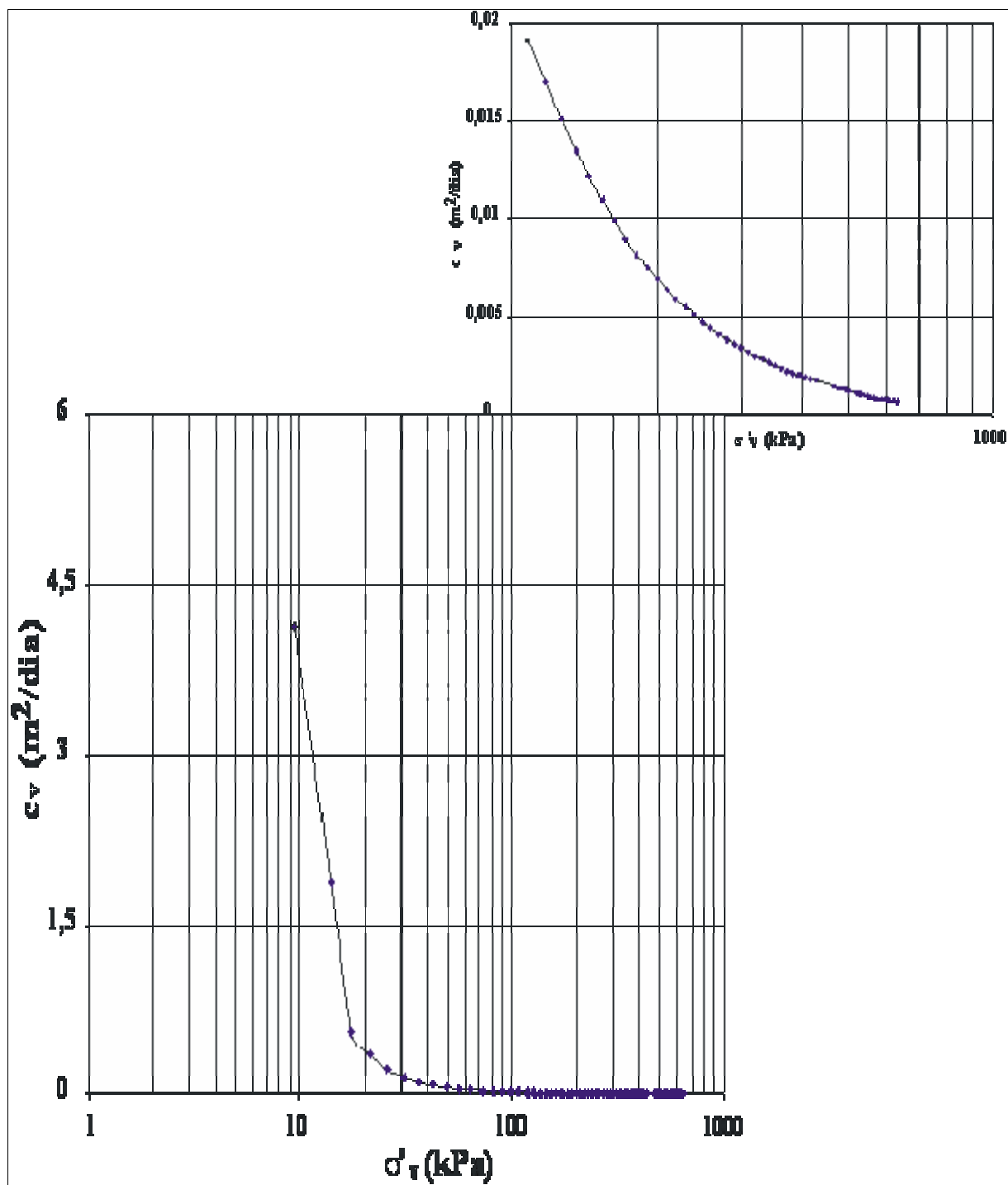


Figura 66: Curva c_v x σ'_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-3, extraída a 1,84 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min

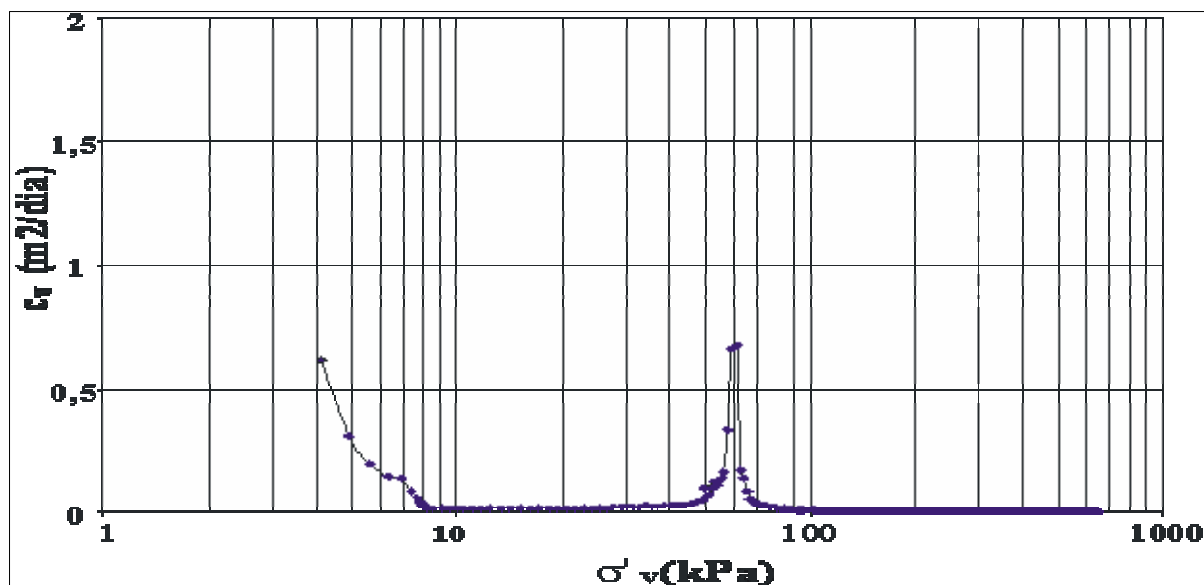


Figura 67: Curva $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log) original obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min

A existência de pico intermediário na curvas de $c_v \times \sigma'_v$ (esc. log), obtidas no ensaio CRS CARG_R-1, deve-se a um comportamento que tem sido observado em solos remoldados (tanto areias como argilas), em que ocorre uma redução da poro pressão medida e depois há um aumento crescente (ver Figura 73). Isso leva a cálculos de c_v (que são incrementais, Equação 2.4) que podem apresentar picos locais.

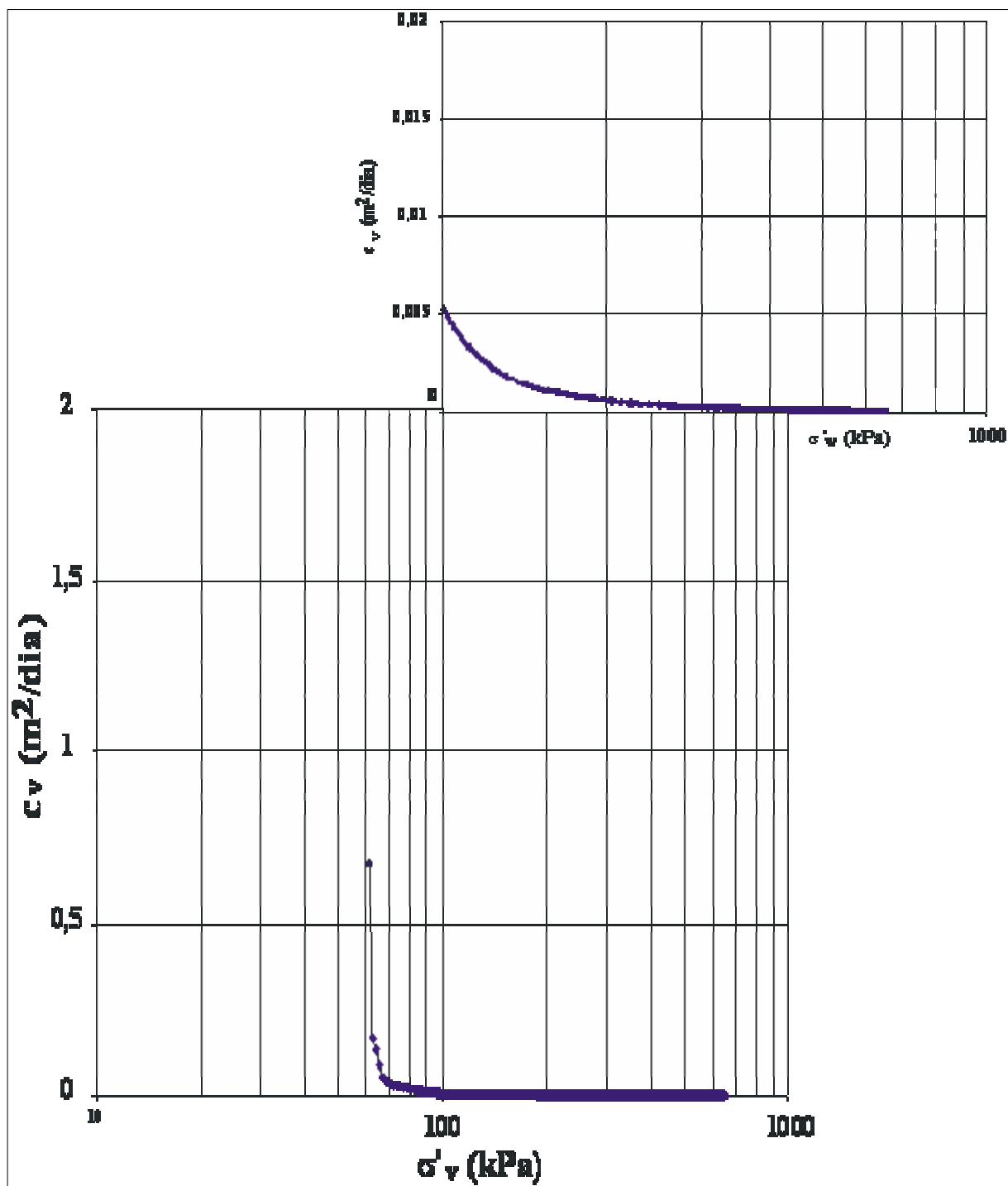


Figura 68: Curva c_v x σ'_v (esc. log) a partir do ponto onde ocorre mudança de sinal na poro pressão gerada, obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min

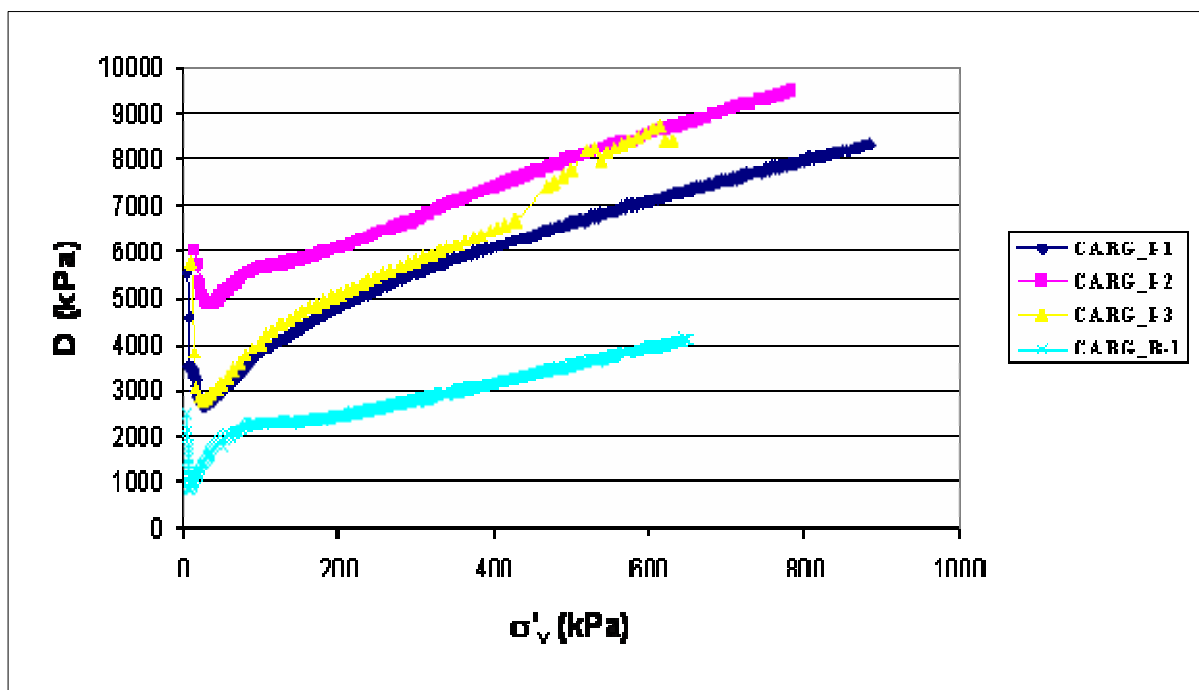


Figura 69: Curvas $D \times \sigma'_v$, obtidas nos ensaios CRS, em argila siltosa, CARG_I-1, CARG_I-2, CARG_I-3, CARG_R-1.

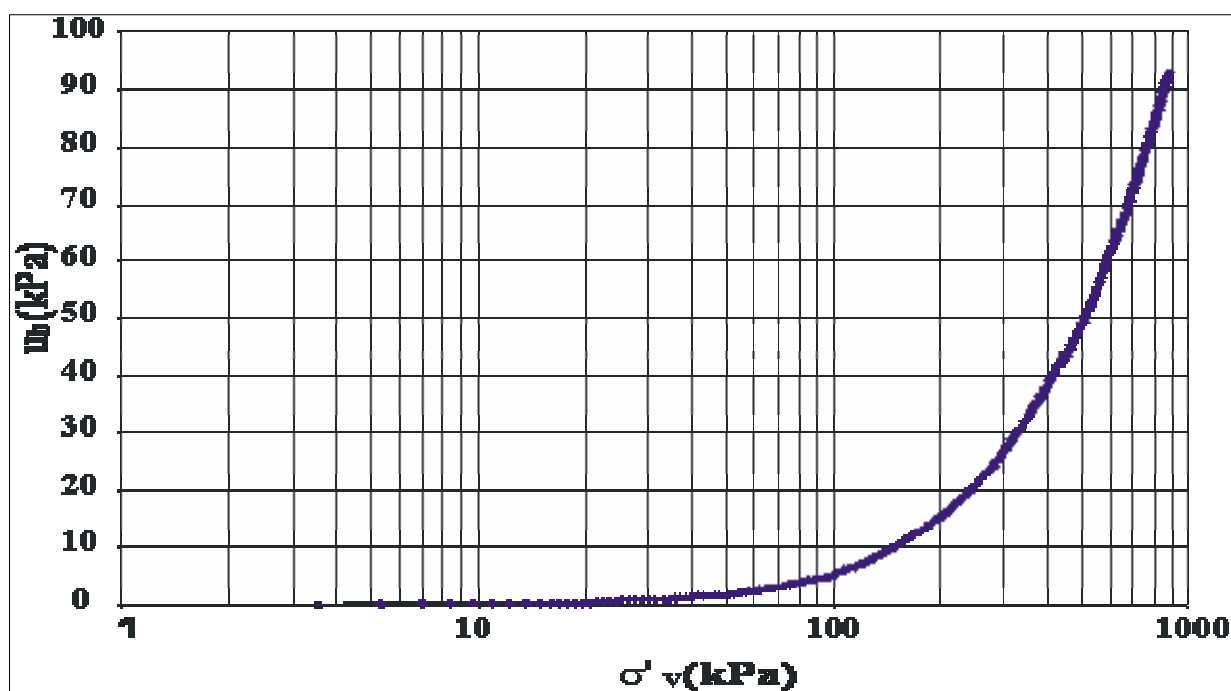


Figura 70: Curva $u_b \times \sigma'_v$ (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-1, extraída a 1,71 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0078 mm/min

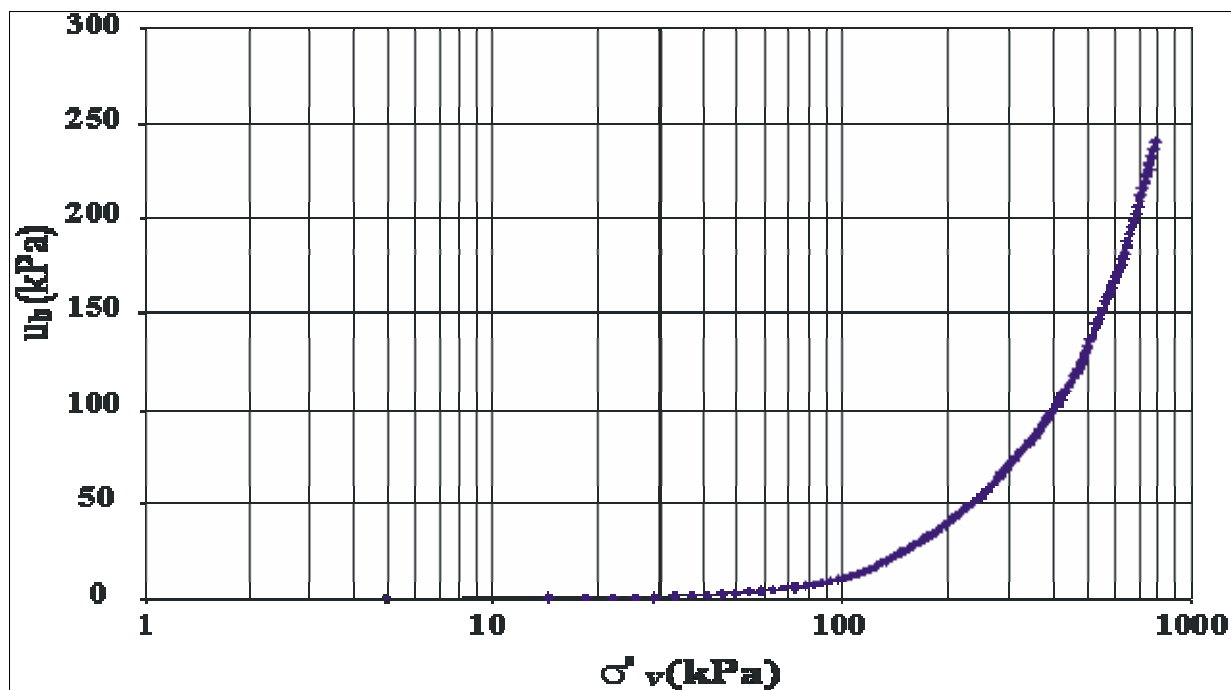


Figura 71: Curva u_b x σ_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-2, extraída a 1,91 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0156 mm/min

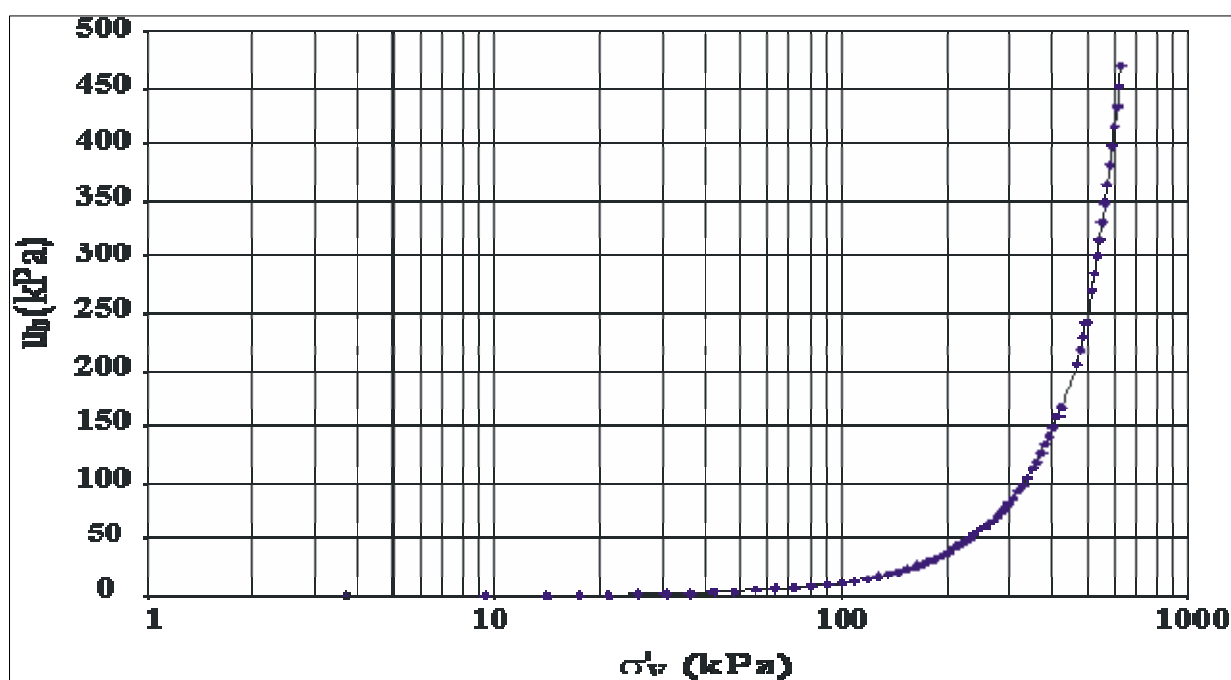


Figura 72: Curva u_b x σ_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra indeformada de argila siltosa CARG_I-3, extraída a 1,84 m de profundidade e submetida a uma velocidade de deslocamento vertical do cabeçote de 0,0313 mm/min

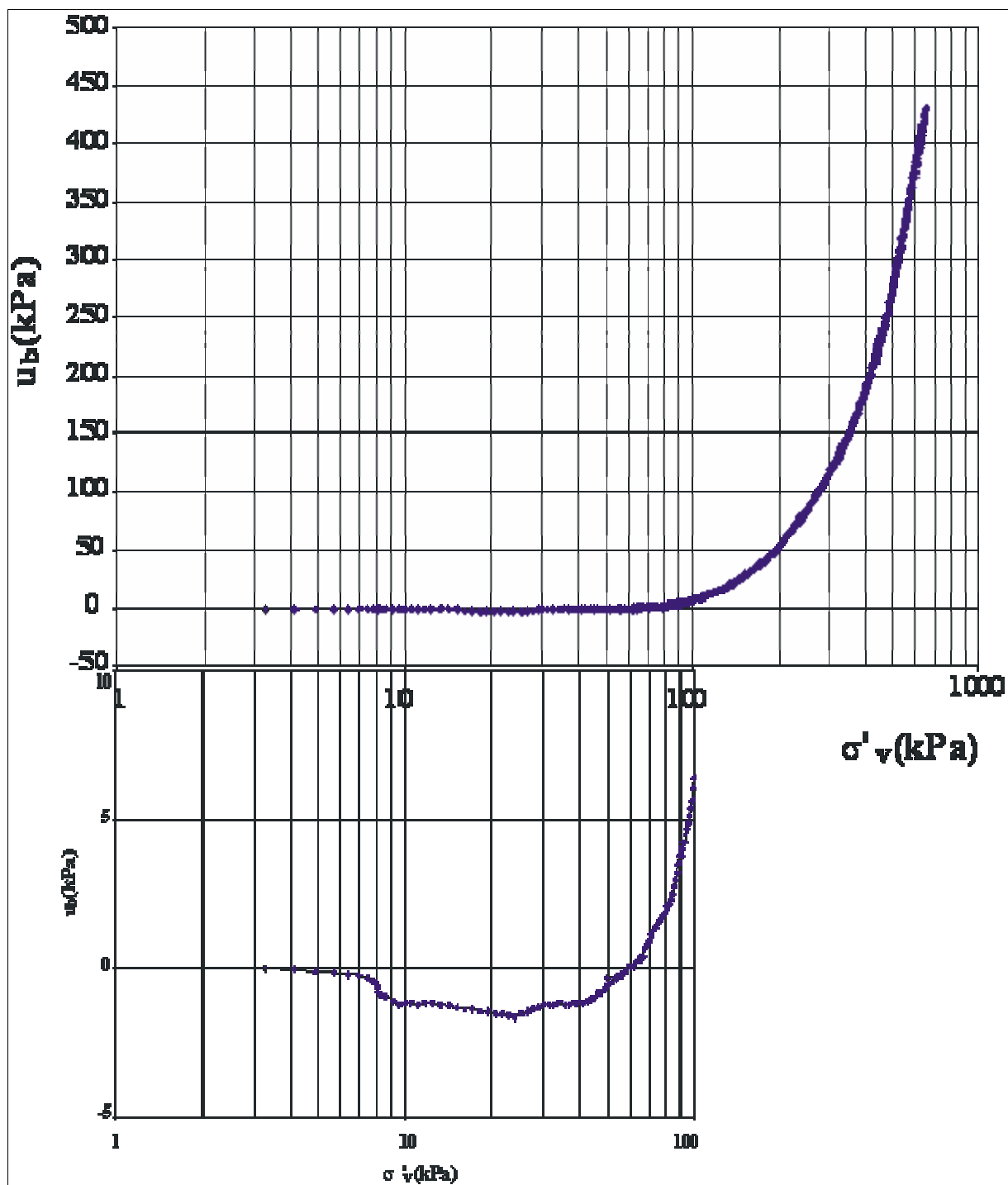


Figura 73: Curva u_b x σ_v (esc. log) obtida no ensaio CRS, para a amostra remoldada de argila siltosa CARG_R-1, ensaiada com uma velocidade de deslocamento vertical do corpo de prova de 0,0078 mm/min

A Figura 74 mostra a razão de poro pressão (u_b/σ_v) obtida dos ensaios realizados, indicando que as velocidades utilizadas foram adequadas para os solos indeformados. O ensaio CARG_I-3 apresentou um valor muito elevado para a razão u_b/σ_v para os padrões internacionais, indicando que a velocidade de deformação adotada para o ensaio fora

excessivamente alta, porém os resultados obtidos neste ensaio se mostraram satisfatórios, assim como o ensaio remoldado (CARG_R-1).

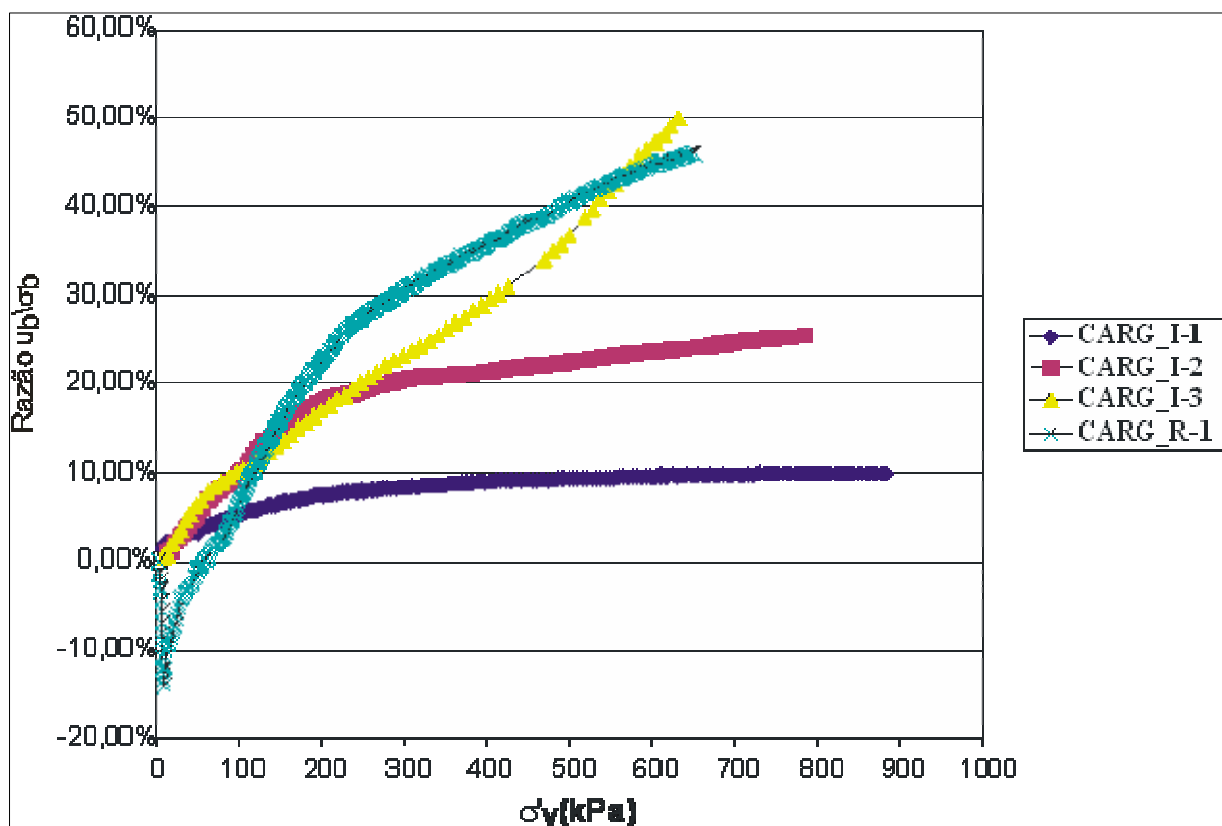


Figura 74: Curvas da razão $u_b/\sigma_v \times \sigma'_v$ determinada no ensaio CRS, para as amostras indeformadas de argila siltosa CARG_I-1, CARG_I-2 e CARG_I-3 e para a amostra remoldada CARG_R-1

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1 Análise dos resultados dos ensaios em areia siltosa

Os resultados alcançados, nesta dissertação, para areia siltosa serão subdivididos em duas seções para sua análise: (i) Análise dos Resultados Obtidos para Areia Siltosa, empregando a Prensa Pneumática e (ii) Análise dos Resultados Obtidos para Areia Siltosa empregando o CRS.

5.4.1.1 Resultados com a Prensa Pneumática

Os ensaios realizados na prensa pneumática desenvolvida, nesta dissertação, apresentaram boa concordância com as curvas de e x σ'_v (esc. log) do ensaio convencional (Figura 75). Nesta figura, percebe-se a influência do índice de vazios inicial da amostra (e_i) através da curva PENAS_I-2, que apresenta um índice de vazios ligeiramente inferior ao das demais amostras e apresenta uma maior rigidez.

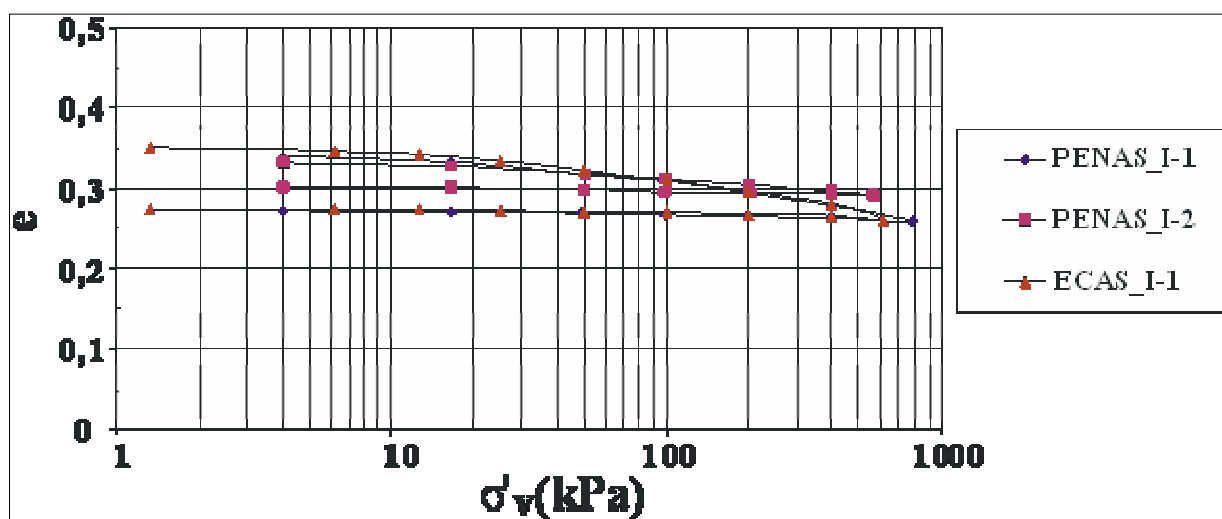


Figura 75: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática e equipamento convencional, em areia siltosa

A limitação da drenagem na face inferior do corpo de prova não mostrou efeito significativo sobre o coeficiente de adensamento (c_v), assim como não houve mudança significativa no valor da tensão de pré-adensamento do solo (Tabela 14).

Tabela 14: Resultados do ensaios realizados em areia siltosa

Amostra	Vel. desloc (mm/min)	$(u_b/\sigma_v)_{(max)}$ (%)	σ'_{vm} (kPa) (Método de Pacheco e Silva)	σ_{vm} (kPa) (Método de Casagrande)	C_C	C_R	c_v (m ² /dia)	
							mínimo	máximo
ECAS_I-1	-	-	13,4	14,3	0,042	0,007	0,02	0,66
ECAS_I-2	-	-	31,7	35,8	0,059	0,003	0,03	0,65
ECAS_R-1	-	-	38,3	44,0	0,030	0,002	0,45	0,50
ECAS_R-2	-	-	-	-	0,113	-	0,39	0,51
PENAS_I-1	-	-	58,7	59,1	0,065	0,009	0,06	0,93
PENAS_I-2	-	-	24,4	26,1	0,023	0,007	0,12	2,00
CAS_I-1	0,0625	0,95	22,7	23,8	0,073	0,009	0,38	2,80
CAS_I-2	0,0313	0,98	6,8	7,0	0,074	0,132	0,32	1,57
CAS_R-1	0,0625	1,42	8,5	8,5	0,083	0,015	0,19	16,59

5.4.1.2 Resultados Obtidos com o CRS

A comunidade científica nacional e internacional jamais utilizou o CRS em solos estritamente arenosos, como o caso deste estudo, por isso a análise desta seção se restringirá à comparação dos resultados obtidos entre os ensaios CRS e incrementais convencionais.

Os ensaios CRS, realizados em areia siltosa mostraram valores de excesso de poro pressão da ordem de 1 kPa, e variação de poro pressão muito próxima da capacidade de resolução do transdutor de pressão empregado. Com isso, as curvas de poro pressão na base (u_b) e coeficiente de adensamento (c_v) se mostraram excessivamente sensíveis a essas variações de poro pressões ocorridas nos ensaios. As Figuras 59 e 60 exemplificam o ocorrido.

Os resultados obtidos comprovaram que, para esses solos arenosos, a velocidade de deformação imposta ao corpo de prova não provocou excesso de poro pressão suficiente para impedir uma boa concordância entre os resultados obtidos por meio do CRS e os ensaios incrementais convencionais.

As curvas de e x σ'_v (esc. log) se mostraram bastante sensíveis ao teor de umidade natural da amostra, bem como ao tamanho da amostra coletada em campo. Na Figura 76, são

confrontados os ensaios CRS realizados a partir de amostras indeformadas do solo, com o ensaio ECAS_I-1 realizado com amostra indeformada retirada em campo com anel de pequeno diâmetro ($\square \approx 50$ mm). As diferenças no índice de vazios iniciais devem-se:

- Ensaio CAS_I-1 o índice de vazios inicial da amostra é menor do que a do ensaio incremental (ECAS_I-1). Isso pode ter sido causado pela perda da umidade natural do solo, devido ao tempo decorrido entre um e outro ensaio (7 meses) ou por variabilidade natural do solo em campo;
- Ensaio CAS_I-2 o índice de vazios inicial da amostra está muito acima do ensaio incremental ECAS_I-1. Primeiramente a amostra foi retirada a partir dos anéis de maior diâmetro ($\square \approx 100$ mm), que apresentavam índice de vazios inicial após coleta de amostras igual a 0,52 ($e_i = 0,52$). Com o tempo transcorrido entre o ensaio e a data de coleta (8 meses), houve uma perda no teor de umidade natural da amostra o que levou a uma diminuição no índice de vazios da mesma, aproximando o valor do encontrado no ensaio incremental.

A Figura 76 mostra uma boa concordância entre as curvas $e/e_i \times \sigma'_v$ (esc. log), quando mantido o mesmo índice de vazios e a importância do índice de vazios iniciais na deformabilidade de areias.

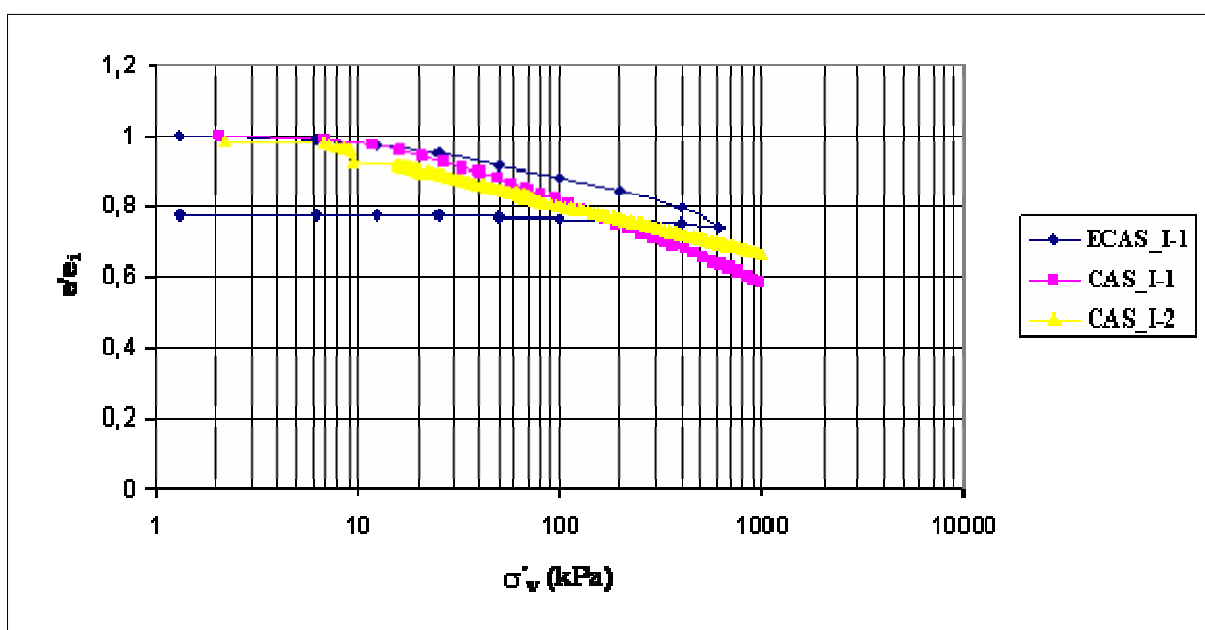


Figura 76: Curvas de $e \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando equipamento convencional e ensaio contínuo, utilizando equipamento CRS para as amostras indeformadas de areia siltosa

A Figura 77 traz as curvas de $D \times \sigma'_v$ para os ensaios CRS realizados. As curvas mostraram boa concordância, demonstrando a qualidade e a eficácia do equipamento desenvolvido.

A tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}), independentemente do método empregado, apresentou uma ordem de grandeza menor nos ensaios CRS em relação aos valores obtidos para os ensaios incrementais convencionais, o que concorda com a tendência apresentada por alguns autores [Sheahan e Watters (1996), Alborta (1997)], na qual a tensão de pré-adensamento nos ensaios CRS é menor do que as dos ensaios convencionais. Entretanto, discorda da tendência defendida por Baptista (1998) e Kassin e Clarke (1999), indo principalmente contra a teoria defendida por Leroueil (1996) que afirma que a tensão de pré-adensamento em ensaios CRS sempre é da ordem de 1,15 a 1,40 a encontrada em ensaios incrementais convencionais.

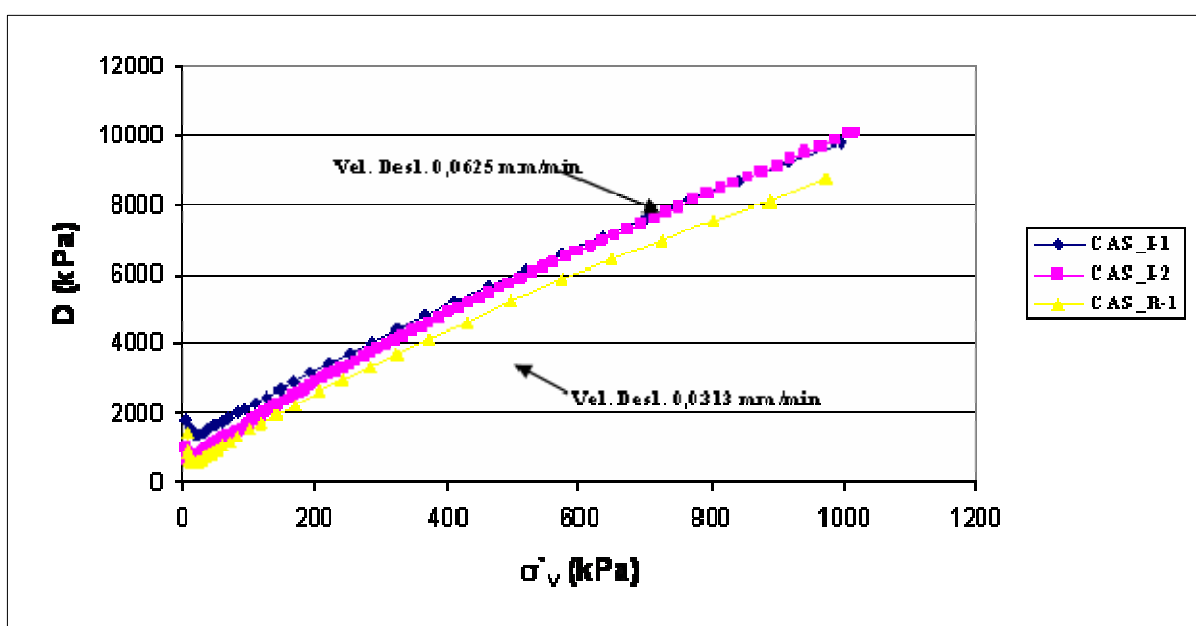


Figura 77: Comportamento das curvas de $D \times \sigma'_v$ (esc. log) obtidas com ensaios CRS, para diferentes velocidades, em areia siltosa.

5.4.2 Análise dos resultados dos ensaios em argila siltosa

Os resultados alcançados nesta dissertação para argila siltosa, serão subdivididos em duas seções para sua análise: (i) Análise dos Resultados Obtidos, empregando a Prensa Pneumática e (ii) Análise dos Resultados empregando o CRS.

5.4.2.1 Resultados com a Prensa Pneumática

A Figura 78 mostra os resultados obtidos nos ensaios ECARG_I-1 e PENARG_I-1 indicando uma queda de rigidez no ensaio PENARG_I-1. Ao analisar as razões para esse comportamento, verificou-se que a posição de moldagem dentro do tubo amostrador era bem diferente para os dois ensaios (Tabela 10). Como as amostras foram retiradas no limite da crosta endurecida, as amostras extraídas em cotas inferiores a 1,60m de profundidade mostravam mudança de cor de cinza escuro para cinza claro e perceptível mudança de consistência na moldagem.

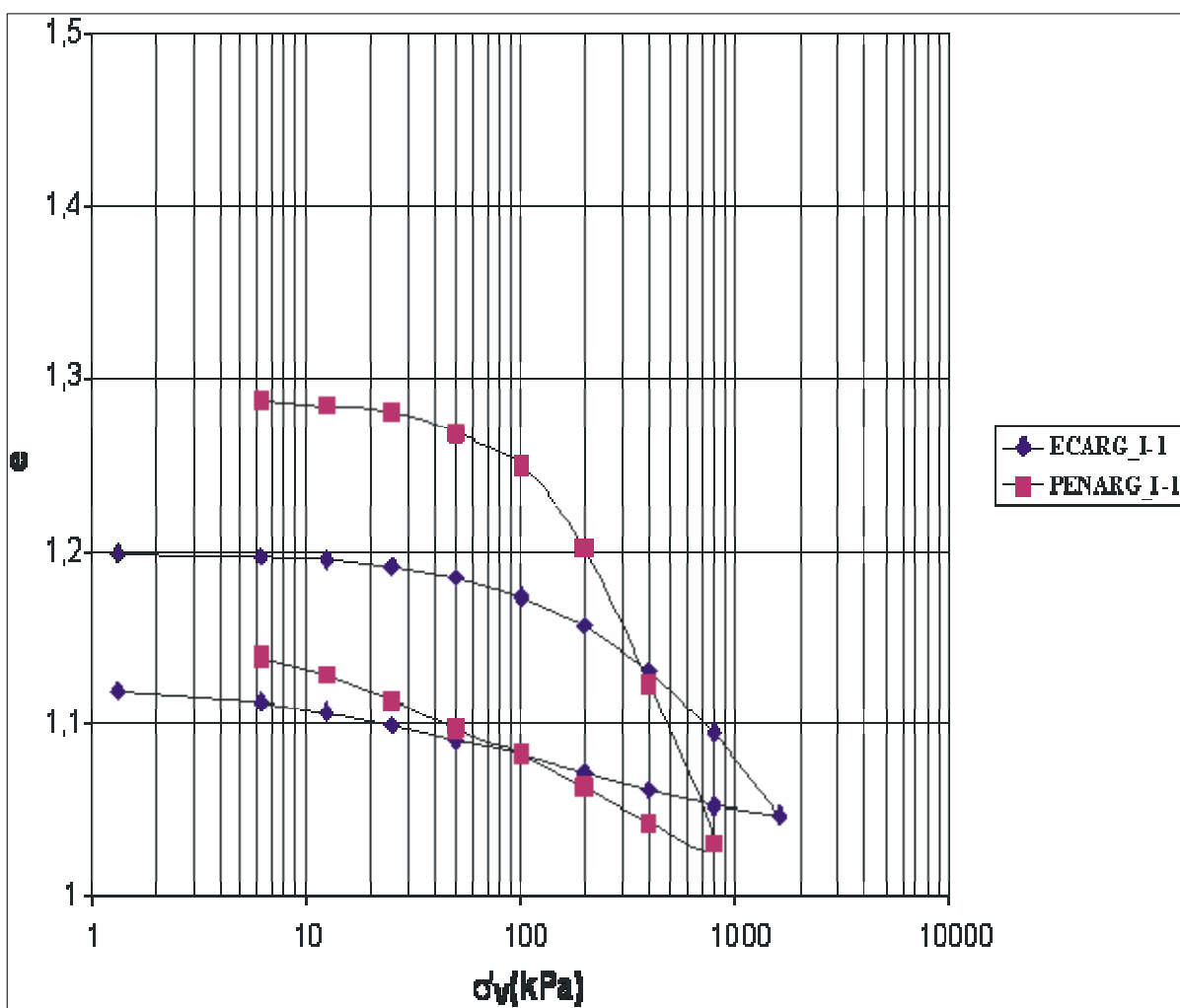


Figura 78: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS instalada em uma prensa pneumática e utilizando o equipamento convencional em argila siltosa indeformada

A Figura 79 mostra uma comparação entre os resultados dos ensaios na argila no estado natural e remoldada. Esses ensaios mostram uma pequena diferença de comportamento entre as duas condições, indicando que a estrutura do solo é pouco presente.

A saturação do corpo de prova atingiu 98% para o ensaio realizado na prensa pneumática, mantendo-se o corpo de prova na fase de saturação durante 24 horas. A limitação da drenagem na face inferior da amostra apresentou um efeito significativo sobre o coeficiente de adensamento (c_v), como esperado pela teoria, diminuindo seu valor (Tabela 15). Em relação à tensão de pré-adensamento do solo (Tabelas 15), pelos dois tipos de ensaios foi possível chegar à mesma ordem de grandeza, com boa aproximação.

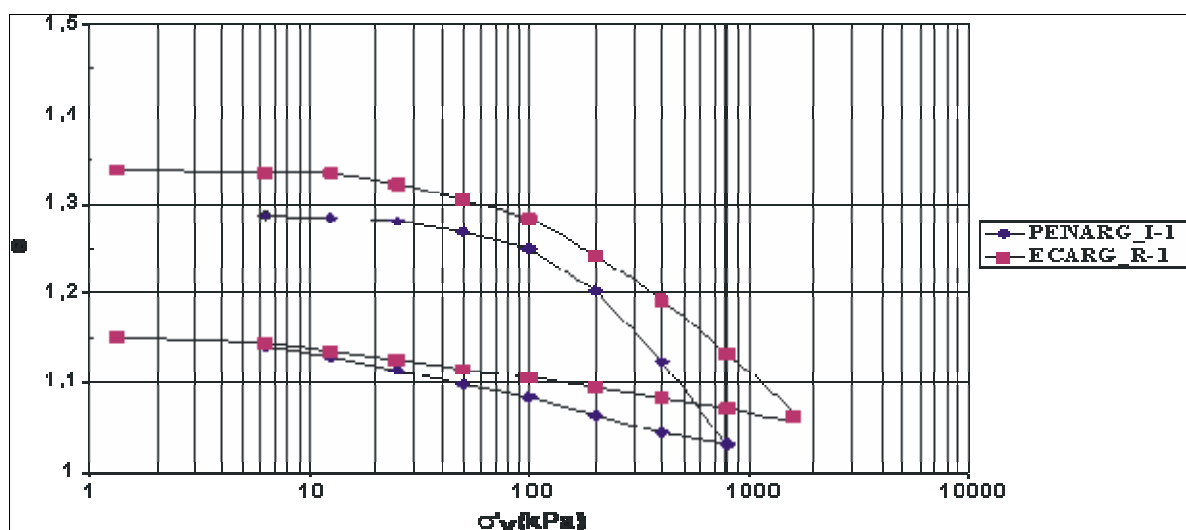


Figura 79: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas em ensaios de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS e utilizando o equipamento convencional em argila siltosa indeformada e remoldada

Tabela 15: Resultados dos ensaios realizados em argila siltosa

Amostra	Vel. desloc (mm/min)	$(u_b/\sigma_v)_{(max)}$ (%)	σ'_{vm} (kPa) (Método de Pacheco e Silva)	σ'_{vm} (kPa) (Método de Casagrande)	C_C	C_R	c_v (m ² /dia)	
							mínimo	máximo
ECARG_I-1	-	-	256,2	262,5	0,147	0,005	$6,95 \times 10^{-3}$	0,20
ECARG_I-2	-	-	161,5	169,2	0,152	0,004	$3,74 \times 10^{-3}$	0,33
ECARG_R-1	-	-	142,9	151,8	0,214	0,003	$8,43 \times 10^{-2}$	0,37
PENARG_I-1	-	-	143,2	173,1	0,276	0,008	$6,26 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-2}$
CARG_I-1	0,0078	9,89	178,4	183,8	0,270	0,007	$1,02 \times 10^{-3}$	1,31
CARG_I-2	0,0156	25,44	186,9	187,5	0,267	0,008	$8,18 \times 10^{-4}$	1,14
CARG_I-3	0,0313	49,89	197,3	218,2	0,357	0,012	$5,76 \times 10^{-4}$	4,14
CARG_R-1	0,0078	46,05	145,0	152,5	0,651	0,056	$6,74 \times 10^{-5}$	0,67

OBS: Para os ensaios CRS os mínimos de c_v são encontrados para valores de σ'_v considerados altos (a partir de 100 kPa), já os máximos são encontrados para valores de σ'_v considerados baixos (abaixo de 100 kPa)

5.4.2.2 Resultados Obtidos com o CRS

A Figura 80 obtida através de ensaios CRS, realizados em argila siltosa, mostra valores de excesso de poro pressão gerados na base do corpo de prova. Esses valores são bem superiores aos alcançados nos ensaios realizados em areia siltosa e demonstraram uma proporcionalidade entre a poro pressão gerada e a velocidade de deformação empregada para o ensaio.

A Figura 81 traz as curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas através do ensaio CRS contínuo e a curva de e x σ'_v (esc. log) obtida do ensaio PENAR_I-1. A comparação dos resultados com os obtidos no ensaio em prensa pneumática incrementais se deve à mudança das características de adensamento da argila siltosa a partir da cota 1,60 m. Os resultados encontrados demonstram boa concordância entre os ensaios CRS e o ensaio PENAR_I-1.

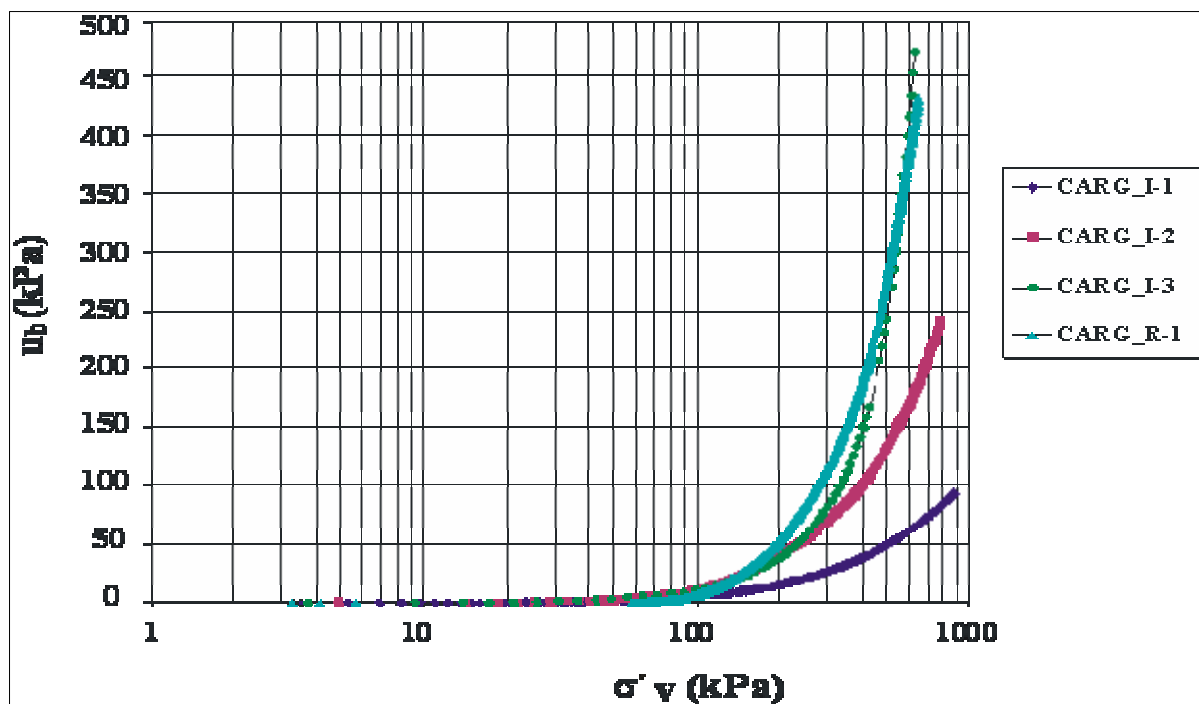


Figura 80: Curvas de u_b x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaios CRS em argila siltosa indeformada

Devido ao elevado índice de vazios inicial (e_i) da amostra remoldada, os resultados foram comparados com a curva de índice de vazios, apresentada no relatório de ensaios PPGEC/UFRGS (1994), para a profundidade de 5,50 m. As curvas são similares e apresentam grande semelhança no trecho de compressão virgem da reta. (Figura 82).

A Figura 83 traz as curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas, através dos ensaios CRS em amostras indeformadas, realizados nesta dissertação. Pela figura é possível se denotar a baixa dispersão apresentada pelo equipamento desenvolvido e a grande semelhança entre os resultados obtidos para os ensaios CARG_I-1, CARG_I-2 e CARG_I-3, comprovando a boa qualidade do equipamento desenvolvido e sua precisão na determinação dos parâmetros geotécnicos do solo.

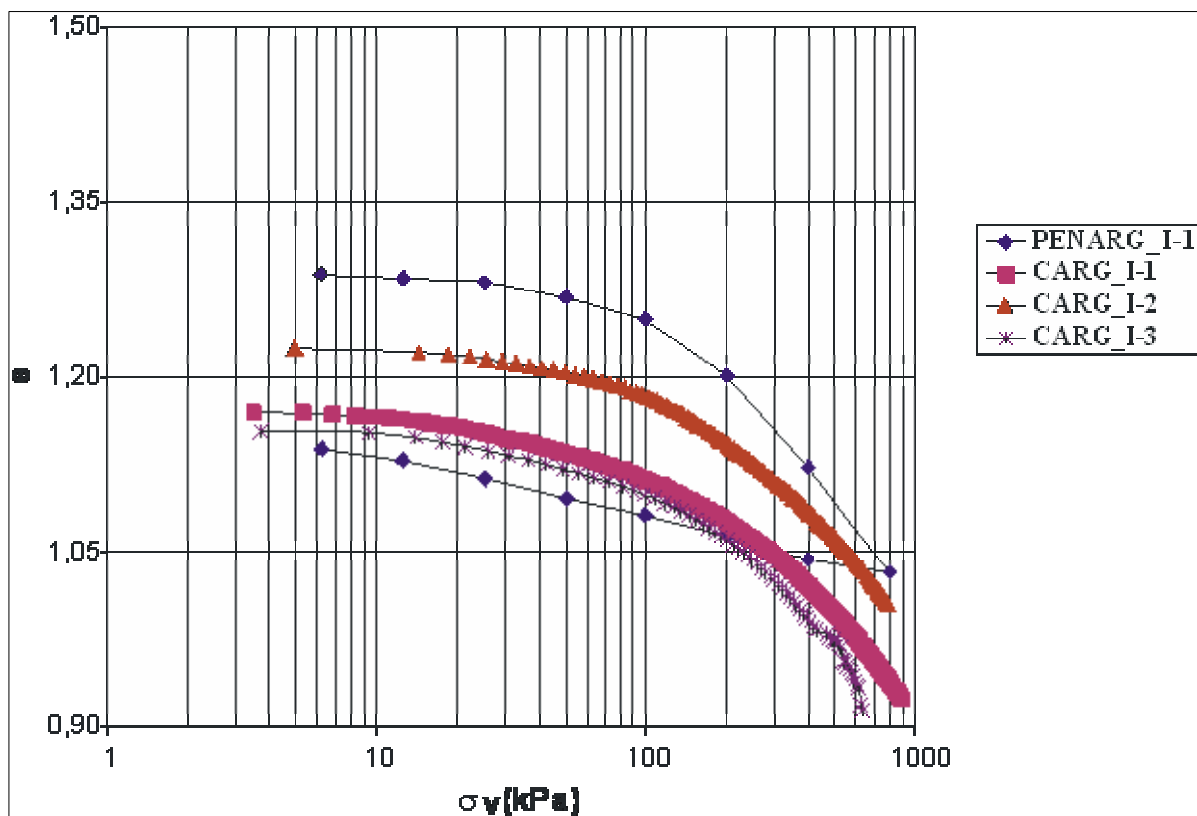


Figura 81: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaio de adensamento incremental, utilizando uma câmara CRS e ensaios contínuos, utilizando o equipamento CRS(CARG_I-1, CARG_I-2, CARG_I-3) em argila siltosa indeformada

Os resultados alcançados neste estudo apresentam boa similaridade com pesquisas desenvolvidas anteriormente na região do Aeroporto Internacional Salgado Filho. A Figura 84 traz a variação do índice de vazios com a profundidade, utilizando dados do relatório de ensaios PPGEC/UFRGS (1994) para demonstrar a variação entre o índice de vazios encontrado para a crosta pré-adensada e para o resto do perfil do terreno. Essa figura confirma o que Soares (1997) encontrou na CEASA, região próxima ao Aeroporto Internacional Salgado Filho. Naquele ponto, o índice de vazios aumentava até o terceiro metro de profundidade, mas ao ultrapassar essa barreira, voltava a cair.

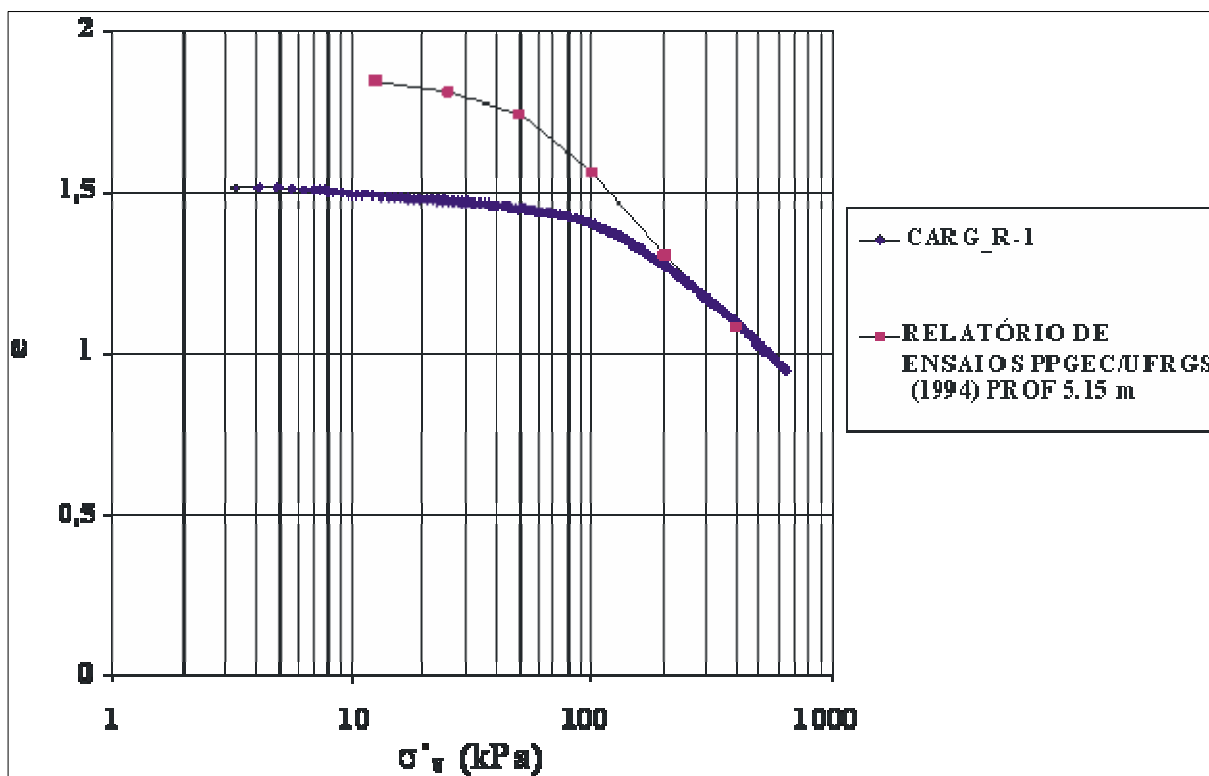


Figura 82: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaio incremental através do relatório de ensaios PPGEC/UFRGS (1994) e ensaio contínuo realizado no presente estudo, utilizando o equipamento CRS (CARG_R-1) em argila siltosa indeformada

A Figura 85 mostra as curvas de D x σ'_v dos ensaios CRS realizados, e os resultados se mostraram, de forma idêntica ao encontrado para areias siltosas, boa concordância entre os diversos ensaios realizados.

A tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) apresentou um menor valor nos ensaios CRS em relação aos valores obtidos para os ensaios incrementais convencionais, independentemente do método empregado. Isso concorda com a tendência apresentada por autores como Sheahan e Watters (1996) e Alborta (1997). Entretanto, Baptista (1998) e Kassin e Clarke (1999) afirmam o contrário, e Leroueil (1996) refere que a tensão de pré-adensamento em ensaios CRS sempre é da ordem de 1,15 a 1,40 da encontrada em ensaios incrementais convencionais. Porém, os valores da tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) apresentaram resultados similares aos obtidos em pesquisas desenvolvidas anteriormente na região do Aeroporto Internacional Salgado Filho. A Figura 86 apresenta a variação da tensão vertical efetiva (σ'_{vo}) com a profundidade e a variação da tensão de pré-adensamento encontrada para a crosta pré-adensada e até 5,50 m do terreno (relatório de ensaios PPGEC/UFRGS, 1994). Essa figura

confirma o que Soares (1997) encontrou para o CEASA, onde a tensão de pré-adensamento (σ'_{vm}) decresce de forma potencial com o aumento da profundidade.

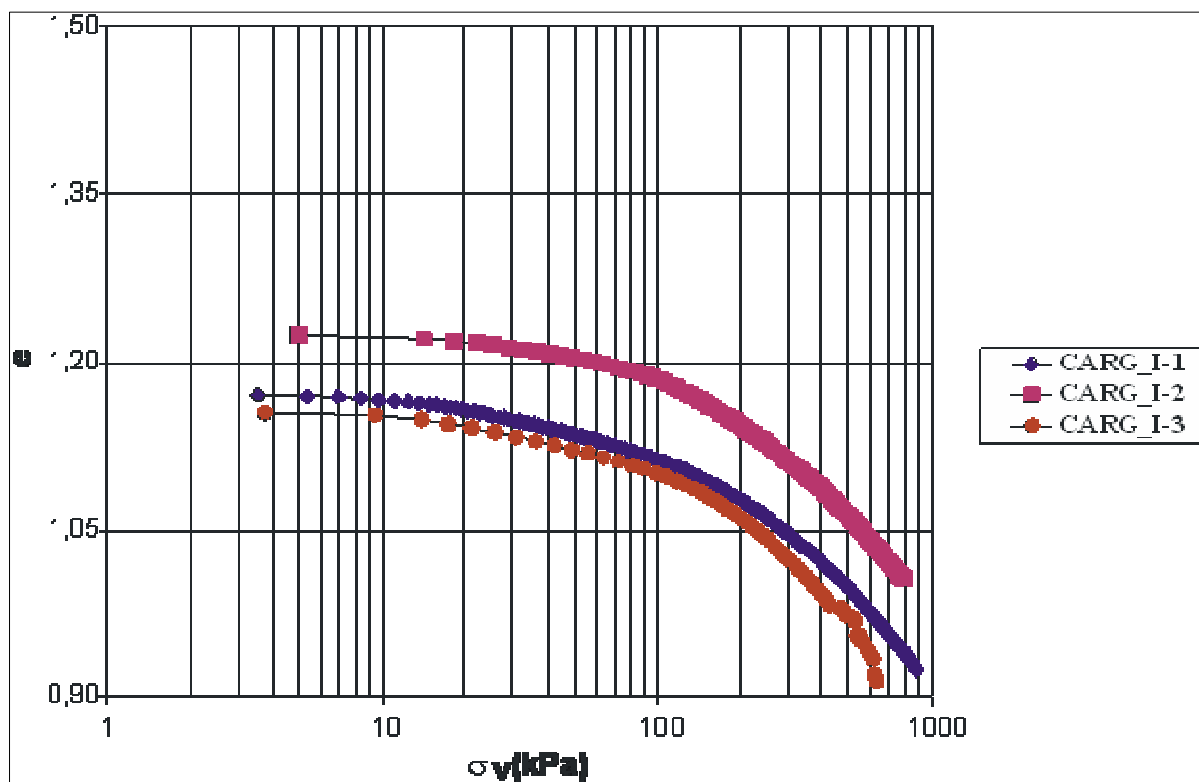


Figura 83: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaio contínuo, utilizando o equipamento CRS desenvolvido) em argila siltosa indeformada

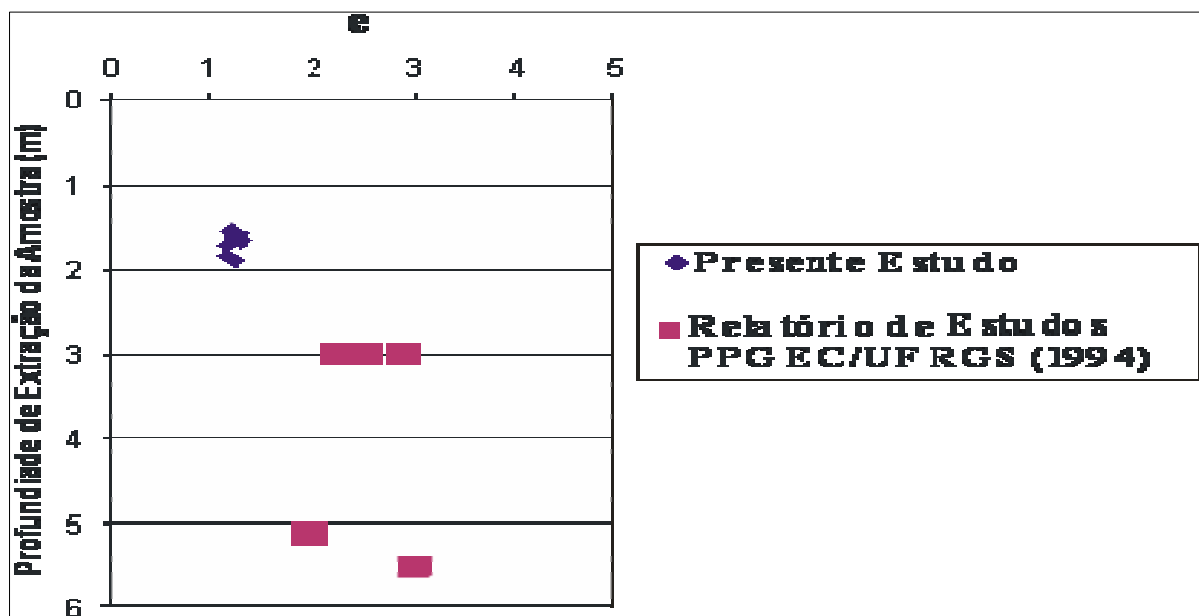


Figura 84: Curvas de e x profundidade de extração da amostra obtidas nos ensaios realizados e no relatório de ensaios PPGE/UFRRGS

Fonte: PPGE/UFRRGS, 1994

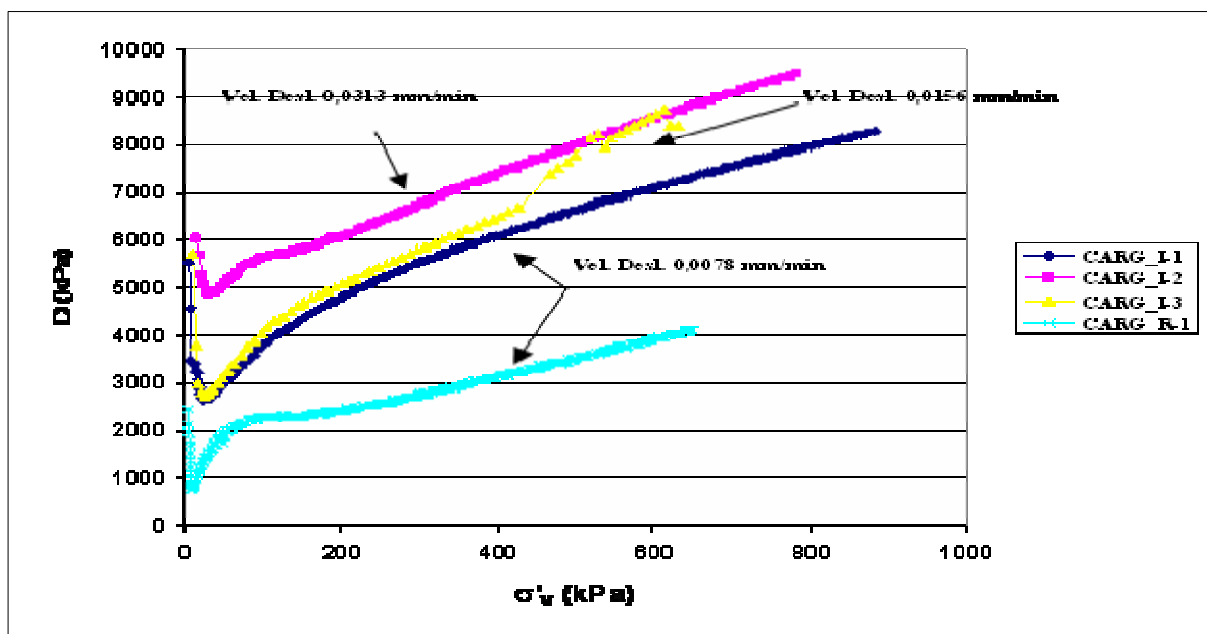


Figura 85: Comportamento das curvas de $D \times \sigma'_v$ (esc. log), obtidas com ensaios CRS para diferentes velocidades, em areia siltosa

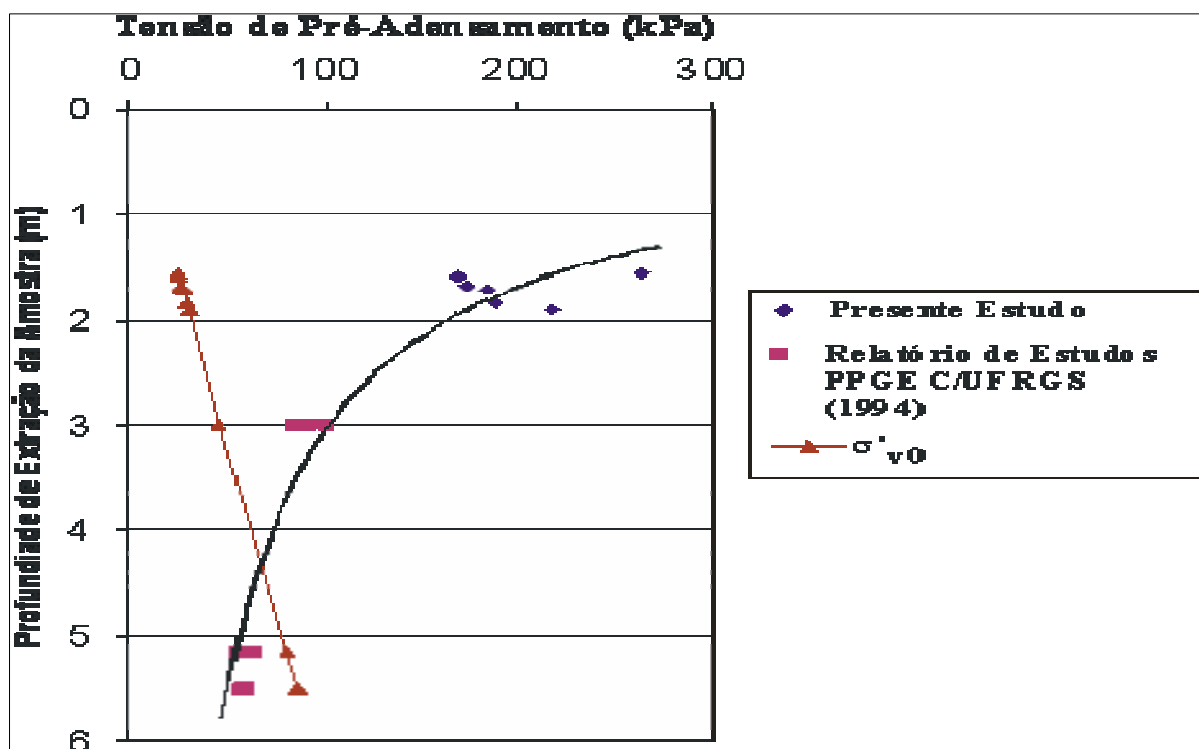


Figura 86: Curvas de tensão de Pré-Adensamento \times profundidade de extração da amostra, obtidas nos ensaios realizados e no relatório de ensaios

Fonte: PPGE/C/UFGRS, 1994

Para fins de comparação de resultados, a Figura 87 apresenta os dados obtidos neste trabalho juntamente com alguns dados obtidos do Aeroporto Salgado Filho (relatório de ensaios PPGEC/UFRGS, 1994). É interessante notar a grande diferença nos índices de vazios iniciais e as diferenças de compressibilidade decorrentes. O pequeno número de ensaios não permite tecer maiores considerações sobre as compressibilidade da reta virgem dos ensaios executados neste trabalho.

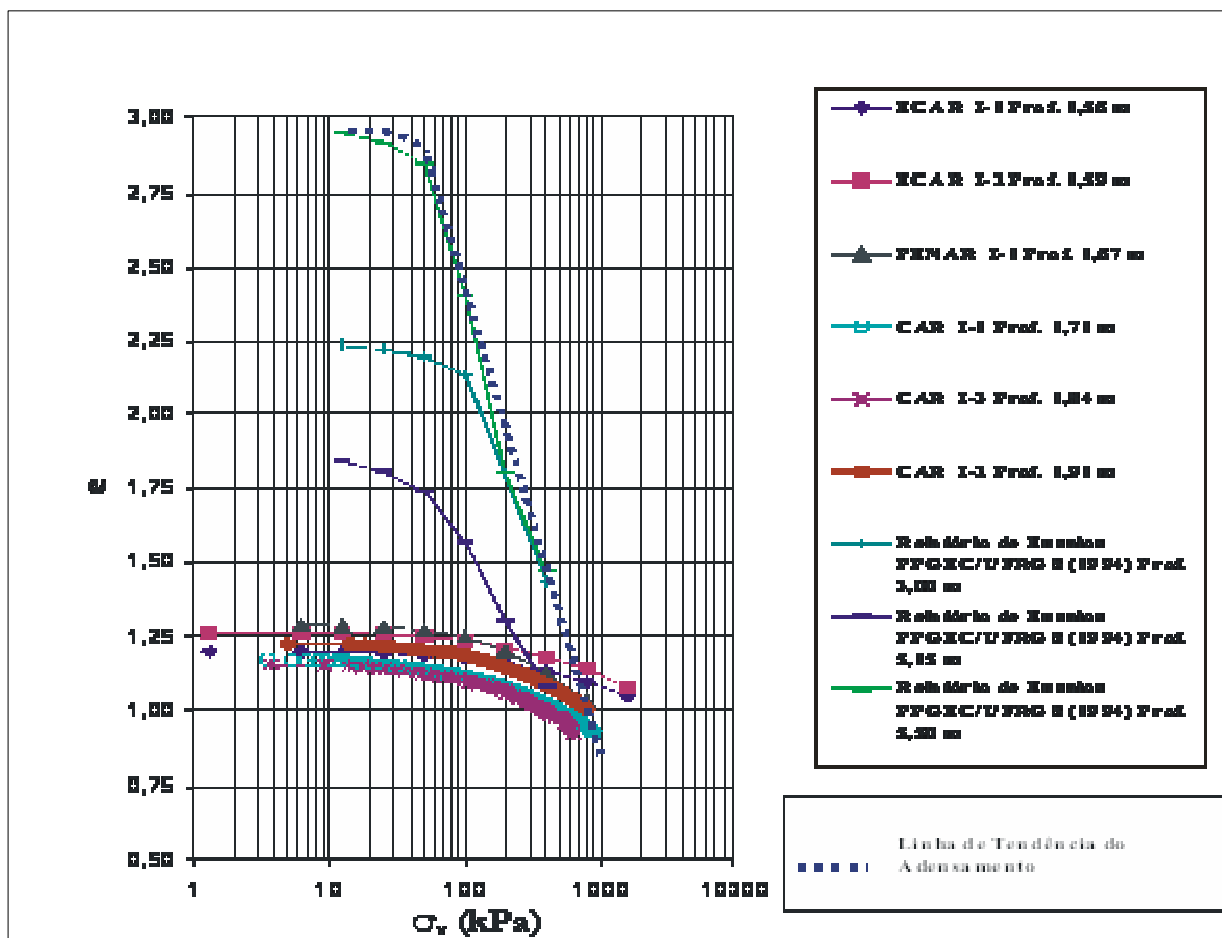


Figura 87: Curvas de e x σ'_v (esc. log) obtidas com ensaio do presente estudo e do relatório de ensaios PPGEC/UFRGS, em argila siltosa indeformada
Fonte: PPGEC/UFRGS, 1994

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas através dos ensaios realizados com a prensa pneumática e os ensaios CRS, além de serem feitas sugestões para futuros trabalhos de pesquisa.

6.1 CONCLUSÕES

1. Os parâmetros de adensamento do material arenoso empregado nesta dissertação são dependentes do índice de vazios inicial (e_i) da amostra;
2. Para o solo arenoso, os novos equipamentos desenvolvidos permitiram a leitura da poro pressão na base e confirmaram que o excesso de poro pressão gerado é dissipado muito rapidamente;
3. Para o solo argilo-siltoso rijo, o equipamento desenvolvido para o ensaio CRS se mostrou muito satisfatório, apresentando pequena dispersão de resultados;
4. Para o material areno-siltoso, o ensaio CRS se mostrou satisfatório, independentemente, da velocidade de deformação empregada, levando a ensaios que duraram de 15 minutos a 2h30min;
5. Para o material argilo-siltoso, os ensaios CRS duraram de 4 a 8 horas, mostrando-se bastante satisfatórios;
6. Dentro das propostas estudadas para a determinação do valor da velocidade de deformação da amostra, a que melhor se aproximou da real velocidade empregada nos ensaios foi a de Smith e Wahls (1969), devido à presença em sua formulação do coeficiente de adensamento do solo;
7. Os trechos de compressão virgem se mostraram similares entre todos os ensaios realizados para o material argiloso, porém para o material arenoso são diretamente influenciados pelo índice de vazios inicial (e_i);
8. Os valores calculados para os módulos edométricos aumentaram com o aumento da velocidade de deformação aplicada;
9. Para os solos estudados as curvas de $e \times \log \sigma'_v$ não se mostraram influenciadas pela velocidade de deformação;
10. Os valores dos coeficientes de adensamento obtidos pelo ensaio CRS se mostraram similares com os provenientes dos ensaios convencionais e pouco influenciados pela velocidade de deformação aplicada;

11. No material argilo-siltoso, a poro pressão gerada na base aumenta com o acréscimo de velocidade de deformação;
12. Para os solos estudados, as curvas de e x σ'_v (esc. log) se mostraram de boa qualidade e bem definidas;
13. Por meio de análise geral dos resultados obtidos, comprova-se a eficácia da prensa pneumática e do equipamento desenvolvido nesta dissertação para os ensaios CRS. Esse equipamento apresentou excelente resolução e confiabilidade nos ensaios, podendo ser utilizado em tempo menores, melhorando a confiabilidade dos projetos.

6.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Realizar ensaios de “creep” na prensa pneumática, desenvolvida para os diferentes solos do estado do Rio Grande do Sul, com aquisição automática de dados e monitoração da poro pressão gerada na base;
2. Realizar uma campanha de ensaios com o CRS que englobe os diversos solos do estado Rio Grande do Sul, em especial, solos areno-argilosos e/ou argilo-arenosos, a fim de buscar a empregabilidade desse tipo de ensaio nesses solos;
3. Aumentar a capacidade do ensaio CRS, mudando a célula de carga e o transdutor de deslocamento, para equipamentos com maior capacidade permitindo atingir altas tensões, em solos arenosos;
4. Difundir a utilização do ensaio CRS, através da utilização deste ensaio em outras pesquisas, possibilitando o ganho técnico de experiência e buscando uma técnica nacional para o ensaio;
5. Pesquisar e implantar com base nos resultados encontrados nacionalmente, uma formulação matemática para o cálculo aproximado da velocidade de deformação da amostra mais adequada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOSHI, H.; YOSHIKUMI, H.; MURAYMA, S. **Constant Loading Rate Consolidation Test**. Soils and Foundation. v. 10, n. 1, p. 159-64, 1970.

ALBORTA, F. L. **Constant Rate of Strain Tests on Reconstituted Clay: a Parametric Study**. M.Sc Thesis. Ghent University. Belgium, 1997.

ALMEIDA, M. S. S. **Aterros sobre Solos Moles: da Concepção à Avaliação do Desempenho**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1996. p. 216.

_____. **Ensaio Especial de Adensamento**. Simpósio sobre novos conceitos em ensaios de campo e laboratório em Geotecnia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1988.

ALMEIDA, M. S. S.; FERREIRA, C. A. M. Consolidation Parameters of a Very Soft Clay from Field in situ Tests and Laboratory Tests. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 47-67, 1993.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D2435**: Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils. Philadelphia: 1996.

_____. **D4186**: Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled Strain Loading. Philadelphia: 1998.

ARMOUR, D. W.; DRNEVICH, V. P. **Improved Techniques for the Constant Rate of Strain Consolidation Test**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. American Society of Testing and Materials. R.N. Yong and Townsend. Philadelphia, 1986. p. 170-83.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB3336**: Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro: 1990.

_____. **NBR6457**: Amostras de Solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. Rio de Janeiro: 1986.

_____. **NBR6459**: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro: 1984.

_____. **NBR6508**: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro: 1984.

_____. **NBR7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro: 1984.

_____. **NBR7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro: 1984.

BAPTISTA, H. M. **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, 1998.

BARBOSA, P. S. A.; ALMEIDA, M. S. S.; SILLS, G. C. Ensaio de Adensamento de Fluxo Restringido na Argila do Sarapuí. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 305-12, 1993.

BJERRUM, J. **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, p. 111-159, 1973.

BURGHIGNOLI, A. **An Experimental Study of the Structural Viscosity of Clays by Means of Continuous Consolidations Tests**. In: 7th European Conference of Soils Mechanics and Foundation, Brighton, v. 2, p. 23-8, 1979.

BURLAND, J. B. **On the Compressibility and Shear Strength of Natural Clays**. Géotechnique, France, v. 40, n. 3, p. 329-78, 1990.

CARVALHO, N. F. **Características Geotécnicas da Argila Mole da Rodovia BR 101 em Santa Catarina**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PPGEC/PUC, Rio de Janeiro, 2000.

CARVALHO, S. R. L. **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, 1989.

CARVALHO, S. R. L.; ALMEIDA, M. S. S.; MARTINS, I. S. M. Ensaio de Adensamento com Velocidade Controlada: Proposta de um Método para Definição da Velocidade. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 185-96, 1993.

CASAGRANDE, A. **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, v. 3, p. 60-4, 1936.

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

_____. Resistance of Soil Structure to Consolidation. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 2, p. 90-115, 1965.

_____. **State of the Art: Consolidation Testing**. Philadelphia: F. C. Townsend/R. N. Yang, 1986. p. 71-103.

FORMIGHERI, L. E. **Comportamento de um Aterro Sobre Argila Mole da Baixada Fluminense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PPGEC/PUC, Rio de Janeiro, 2003.

GORMAN, C. T.; HOPKINS, T. C.; DRNEVICH, V. P. Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Testing. **Geotechnical Testing Journal**, ASTM. v. 1, n. 1, p. 3-15, 1978.

HAMILTON, J. J.; CRAWFORD, C. B. **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. 254-71, 1959.

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

HKGEO. **Guide to Site Investigation.** Geotechnical Engineering Office Civil Engineering Department Hong Kong. Hong Kong, 1987.

_____. **Model Specification for Soils Testing.** Geotechnical Engineering Office Civil Engineering Department Hong Kong. Hong Kong, 2001.

HVORSLEV, M.J. **Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes.** Waterways Experiment Station – Vicksburg, Mississipi, 1949.

JAMIOLKOWSKI, M. Et al. **New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils.** Proceedings, XI Int. Conf. On Soil Mech. and Found. Engineering. San Francisco, v. 2, p. 1-97, 1985.

JANBU, N.; TOKHEIN, O.; SENNESET, K. **Consolidation Tests with Continuos Loading.** Proceedings: X Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Estocolmo, v. 1, p. 645-54, 1981.

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

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

LARSSON, R.; SÄLLFORS, G. **Automatic Continuos 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, 1986.

LEROUEIL, S. Compressibility of Clays: Fundamental and Practical Aspects. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.**, ASCE, v. 122, n. 7, p.534-43, 1996.

LEROUEIL, S.; HIGHT, D. W. **State of the Art: Behaviour and Properties of Natural Soils and Soft Rocks.** Characterization and Engineering Properties of Natural Soils. 2002.

LEROUEIL, S.; KABBAJ, M.; TAVENAS, F. **Study of the Validity of a σ'_v - ε_v - ε_v Model *in situ* Conditions.** Soils and Foundations. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, v. 28, p. 13-25, 1985.

LEROUEIL, S.; SAMSOM, L.; BOZOZUK, M. Laboratory and Field Determination of Preconsolidation Pressures at Gloucester. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 20, n. 3, p. 477-90, 1983.

LOWE, J.; JONES, E.; OBRICIAN, V. Controlled Gradient Consolidation Test. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division.** v. 95, p. 77-97, 1969.

MARQUES, M. E. S. **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, 1996.

MARTINS, I. S. M.; LACERDA, W. A. Sobre a Relação Índice de Vazios – Tensão Vertical Efetiva na Compressão Unidimensional. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 17, n. 3, p. 157-66, 1994.

MASSAD, F. Baixada Santista: Implicações da História Geológica no Projeto de Fundações. Conferência Pacheco Silva. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 3-49, 1999.

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina – PPGEC/UFSC, Florianópolis, 2004.

OLIVEIRA, J. T. R. **A Influência da Qualidade da Amostra no Comportamento Tensão - Deformação-Resistência de Argilas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

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

PACHECO SILVA, F. **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. 219-23, 1970.

RAJU, P. S. R.; PANDIAN, N. S.; NAGARAJ, T. S. Analysis and Estimation of the Coefficient of Consolidation. **Geotechnical Testing Journal**, v. 8, n. 2, p. 252-58, 1995.

RANZANI, G. **Manual de Levantamento de Solos.** Piracicaba: Editora da Universidade de São Paulo, 1965.

RIBEIRO, L. F. M. **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, 1992.

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

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

SANDBAEEKEN, G.; BERRE, T.; LACASSE, S. **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, 1986. p. 329-53.

SANTOS, G. T. **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, 1997.

SCHIFFMAN, R. L. **Consolidation of Soil Under Time-Dependent Loading and Variable Permeability**. Highway Research Board. Washington, v. 37, p. 354, 1958.

SHEAHAN, T. C., WATTERS, P. J. Experimental Verification of CRS Consolidation Theory. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.**, v. 123, n. 5, p. 430-7, 1997.

_____.; _____. Using an Automated Rowe Cell for Constant Rate of Strain Consolidation Test. **Geotechnical Testing Journal**, v. 19, n. 4, p. 354-63, 1996.

SILLS, G. C.; HOARE, S. D.; BAKER, N. **An experimental Assessment of the Restricted Flow Consolidation Test**. Consolidation of Soils: Testing and Evaluation, ASTM STP 892. Philadelphia, 1986. p. 203-16.

SILVA, F. P. **Uma Nova Construção para Determinação da Pressão de Pré-Adensamento de uma Amostra de Solo**. IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. ABMS, Guanabara, 1970. p. 219-23.

SILVESTRINI, V. Et al. **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, 1986. p. 433-50.

SMITH, R. E.; WAHLS, H. E. Consolidation Under Constant Rates of Strain. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**, ASCE, v.95, p. 519-39, 1969.

SOARES, J. M. D. **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, 1997.

SPANNENBERG, M. G. **Caracterização Geotécnica de um Depósito de Argila Mole da Baixada Fluminense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PPGEC/PUC, Rio de Janeiro, 2003.

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

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

WAHLS, H. E. Analysis of Primary and Secondary Consolidation. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**, v. 88, p. 207-31, 1962.

WAHLS, H. E.; DEGODOY, N. S. Interpretation of Consolidation Test – Discussion. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**, v. 91, p. 147-52, 1965.

WISSA, E. Z.. Et al. Consolidation at Constant Rate of Strain. **Journal of Soils Mechanics and Foundation Division**, v. 97, p. 77-97, 1971.