

CARACTERÍSTICAS DE ADENSAMENTO DA ARGILA DO CANAL DO
PORTO DE SANTOS NA REGIÃO DA ILHA BARNABÉ

Vitor Nascimento Aguiar

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

Aprovada por:

Prof. Ian Schumann Marques Martins, D.Sc.

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

Prof. Willy Alvarenga Lacerda, Ph.D

Prof. Roberto Quental Coutinho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2008

AGUIAR, VITOR NASCIMENTO

Características de Adensamento da Argila
do Canal do Porto de Santos na Região da
Ilha Barnabé [Rio de Janeiro] 2008

XXII, 223p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, M.Sc,
Engenharia Civil, 2008)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Compressibilidade
2. Adensamento
3. Adensamento secundário

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

“Sempre que te perguntarem se podes fazer um trabalho, responde que sim e te ponhas em seguida a aprender como se faz”.

F. Rosselt

À minha família,
dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ian Shumann Marques Martins, pela orientação, pela dedicação ao trabalho e pelo entusiasmo transmitido.

Ao Professor Paulo Eduardo Lima de Santa Maria, pela orientação e por estar sempre disposto a esclarecer minhas dúvidas com serenidade e precisão.

Aos demais membros da banca, pela disposição em analisar e avaliar o trabalho.

Ao Professor Willy Alvarenga Lacerda e à Professora Ana Paula Fonseca, meus orientadores de iniciação científica, pelo incentivo em cursar o mestrado em geotecnia na COPPE/UFRJ.

Ao Professor Fernando Artur Brasil Danziger, meu orientador na graduação em engenharia civil na EP/UFRJ, pela confiança que sempre depositou em mim.

Aos demais Professores da área de Geotecnia da COPPE, que contribuíram muito para o meu crescimento.

Ao meu chefe Professor Jean Pierre Paul Rémy, pelos ensinamentos transmitidos em cada dia de trabalho na Mecasolo e pelo incentivo aos estudos. Obrigado pela compreensão durante esse período difícil, sempre permitindo a minha ida à COPPE quando necessário.

Aos amigos de trabalho, Alexandre Silva e Thatiana Coelho, não só pela ajuda na elaboração de algumas figuras e na formatação da dissertação, mas principalmente por terem me recebido muito bem quando ingressei na Mecasolo. Por essa ótima receptividade, devo agradecimentos aos demais amigos da Mecasolo, Joilso Silva e os engenheiros Aron Davidovitsch e Luciano Moraes Jr.

À EMBRAPORT (Empresa Brasileira de Terminais Portuários) especialmente ao engenheiro Juvêncio Pires Terra, por ter apoiado o trabalho viabilizando a extração e o transporte das amostras até o Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

À engenheira Silvia Suzuki, pelo acompanhamento da extração das amostras.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia da COPPE, em especial ao Carlinhos e à Glória pela ajuda prestada nos ensaios de caracterização e ao Sergio pelo apoio nas leituras dos ensaios.

Aos meus amigos de mestrado Gustavo, Cescyle, Christian e Maurício, pela força transmitida durante esse período.

À minha família, por tudo que fizeram por mim na vida.

Ao CNPQ por ter me dado suporte financeiro durante o primeiro ano do mestrado, período do cumprimento dos créditos, no qual eu era aluno de tempo integral.

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

CARACTERÍSTICAS DE ADENSAMENTO DA ARGILA DO CANAL DO
PORTO DE SANTOS NA REGIÃO DA ILHA BARNABÉ

Vitor Nascimento Aguiar

Junho/2008

Orientadores: Ian Schumann Marques Martins
Paulo Eduardo Lima de Santa Maria

Programa: Engenharia Civil

Neste trabalho estão apresentadas as características de compressibilidade e adensamento (primário e secundário) da argila do canal do Porto de Santos na região da Ilha Barnabé.

Foram realizados ensaios de adensamento e relaxação, de longa duração, sob condição edométrica, numa célula convencional. Os resultados desses ensaios mostram que a argila de Santos enquadra-se no modelo de comportamento desenvolvido pelo grupo de Reologia dos Solos da COPPE. Tal modelo admite que a tensão vertical efetiva é composta de duas parcelas, uma que se estabelece através dos contatos sólidos e outra que se dá pela água viscosa adsorvida aos grãos. Consoante esta hipótese, o adensamento secundário acontece pela transferência da parcela viscosa da tensão efetiva para a parcela chamada sólido-sólido.

Outro aspecto importante deste estudo é a quantificação da parcela viscosa da tensão vertical efetiva como função da velocidade de deformação específica e do tempo.

Estas constatações abrem a porta para que se creditem as deformações no adensamento edométrico não à variação da tensão efetiva mas sim à variação de sua parcela sólido-sólido.

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

CONSOLIDATION CHARACTERISTICS OF THE SANTOS HARBOUR
CHANNEL CLAY NEAR BARNABÉ ISLAND

Vitor Nascimento Aguiar

June/2008

Advisors: Ian Schumann Marques Martins

Paulo Eduardo Lima de Santa Maria

Department: Civil Engineering

This dissertation presents compressibility and consolidation (primary and secondary) characteristics of the Santos Harbour Channel Clay near Barnabé Island.

Long term consolidation and relaxation tests were carried out under oedometric conditions in conventional one-dimensional consolidation cells. The tests results show that the Santos Clay fits in the behaviour model developed by the COPPE Soil Rheology Group. The above mentioned model assumes that the effective vertical stress is made up of two parts, one that has its seat on the solid-grain skeleton and the other that has its seat on the viscous adsorbed water. According to this hypothesis, secondary consolidation takes place by the transfer of the viscous component of the effective stress to the soil-grain skeleton component.

Another important aspect of the study presented herein is the evaluation of the viscous component of the effective stress as a function of time and strain rate. These facts enhance the possibility of assigning deformations measured in a one-dimensional consolidation test not to the changes of effective stress but to the component of the effective stress which is supported by the solid-grain skeleton.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização do trabalho	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Considerações iniciais.....	3
2.2 O princípio das tensões efetivas.....	4
2.3 O fenômeno do adensamento dos solos.....	5
2.4 Teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich	6
2.4.1 Considerações iniciais.....	6
2.4.2 Hipóteses simplificadoras da teoria de Terzaghi e Frölich.....	8
2.4.3 Equação do adensamento unidimensional	11
2.4.4 Ensaio de adensamento edométrico convencional.....	14
2.4.5 Estimativa da curva de campo “Recalque x Tempo”.....	20
2.4.6 Variações da teoria clássica	23
2.4.7 O adensamento secundário	23
2.5 Abordagens do adensamento secundário.....	24
2.5.1 Mecanismos do adensamento secundário (fenômeno físico).....	24
2.5.2 Quantificação do fenômeno (modelagem matemática)	25
2.5.2.1 Considerações iniciais	25
2.5.2.2 Abordagem usando o parâmetro C_α	25
2.5.2.3 Discussão sobre a validade da hipótese que considera uma relação única entre tensão vertical efetiva (σ'_v) e índice de vazios (e).....	27
2.5.2.4 Abordagem de Taylor e Merchant (1940).....	31
2.5.2.5 Abordagem de Martins e Lacerda (1985).....	39
2.5.2.6 Abordagem de Leroueil (1985)	48
2.5.2.7 Abordagem do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ	56

3. ENSAIOS DE ADENSAMENTO – MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1 Extração das amostras.....	64
3.2 Formação geológica do depósito	69
3.3 Caracterização geotécnica do depósito	72
3.4 Metodologia de execução dos ensaios de adensamento	76
4. RESULTADOS OBTIDOS.....	85
4.1 Parâmetros de compressibilidade e adensamento	85
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	143
5.1 Critério de carregamento e traçado da curva de compressibilidade	143
5.2 Parâmetros de compressibilidade e adensamento primário	144
5.3 Efeitos do amolgamento	145
5.4 Adensamento secundário e relaxação imperfeita.....	149
5.4.1 Curvas de velocidade de deformação específica	149
5.4.2 Quantificação da tensão vertical efetiva viscosa transferida	161
5.5 Efeito da temperatura.....	182
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	183
6.1 Conclusões.....	183
6.2 Sugestões para pesquisas futuras	185
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
ANEXOS	193
Anexo A: Desenvolvimento da equação do adensamento unidimensional da teoria de Terzaghi e Frölich.....	194
Anexo B: Planta do Canal do Porto de Santos	198
Anexo C: Especificação técnica para coleta de amostra indeformada	200
Anexo D: Imagens da amostragem.....	206
Anexo E: Curvas de distribuição granulométrica	210
Anexo F: Procedimento de moldagem dos corpos de prova	217

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Adensamento unidimensional no campo

Figura 2.2: Relação idealizada entre índice de vazios e tensão vertical efetiva (e σ'_v)

Figura 2.3: Valor inicial e valores de contorno do adensamento unidimensional de fluxo exclusivamente vertical

Figura 2.4: Esquema do ensaio de adensamento edométrico

Figura 2.5: Exemplo de curva de adensamento em termos de leitura do extensômetro x raiz quadrada do tempo de um ensaio de adensamento convencional

Figura 2.6: Exemplo de curva de adensamento em termos de deformação volumétrica x tempo em escala logarítmica de um ensaio de adensamento convencional

Figura 2.7: Exemplo de curva de compressibilidade em termos de índice de vazios de um ensaio de adensamento edométrico

Figura 2.8: Aterro de espessura H_{at} após a construção e antes de qualquer recalque ter ocorrido

Figura 2.9: Comparação entre a curva teórica clássica e a curva experimental para um ensaio de adensamento edométrico convencional

Figura 2.10: Obtenção dos parâmetros C_α e $C_{\alpha\varepsilon}$ na curva de adensamento de um ensaio de adensamento edométrico

Figura 2.11: Relação única entre índice de vazios e tensão vertical efetiva – hipótese não realista

Figura 2.12: Lei constitutiva da teoria de Taylor e Merchant (1940)

Figura 2.13: Curvas de Taylor e Merchant (1940) para diferentes valores de F para $r = 0,7$

Figura 2.14: Caminho hipotético de tensões no plano $p' \times q$ seguido pelo solo durante a compressão secundária (Martins e Lacerda, 1985).

Figura 2.15: Relação entre índice de vazios (e), tensão vertical efetiva (σ'_v) e coeficiente de empuxo no repouso (K_0) (Martins e Lacerda, 1985).

Figura 2.16: Caminho seguido durante o adensamento primário unidimensional com compressão primária e secundária ocorrendo simultaneamente (Martins e Lacerda, 1985)

Figura 2.17: Ensaios de adensamento edométrico do tipo CRS feitos na argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.18: Curvas “tempo x deformação (ϵ_v)” dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.19: Curvas “deformação (ϵ_v) x velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$)” dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.20: Curvas de compressibilidade de igual velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) deduzidas a partir dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.21: Curvas de compressibilidade de ensaios edométricos especiais do tipo CRS da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.22: Curva de tensão de sobreadensamento (σ'_p) x velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.23: Curvas $(\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon})) \times \epsilon_v$ dos ensaios do tipo CRS e dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.24: Curvas $(\sigma'_v / \sigma'_p (\dot{\epsilon})) \times \epsilon_v$ dos ensaios do tipo CRS, CGTs e convencional da argila de St. Césaire (Leroueil et al, 1985)

Figura 2.25: Comportamento da argila do Sarapuí após o descarregamento feito ao final do adensamento primário (Feijó e Martins, 1993)

Figura 2.26: Zona de equilíbrio indiferente no plano e - $\log \sigma'_v$ observada para a argila do Sarapuí (Feijó e Martins, 1993)

Figura 2.27: Zona de equilíbrio indiferente no plano p' - q observada para a argila do Sarapuí (Feijó e Martins, 1993)

Figura 2.28: Aumento da poropressão após a interrupção da drenagem no final do adensamento primário (Lima, 1993)

Figura 2.29: Caminho seguido durante a relaxação de tensões drenada no edômetro (Garcia, 1996)

Figura 3.1: Vista aérea do local com a projeção do aterro piloto

Figura 3.2: Detalhe da região da Ilha Barnabé com a locação do aterro piloto

Figura 3.3: Locação das sondagens à percussão e sondagens para retiradas de amostras indeformadas dentro da área de projeção do aterro piloto

Figura 3.4: Localização das amostras extraídas no furo SRA-203 no boletim de sondagem à percussão SPM-203

Figura 3.5: Ilustração dos possíveis estágios de gênese das Planícies Sedimentares Paulistas (Suguio e Martin, 1981). Extraído de Massad (1999)

Figura 3.6 Perfis dos parâmetros de caracterização

Figura 3.7: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica nos ensaios tipo 1

Figura 3.8: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica nos ensaios tipo 2

Figura 3.9: Imagem do ensaio de relaxação imperfeita no equipamento edométrico convencional

Figura 3.10: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica nos ensaios tipo 3

Figura 4.1: Determinação da tensão sobreadensamento pelo método de Pacheco Silva

Figura 4.2: Determinação do índice de recompressão (C_r), do índice de compressão (C_c) e do índice de expansão (C_e)

Figura 4.3 Perfis dos parâmetros de compressibilidade

Figura 4.4: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1A

Figura 4.5: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1A

Figura 4.6: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1B

Figura 4.7: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1B

Figura 4.8: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1C

Figura 4.9: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1C

Figura 4.10: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1D

Figura 4.11: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1D

Figura 4.12: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2A

Figura 4.13: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2A

Figura 4.14: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2B

Figura 4.15: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2B

Figura 4.16: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2C

Figura 4.17: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2C

Figura 4.18: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2D

Figura 4.19: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2D

Figura 4.20: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3A

Figura 4.21: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3A

Figura 4.22: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3B

Figura 4.23: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3B

Figura 4.24: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3C

Figura 4.25: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3C

Figura 4.26: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3D

Figura 4.27: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3D

Figura 4.28: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4A

Figura 4.29: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4A

Figura 4.30: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4B

Figura 4.31: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4B

Figura 4.32: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4C

Figura 4.33: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4C

Figura 4.34: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4D

Figura 4.35: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4D

Figura 4.36: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5A

Figura 4.37: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5A

Figura 4.38: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5B

Figura 4.39: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5B

Figura 4.40: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5C

Figura 4.41: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5C

Figura 4.42: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5D

Figura 4.43: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5D

Figura 4.44: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6A

Figura 4.45: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6A

Figura 4.46: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6B

Figura 4.47: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6B

Figura 4.48: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6C

Figura 4.49: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6C

Figura 4.50: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6D

Figura 4.51: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6D

Figura 4.52: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(1)

Figura 4.53: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(1)

Figura 4.54: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(2)

Figura 4.55: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(2)

Figura 4.56: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(3)

Figura 4.57: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(3)

Figura 4.58: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(4)

Figura 4.59: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(4)

Figura 4.60: Curvas de compressibilidade ($\varepsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(5)

Figura 4.61: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(5)

Figura 4.62: Curvas de compressibilidade ($\varepsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(6)

Figura 4.63: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(6)

Figura 4.64: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1A

Figura 4.65: Curva de relaxação do ensaio 1B

Figura 4.66: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1C

Figura 4.67: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1C a partir do descarregamento

Figura 4.68: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1D

Figura 4.69: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1D a partir do descarregamento

Figura 4.70: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3A

Figura 4.71: Curva de relaxação do ensaio 3B

Figura 4.72: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3C

Figura 4.73: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3C a partir do descarregamento

Figura 4.74: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4A

Figura 4.75: Curva de relaxação do ensaio 4B

Figura 4.76: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4C

Figura 4.77: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4C a partir do descarregamento

Figura 4.78: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5A

Figura 4.79: Curva de relaxação do ensaio 5B

Figura 4.80: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5C

Figura 4.81: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5C a partir do descarregamento

Figura 4.82: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6A

Figura 4.83: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6B

Figura 4.84: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6B a partir do descarregamento

Figura 4.85: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6C

Figura 4.86: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6C a partir do descarregamento

Figura 5.1: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(1)

Figura 5.2: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(3)

Figura 5.3: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(4)

Figura 5.4: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(6)

Figura 5.5: Determinação da tensão de sobreadensamento gerada pelo adensamento secundário

Figura 5.6: Determinação da tensão de sobreadensamento gerada pela relaxação imperfeita

Figura 5.7: Adensamento secundário no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

Figura 5.8: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR =1,0 da amostra SRA203(1) – Ensaio 1A

Figura 5.9: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR=1,0 da amostra SRA203(1) – Ensaio 1A

Figura 5.10: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR=1,0 da amostra SRA203(3) – Ensaio 3A

Figura 5.11: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(3) – Ensaio 3A

Figura 5.12: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(4) – Ensaio 4A

Figura 5.13: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(4) – Ensaio 4A

Figura 5.14: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(6) – Ensaio 6A

Figura 5.15: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(6) – Ensaio 6A

Figura 5.16: Relaxação perfeita no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

Figura 5.17: Relaxação Imperfeita no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

Figura 5.18: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da etapa 1 da relaxação imperfeita da amostra SRA203(1) – Ensaio 1B

Figura 5.19: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(1) – Ensaio 1B

Figura 5.20 Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da relaxação imperfeita da amostra SRA203(3) – Ensaio 3B

Figura 5.21: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(3) – Ensaio 3B

Figura 5.22 Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da relaxação imperfeita da amostra SRA203(4) – Ensaio 4B

Figura 5.23: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(4) – Ensaio 4B

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Propriedades geotécnicas de algumas argilas do leste do Canadá (Leroueil et al, 1985)

Tabela 2.2: Condições das amostras após o descarregamento (Feijó, 1991)

Tabela 3.1: Profundidade das amostras indeformadas extraídas no furo SRA-203

Tabela 3.2: Parâmetros de caracterização

Tabela 3.3A: Tipos de ensaios e seqüência de estágios de carregamento

Tabela 3.3B: Tipos de ensaios e seqüência de estágios de carregamento

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos a partir das curvas de compressibilidade correspondente à velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1}

Tabela 5.1: Domínios de $C_c/(1+e_0)$ e $c_{v \text{ lab}}$ das Argilas de Sedimentos Flúvio Lagunares (SFL) segundo Massad (1999)

Tabela 5.2: Qualidade dos corpos de prova

Tabela 5.3: Resumo dos ensaios de adensamento secundário

Tabela 5.4: Resumo dos ensaios de relaxação imperfeita

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

À primeira vista, o fenômeno do adensamento dos solos parece ser muito bem modelado pela teoria de Terzaghi e Frölich também conhecida como teoria clássica. Entretanto, ao estudar o assunto com mais profundidade e ao aplicar a teoria clássica aos casos práticos e corriqueiros da engenharia civil, tem-se a noção do restrito domínio de aplicação da teoria. Dentre as diversas limitações da teoria clássica, destaca-se a não consideração do adensamento secundário. A abordagem atualmente mais difundida e utilizada para a consideração do adensamento secundário é inconsistente desde a sua concepção teórica.

Com o objetivo de estudar não somente o adensamento secundário, mas também uma série de outros fenômenos reológicos relacionados ao comportamento de solos argilosos inexplicáveis à luz da concepção original do princípio das tensões efetivas, foi criada uma linha de pesquisa no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ chamada de “Reologia das Argilas”. O modelo reológico que vem sendo desenvolvido na COPPE está apoiado nos trabalhos de Taylor e Merchant (1940), Terzaghi (1941) e Taylor (1942). Tal modelo leva em consideração o efeito de velocidade de deformação e da viscosidade dos solos. Resultados experimentais importantes, alcançados em inúmeras dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidas pelo Grupo de Reologia da COPPE, têm contribuído para o refinamento do referido modelo.

Dentro desse contexto, o autor sentiu-se motivado em contribuir no sentido de fortalecer as bases experimentais que sustentam o modelo do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ.

Além disso, o autor tem a pretensão de estimular pesquisas que levem em consideração o efeito da velocidade de deformação na compressão unidimensional de solos argilosos a fim de melhorar a previsão de comportamento de obras geotécnicas e a interpretação de dados de instrumentação de campo. O autor considera que a comunidade científica envolvida com a mecânica dos solos, de uma forma geral, não tem dado a devida importância para a questão do efeito de velocidade que pode

esclarecer muitas questões ainda obscuras na mecânica dos solos e enriquecer a qualidade da prática da engenharia geotécnica.

1.2 Objetivo

Determinar as características de compressibilidade e de adensamento primário e secundário das argilas do Canal do Porto de Santos na região da Ilha Barnabé à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 7 capítulos e 7 anexos. No primeiro capítulo são expostas as motivações que levaram o autor a escolher pelo tema abordado, o objetivo da dissertação e a forma como o trabalho encontra-se organizado.

O segundo capítulo inicia-se classificando os materiais em geral quanto ao seu comportamento mecânico, e justificando a complexidade de modelar o comportamento mecânico dos solos. Posteriormente, é feita uma explanação sobre a teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich, listando e comentando as hipóteses que sustentam a teoria, seu domínio de aplicação e suas limitações. Finalmente, neste capítulo, levanta-se a questão do adensamento secundário, apresentando algumas das abordagens mais importantes existentes para explicar o mecanismo e quantificar o fenômeno.

No terceiro capítulo, é feita uma descrição do material ensaiado sob o ponto de vista geológico e geotécnico. Também são descritos os equipamentos e as metodologias utilizadas na amostragem, na moldagem dos corpos de prova e na execução dos ensaios.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos e no quinto capítulo tais resultados são analisados.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas a partir da análise dos resultados e são feitas sugestões para pesquisas futuras.

No sétimo capítulo, são apresentadas as referências bibliográficas e a bibliografia consultada para a execução do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

Em qualquer material, a aplicação de tensões provoca deformações. Alguns materiais, quando submetidos a estados tensionais, deformam-se instantaneamente. Em outros materiais essas deformações demandam um determinado tempo para desenvolverem-se. Nesses materiais, as tensões, as deformações e o tempo mantêm uma relação entre si. Essa relação é uma propriedade mecânica do material e é chamada de relação tensão-deformação-tempo. Além disso, dependendo do material e do estado de tensões imposto, as deformações podem ser totalmente recuperáveis ou não. Assim sendo, quanto ao comportamento mecânico, os materiais podem ser classificados em: elásticos, plásticos, elastoplásticos, viscoelásticos, viscoplásticos e viscoelastoplásticos.

Nos materiais ditos **elásticos**, as deformações ocorrem de forma instantânea e quando as tensões impostas são removidas tais deformações são totalmente recuperáveis. Se o carregamento aplicado a um corpo de material elástico for conhecido, é possível, através da Teoria da Elasticidade, calcular as tensões, as deformações e os deslocamentos em qualquer ponto do referido corpo.

Nos materiais ditos **plásticos**, as deformações são instantâneas e totalmente permanentes. Já nos materiais ditos **elastoplásticos**, as deformações ocorrem de forma instantânea, porém parte delas é recuperável e parte é permanente.

Nos materiais **viscoelásticos**, as deformações são totalmente recuperáveis, todavia não se processam de forma instantânea, necessitando de um tempo para desenvolverem-se. Já nos materiais ditos **viscoplásticos**, as deformações são totalmente permanentes e desenvolvem-se ao longo do tempo.

Finalmente, existem materiais que combinam os três tipos acima que são os **viscoelastoplásticos**. Nesses materiais, as deformações desenvolvem-se ao longo do tempo e parte delas é recuperável e parte é permanente.

Os solos comportam-se, em primeira aproximação, como materiais elásticos dentro de um domínio de tensões relativamente restrito definido pela sua história de

tensões e desde que os carregamentos sejam não-drenados. Em um domínio mais amplo de tensões os solos possuem um comportamento do tipo elastoplástico ou viscoelastoplástico. Além disso, diferentemente da maioria dos materiais estudados na engenharia civil, tal como o aço, os solos, principalmente os naturais, são materiais de grande complexidade por serem heterogêneos, anisotrópicos e trifásicos (constituídos por sólidos, água e ar).

Por esses motivos, o desenvolvimento de modelos teóricos capazes de descrever o comportamento tensão-deformação-tempo dos solos têm sido um dos focos principais dos pesquisadores ligados à mecânica dos solos. Ainda assim, existem casos simples de interesse prático para a engenharia que podem ser modelados por equações diferenciais não muito complexas. É o caso da Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Frölich.

2.2 O princípio das tensões efetivas

É inquestionável que o princípio das tensões efetivas, enunciado em língua inglesa pela primeira vez em 1936 pelo engenheiro Karl Terzaghi, é a contribuição mais significativa para o avanço na compreensão do comportamento mecânico dos solos. Toda a ciência “Mecânica dos Solos” da forma como a conhecemos atualmente é sustentada por esse princípio.

O princípio das tensões efetivas (Terzaghi, 1936), concebido para solos saturados, é composto de duas partes. A primeira parte define as tensões efetivas e a segunda estabelece a importância das tensões efetivas no comportamento mecânico dos solos.

Primeira parte: Definição de Tensões Efetivas.

As tensões em qualquer ponto em uma massa de solo podem ser computadas a partir das tensões principais totais σ_1 , σ_2 , σ_3 que atuam neste ponto. Se os vazios do solo estiverem preenchidos com água sob uma pressão u , as tensões principais consistem de duas parcelas. Uma parcela de valor u que age na água e na parte sólida, em todas as direções, com igual magnitude (porém sem “empurrar” os grãos contra os outros). Essa parcela é denominada pressão neutra (modernamente poropressão). As

parcelas remanescentes $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$, $\sigma'_2 = \sigma_2 - u$ e $\sigma'_3 = \sigma_3 - u$ são “sentidas” exclusivamente pelo esqueleto sólido do solo. Estas parcelas das tensões principais totais são denominadas tensões principais efetivas.

A equação fundamental do princípio das tensões efetivas é:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2.1)$$

Segunda parte: Importância das tensões efetivas no comportamento mecânico dos solos.

Todos os efeitos mensuráveis oriundos da variação do estado de tensões, tais como compressão, distorção e variação da resistência ao cisalhamento, são devidos exclusivamente à variação do estado de tensões efetivas.

Atkinson e Bransby (1978) estabelecem três corolários do Princípio das tensões efetivas, a saber:

Corolário 1: O comportamento de dois solos com a mesma estrutura e mineralogia será o mesmo desde que estejam submetidos ao mesmo estado de tensões efetivas.

Corolário 2: Se um solo for carregado e descarregado sem qualquer mudança de volume e sem qualquer distorção, não haverá variação no estado de tensões efetivas.

Corolário 3: Um solo se expandirá (e perderá resistência) ou se comprimirá (e ganhará resistência) se a poropressão isoladamente for aumentada ou diminuída.

2.3 O fenômeno do adensamento dos solos

De uma maneira genérica, pode-se definir compressibilidade como relação entre a variação de volume do solo e a variação do estado de tensões efetivas sob

condições finais de estabilidade de deformações. Entende-se por estabilidade de deformações, velocidade de deformação específica nula ($\dot{\epsilon} = 0$).

Devido ao fato da compressibilidade da água ser muito menor que a compressibilidade do esqueleto sólido, quando um solo saturado é submetido a um carregamento edométrico, todo o incremento da tensão vertical total é suportado exclusivamente pela água dos vazios. Disto resulta um acréscimo no valor da poropressão. Desta forma, é estabelecido um gradiente hidráulico que governa o fluxo de saída de água dos vazios do solo. O excesso de poropressão gerado vai sendo dissipado, ocorrendo transferência de suporte de carga da água para o esqueleto sólido, traduzindo-se em aumento gradual do estado de tensões efetivas. Tal fato ocorre até que todo o excesso de poropressão seja dissipado.

Desta maneira, entende-se por adensamento o processo de compressão ao longo do tempo de um solo saturado ocasionado pela expulsão de uma quantidade de água igual à redução do volume de vazios como resultado da transferência gradual do excesso de poropressão gerado pelo carregamento para a tensão efetiva.

2.4 Teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich

2.4.1 Considerações iniciais

A teoria do adensamento unidimensional de Terzaghi e Frölich, também conhecida como teoria clássica do adensamento, estuda os casos em que as deformações e o fluxo são exclusivamente verticais. Essas condições ocorrem no campo quando se faz um carregamento uniforme numa área muito grande, por exemplo, um aterro de grande largura. Quanto menor a relação entre a largura da área carregada e a espessura da camada compressível mais afastado estar-se-á das condições estudadas pela teoria clássica. A figura 2.1, a seguir, ilustra uma condição de carregamento uniforme no campo que atende às condições de unidimensionalidade idealizadas pela teoria.

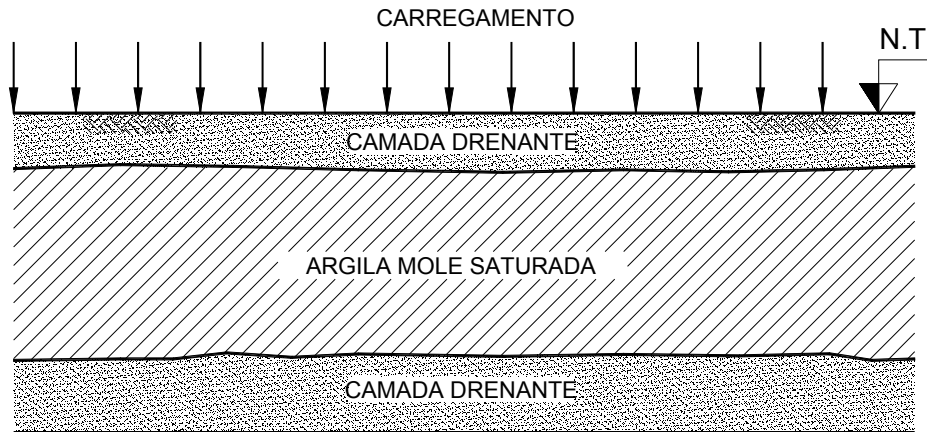


Figura 2.1: Adensamento unidimensional no campo

A mecânica do adensamento é baseada na premissa de que para cada índice de vazios existe uma tensão vertical efetiva máxima que pode ser suportada pelo esqueleto sólido. Além disso, a teoria admite que a relação entre essas duas grandezas pode ser representada por uma reta. É importante chamar a atenção para o fato de que, segundo esta teoria, a relação idealizada entre a tensão vertical efetiva e o índice de vazios é única. Assim sendo, a teoria não admite que tal relação varie em função de efeitos de tempo, velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$), viscosidade, temperatura ou qualquer outro fator.

A figura 2.2, a seguir, mostra a relação idealizada entre índice de vazios e tensão vertical efetiva ($e \times \sigma'_v$).

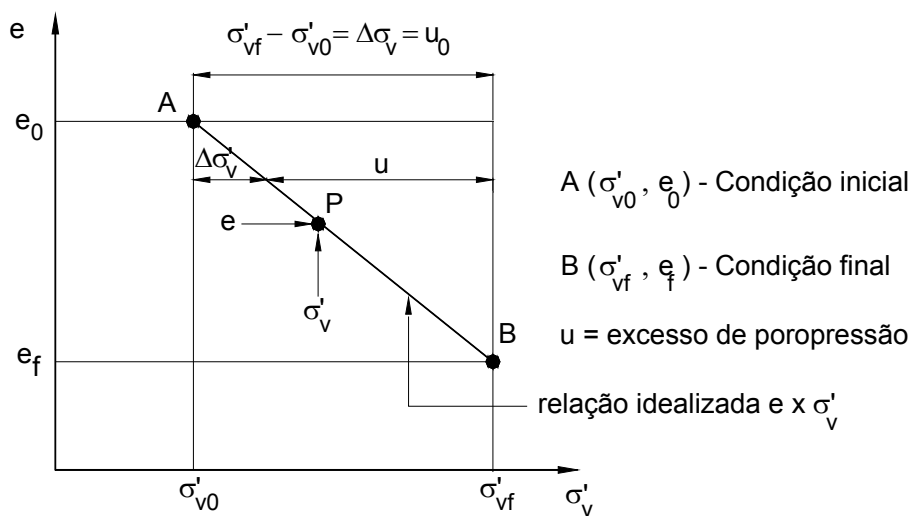


Figura 2.2: Relação idealizada entre índice de vazios e tensão vertical efetiva ($e \times \sigma'_v$)

Na figura 2.2, o solo inicialmente encontra-se em uma condição de deformação estável no ponto A. Após a aplicação de um incremento de tensão total vertical ($\Delta\sigma_v$), ocorre adensamento até ser atingida novamente a condição de deformação estável no ponto B. Define-se porcentagem de adensamento (U_z) como a medida do grau de evolução do processo de adensamento. Em um instante t qualquer representado pelo ponto P da figura 2.2, o grau de adensamento (U_z) é definido por:

$$U_z = \frac{e_0 - e}{e_0 - e_f}, \quad (2.2)$$

ou admitindo a relação idealizada e σ'_v :

$$U_z = \frac{\sigma'_v - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}}, \quad (2.3)$$

ou ainda em termos de excesso de poropressão:

$$U_z = 1 - \frac{u}{u_0} \quad (2.4)$$

2.4.2 Hipóteses simplificadoras da teoria de Terzaghi e Frölich

A Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Frölich baseia-se nas seguintes hipóteses simplificadoras:

1. O solo é homogêneo;
2. O solo é saturado;
3. As compressibilidades dos grãos e da água são desprezíveis em relação à compressibilidade do esqueleto sólido;
4. Não há diferença entre massas de solos de pequenas e grandes dimensões;
5. A compressão é unidimensional;

6. O fluxo de água é unidirecional (vertical);
7. O Fluxo é regido pela Lei de Darcy;
8. Constância de certos parâmetros físicos, que em realidade variam com o tempo;
9. Validade da relação idealizada entre índice de vazios e tensões verticais efetivas;
10. Os deslocamentos e deformações são muito pequenos se comparados à espessura da camada que adensa.

Algumas observações merecem ser feitas a respeito das hipóteses listadas acima, a saber:

Observação 1: Ainda que se considere que todos os pontos da camada compressível possuam a mesma estrutura e composição mineralógica, a primeira hipótese faz com que a teoria não considere a variação do índice de vazios ao longo da profundidade devido à variação do estado de tensões efetivas provocado pelo peso próprio do solo.

Observação 2: A segunda hipótese é bastante representativa em solos sedimentares notadamente as argilas moles, solos esses aos quais está ligada a maioria dos problemas de adensamento. Isto ocorre porque estes solos formam-se comumente em regiões inundadas.

Observação 3: A terceira hipótese não se afasta muito da realidade, uma vez que as compressibilidades da água e dos grãos são realmente bastante menores que a compressibilidade do esqueleto sólido.

Observação 4: A quarta hipótese está ligada a questão da representatividade do elemento infinitesimal utilizado para dedução da equação diferencial que modela o fenômeno.

Observação 5: A quinta e a sexta hipóteses são garantidas nos ensaios edométricos de laboratório uma vez que as deformações laterais do corpo de prova são bloqueadas por um anel rígido e o acréscimo de tensão vertical total é aplicado de forma uniformemente distribuída em toda área superior do mesmo. Todavia, no campo, estas hipóteses podem acarretar em erros mais ou menos significativos em função da relação entre a largura da área carregada e a espessura da camada compressível.

Observação 6: A sétima hipótese é aceita, porém deve-se estudar a validade da Lei Darcy quando os gradientes são muito altos ou muito baixos.

Observação 7: A oitava hipótese refere-se a parâmetros como o coeficiente de permeabilidade (k) e o coeficiente de compressibilidade (a_v) que na realidade variam durante o adensamento. Esta hipótese introduz alguns erros não muito relevantes.

Observação 8: A nona hipótese é a mais restritiva por não prever a relação entre índice de vazios e tensão vertical efetiva (e x σ'_v) com acurácia por dois motivos, a saber:

- a) A relação entre índice de vazios e tensão vertical efetiva (e x σ'_v) não pode ser representada por uma reta,
- b) segundo Taylor (1948), para solos de elevada plasticidade, tal relação é fortemente dependente do tempo do carregamento e da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$).

Observação 9: A teoria admite que alguns parâmetros geométricos da camada compressível são constantes. Assim sendo, a décima hipótese pode acarretar em erros significativos para o caso de grandes deformações não só devido ao fato de não considerar o deslocamento do topo da camada que adensa, que é adotado como origem para a variável independente z (profundidade), mas principalmente por ignorar a variação da distância de drenagem (H_d) ao longo do processo.

2.4.3 Equação do adensamento unidimensional

A proposta da teoria unidimensional de Terzaghi e Frölich é estabelecer uma equação diferencial, cuja solução forneça o excesso de poropressão (u), a tensão vertical efetiva (σ'_v) e o índice de vazios (e) em qualquer profundidade (z) e em qualquer instante (t) de uma camada de solo com uma distância de drenagem máxima (H_d) submetida ao processo de adensamento unidimensional de fluxo exclusivamente vertical promovido por um carregamento uniforme vertical ($\Delta\sigma_v$) aplicado instantaneamente.

A equação diferencial do adensamento unidimensional segundo a teoria clássica, cujo desenvolvimento encontra-se no Anexo A, é:

$$\frac{k(1+e_0)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.5)$$

onde:

k = coeficiente de permeabilidade.

e_0 = índice de vazios inicial.

γ_w = peso específico da água.

$$a_v = \text{coeficiente de compressibilidade. } a_v = -\frac{de}{d\sigma'_v} \quad (2.6)$$

u = excesso de poropressão.

A constância do coeficiente de permeabilidade (k) e do coeficiente de compressibilidade (a_v) admitida pela hipótese 8, permite definir o coeficiente do

primeiro membro da equação como uma única constante chamada de coeficiente de adensamento (c_v). Este parâmetro regula a velocidade com que se dá o adensamento. Quanto maior o valor de c_v mais rapidamente ocorre o processo. Desta maneira, a equação do adensamento unidimensional assume o seguinte aspecto:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\text{Onde: } c_v = \frac{k(1+e_0)}{\gamma_w a_v} \quad (2.8)$$

A equação do adensamento unidimensional é uma equação diferencial linear parcial de segunda ordem, de coeficientes constantes, cujas variáveis independentes são z (variável espacial - profundidade) e t (tempo). Trata-se de um problema de valor inicial e de valores de contorno. A figura 2.3, a seguir, apresenta o valor inicial e os valores de contorno do problema.

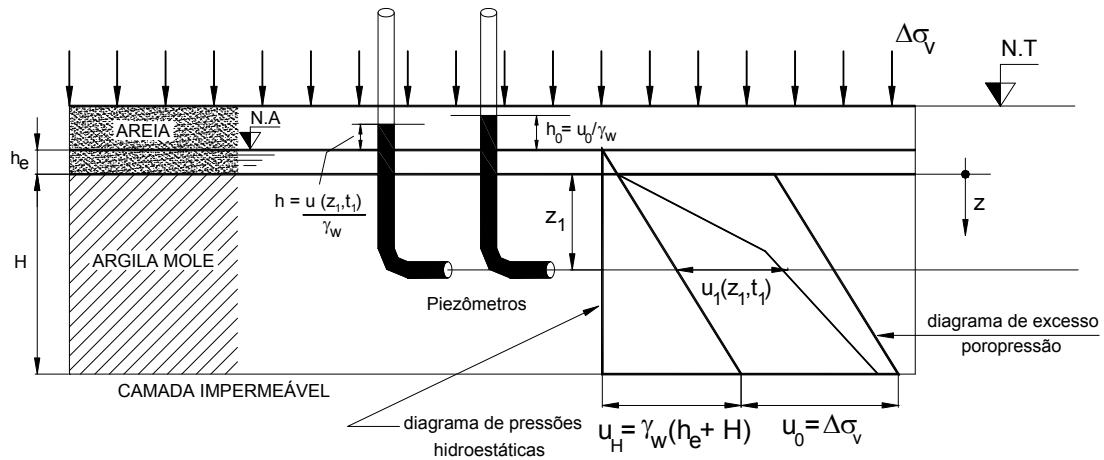


Figura 2.3: Valor inicial e valores de contorno do adensamento unidimensional de fluxo exclusivamente vertical

O valor inicial e os valores de contorno do problema são:

Condição 1: para $t = 0$; $u = u_0$, para $0 \leq z \leq H$

Condição 2: para $z = 0$; $u = 0$, para qualquer $t > 0$

Condição 3: para $z = H$; $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$, para qualquer $t > 0$

Estabelecidos os valores de contorno e o valor inicial, chega-se à seguinte solução para o problema, ver Taylor (1948):

$$u(z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_0}{M} \left(\text{sen} \frac{Mz}{H} \right) e^{(-M^2 T_v)} \quad (2.9)$$

Onde:

$$u_0 = \text{excesso de poropressão inicial, } u_0 = \Delta \sigma_v \quad (2.10)$$

$$M = \frac{1}{2} \pi (2m + 1) \quad \text{e} \quad (2.11)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (2.12)$$

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

Em termos de grau de adensamento (U_z), tem-se que:

$$U_z(z, t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \text{sen} \left(\frac{Mz}{H} \right) e^{(-M^2 T_v)} \quad (2.13)$$

O grau de adensamento médio (\bar{U}_z) para toda a camada em função do tempo (t) é calculado da seguinte maneira:

$$\bar{U}_z(t) = \frac{1}{H} \int_0^H \left(\frac{e - e_0}{e_f - e_0} \right) dz \quad (2.14)$$

Ou ainda:

$$\bar{U}_z(t) = \frac{1}{H} \int_0^H \left(1 - \frac{u}{u_0} \right) dz \quad (2.15)$$

Resolvendo a integral chega-se à seguinte expressão:

$$\bar{U}_z(t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{(-M^2 T_v)} \quad (2.16)$$

Deve-se chamar a atenção para o fato da expressão 2.16 aplicar-se somente para os casos em que o excesso de poropressão inicial (u_0) é constante ao longo de toda a camada que adensa. Entretanto, existem soluções para outras distribuições de excesso de poropressão inicial (u_0) ao longo da camada que adensa, ver Taylor (1948).

2.4.4 Ensaio de adensamento edométrico convencional

Ao deslocamento vertical sofrido pela camada compressível submetida ao processo de adensamento dá-se o nome de recalque. A fim de estimar a curva de campo, por adensamento “tempo (t) x recalque (s)”, é necessária a obtenção dos parâmetros de compressibilidade e de adensamento do solo ao longo da camada que adensa. Esses parâmetros são, na maioria das vezes, obtidos através de um ensaio de laboratório chamado de ensaio de adensamento edométrico convencional.

No ensaio de adensamento edométrico convencional, o corpo de prova é mantido confinado lateralmente por um anel metálico rígido. O corpo de prova é carregado axialmente por incrementos de carga que é mantida constante durante cada estágio de carregamento. A dissipação dos excessos de poropressão gerados pelos carregamentos dá-se via base e topo do corpo de prova através de pedras porosas de permeabilidade suficientemente alta de modo a não retardar a drenagem do corpo de prova.

A figura 2.4, a seguir, ilustra o esquema do ensaio de adensamento edométrico.

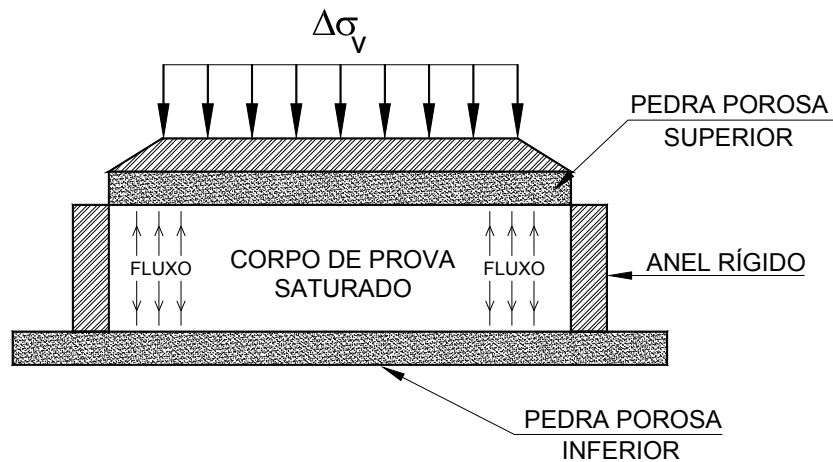


Figura 2.4: Esquema do ensaio de adensamento edométrico

Durante cada estágio de carregamento são feitas leituras da altura do corpo de prova ao longo do tempo através de um extensômetro. As leituras de cada estágio de carregamento são plotadas em termos de leitura de extensômetro ou altura do corpo de prova ou deformação volumétrica em função do tempo. Estas curvas representam a evolução dos recalques sofridos pelo corpo de prova ao longo do tempo, e são chamadas de curva de adensamento. Dois tipos de gráficos são rotineiramente utilizados para interpretação dos ensaios, no primeiro plota-se o tempo em escala logarítmica e, no segundo plota-se a raiz quadrada do tempo.

A figura 2.5, a seguir, apresenta um exemplo da curva de adensamento em termos de leitura do extensômetro x raiz quadrada do tempo de um determinado estágio de carregamento de um ensaio de adensamento convencional.

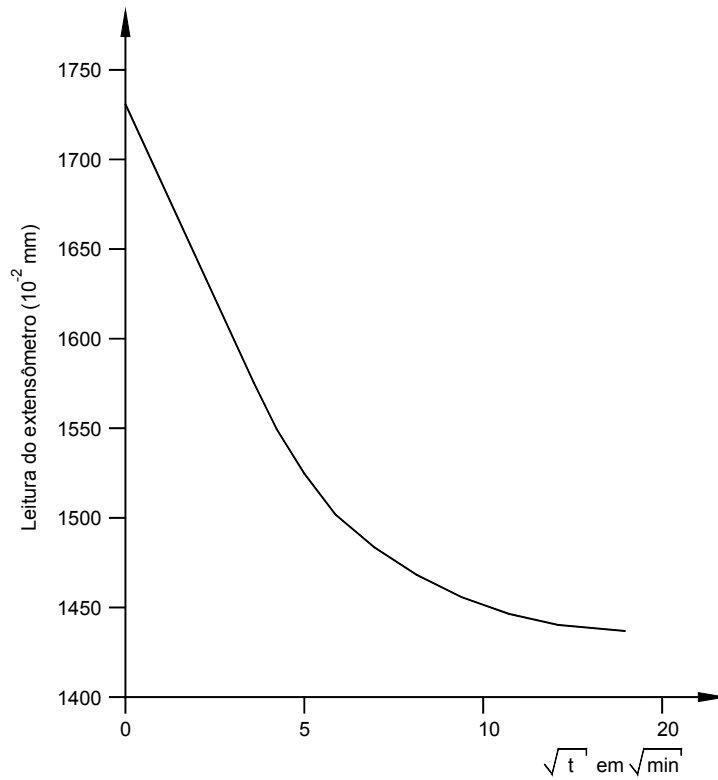


Figura 2.5: Exemplo de curva de adensamento em termos de leitura do extensômetro x raiz quadrada do tempo de um ensaio de adensamento convencional

A figura 2.6, a seguir, apresenta um exemplo da curva de adensamento em termos de deformação volumétrica x tempo em escala logarítmica de um estágio de carregamento de um ensaio de adensamento convencional.

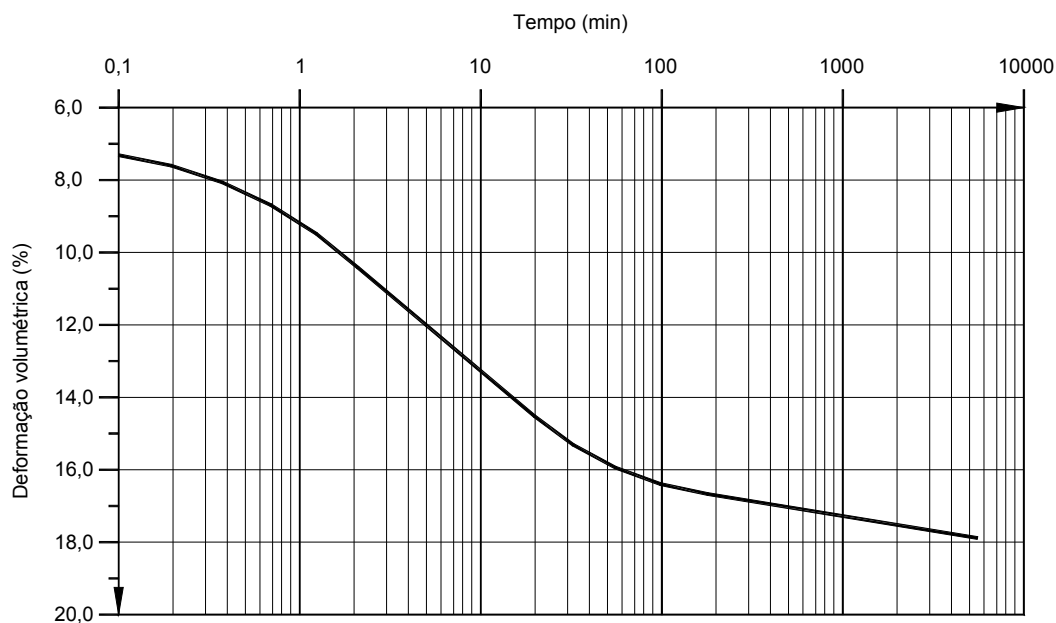


Figura 2.6: Exemplo de curva de adensamento em termos de deformação volumétrica x tempo em escala logarítmica de um ensaio de adensamento convencional

Segundo a norma técnica ABNT MB-3336/1990 – “*Ensaio de adensamento unidimensional*”, a aplicação dos incrementos de carga deve se dar na razão $\Delta\sigma_v/\sigma_{v0}$ igual a 1, onde $\Delta\sigma_v$ é o acréscimo de tensão vertical em um determinado estágio de carregamento e σ_{v0} é a tensão vertical total correspondente ao estágio anterior.

Ainda segundo a referida norma, cada estágio de carregamento deve durar por um intervalo de tempo suficiente até que fique definida a reta de compressão secundária na curva de adensamento em termos de tempo em escala logarítmica ou, alternativamente, até que sejam atingidos 100% de adensamento primário na curva de adensamento em função da raiz quadrada do tempo. A prática corrente de laboratório de mecânica dos solos estipula o tempo de duração de cada estágio em 24 horas.

O coeficiente de adensamento (c_v) é obtido para cada estágio de carregamento ajustando-se a curva de adensamento teórica à curva experimental definida pela teoria de Terzaghi e Frölich. Tal ajuste pode ser feito através de dois métodos, a saber:

a) Método de Taylor – determinado na curva de adensamento em termos de raiz quadrada do tempo;

b) Método de Casagrande - determinado na curva de adensamento em termos de tempo em escala logarítmica.

A relação entre tensão vertical efetiva e a deformação sofrida pelo corpo de prova é representada graficamente pela curva de compressibilidade. Esta curva relaciona a tensão vertical efetiva de cada estágio de carregamento com a deformação correspondente ao final de 24 horas do estágio. A curva de compressibilidade pode ser plotada tanto em termos de deformação volumétrica (ϵ_v) quanto em termos de índice de vazios (e).

A figura 2.7, a seguir, apresenta um exemplo de uma curva de compressibilidade típica em termos de índice de vazios obtida em um ensaio de adensamento edométrico.

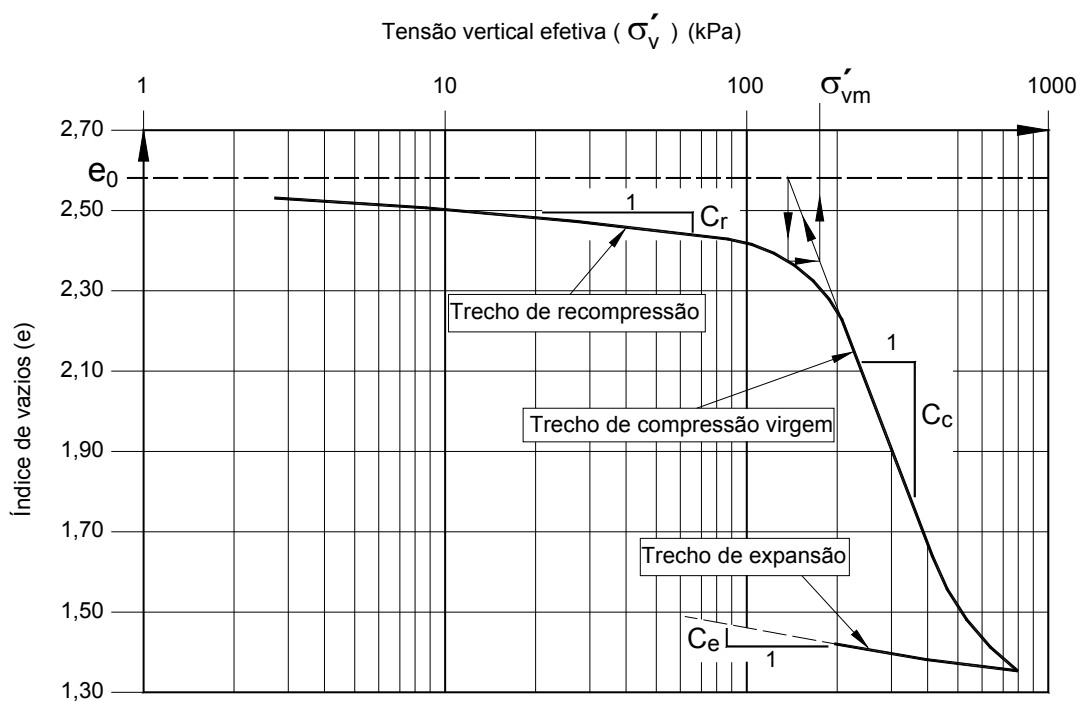


Figura 2.7: Exemplo de curva de compressibilidade em termos de índice de vazios de um ensaio de adensamento edométrico

De posse da curva de compressibilidade, os seguintes parâmetros de compressibilidade são obtidos: tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}), índice de recompressão (C_r), índice de compressão (C_c) e índice de expansão (C_e).

A tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) corresponde à máxima tensão vertical efetiva a qual o solo já foi submetido ao longo da sua história. A tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) divide a curva de compressibilidade em dois trechos, o trecho de recompressão e o trecho de compressão virgem. No trecho de recompressão as deformações são preponderantemente elásticas, enquanto que no trecho de compressão virgem as deformações são majoritariamente plásticas.

Vale ressaltar que o valor da taxa de variação da compressibilidade com relação à tensão vertical efetiva é máxima quando a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) é atingida e, por esse motivo, σ'_{vm} é um parâmetro de fundamental importância para a estimativa de recalques no campo. Dentre os diversos métodos existentes para a determinação da tensão de sobreadensamento os mais difundidos no Brasil são o método de Casagrande (1936) e o método de Pacheco Silva (1970).

A relação entre a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) e a tensão vertical efetiva geostática (σ'_{v0}) é chamada de razão de sobreadensamento (RSA) que em inglês significa *over consolidation ratio (OCR)*.

O índice de recompressão é a inclinação da curva de recompressão e, portanto, é igual a:

$$C_r = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}, \text{ definido no trecho de recompressão.} \quad (2.17)$$

O índice de compressão é a inclinação da curva de compressão virgem e, portanto, é igual a:

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}, \text{ definido no trecho de compressão virgem.} \quad (2.18)$$

O índice de expansão é a inclinação da reta de expansão e, portanto, é igual a:

$$C_e = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}, \text{ definido no trecho de expansão.} \quad (2.19)$$

2.4.5 Estimativa da curva de campo “Recalque x Tempo”

A fim de estimar a curva de campo “recalque (s) x tempo (t)”, primeiramente estima-se o recalque total a tempo infinito.

A figura 2.8, a seguir, mostra um aterro de espessura H_{AT} após a construção e antes de qualquer recalque ter ocorrido (situação hipotética).

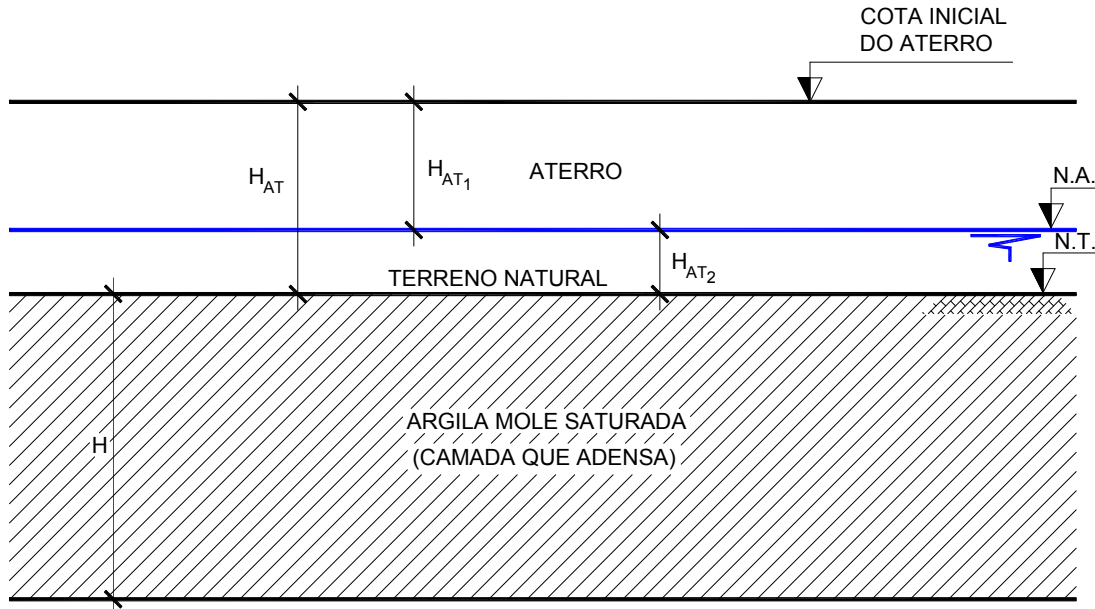


Figura 2.8: Aterro de espessura H_{AT} após a construção e antes de qualquer recalque ter ocorrido

Na figura 2.8, tem-se que:

H_{AT} = espessura total do aterro;

H_{AT1} = espessura do aterro acima do nível d'água;

H_{AT2} = espessura do aterro abaixo do nível d'água;

A camada compressível é dividida em subcamadas em função da disponibilidade de parâmetros de compressibilidade (C_r , C_c e σ'_{vm}) ao longo da profundidade e do grau de refinamento que se queira dar ao cálculo. Desta maneira, o valor do recalque total por compressão primária (s) corresponde à soma dos recalques (s_i) de cada subcamada submetida ao acréscimo de tensão vertical $\Delta\sigma_v = \gamma_{at} H_{AT1} + \gamma'_{at} H_{AT2}$, conforme a expressão:

$$s = \sum_1^n s_i , \quad (2.20)$$

calculando cada s_i de acordo com o procedimento a seguir.

$$\sigma'_{vfi} = \sigma'_{v0i} + \Delta\sigma'_v \quad (2.21)$$

Se $\sigma'_{v0i} < \sigma'_{vmi} < \sigma'_{vfi}$:

$$s_i = \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{ri} \log \left(\frac{\sigma'_{vmi}}{\sigma'_{v0i}} \right) + C_{ci} \log \left(\frac{\sigma'_{vfi}}{\sigma'_{vmi}} \right) \right] \quad (2.22)$$

Se $\sigma'_{vfi} < \sigma'_{vmi}$:

$$s_i = \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{ri} \log \left(\frac{\sigma'_{vfi}}{\sigma'_{v0i}} \right) \right] \quad (2.23)$$

Se $\sigma'_{v0i} = \sigma'_{vmi}$:

$$s_i = \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \left[C_{ci} \log \left(\frac{\sigma'_{vfi}}{\sigma'_{v0i}} \right) \right] \quad (2.24)$$

Onde:

s = recalque final,

s_i = recalque final da subcamada (i),

n = número de subcamadas em que é dividida a camada que adensa,

H_i = espessura da subcamada i,

e_{oi} = índice de vazios inicial da subcamada i ,
 C_{ri} = índice de recompressão da subcamada i ,
 C_{ci} = índice de compressão da subcamada i ,
 σ'_{vmi} = tensão de sobreadensamento no centro da subcamada i ,
 σ'_{v0i} = tensão vertical efetiva inicial no centro da subcamada i ,
 σ'_{vfi} = tensão vertical efetiva final no centro da subcamada i ,
 $\Delta\sigma'_v$ = acréscimo de tensão vertical efetiva final sofrido pelo ponto no centro da subcamada i devido ao carregamento,
 γ_{at} = peso específico do aterro e
 γ'_{at} = peso específico submerso do aterro.

Uma vez determinado o recalque final (s), o recalque da camada compressível ao longo do tempo ($s(t)$), é calculado da seguinte forma:

$$s(t) = s \bullet \overline{U_z}(t), \quad (2.25)$$

onde $\overline{U_z}(t)$ é calculado conforme expressão 2.16.

É importante ressaltar que o cálculo apresentado não leva em consideração o efeito de submersão do aterro que ocorre devido ao adensamento. O problema da submersão significa que o acréscimo de tensão vertical ($\Delta\sigma_v$) não é constante ao longo do tempo, uma vez que ocorre um alívio devido ao empuxo exercido pela água que passa a atuar no aterro que vai submergindo a medida da ocorrência do recalque.

A consideração do efeito de submersão do aterro, tanto no cálculo do recalque a tempo infinito quanto na evolução dos recalques ao longo do tempo é abordado por Martins e Abreu (2002).

É importante ressaltar, também, que o cálculo não leva em conta a diminuição da distância de drenagem ao longo do tempo, a qual pode se tornar significativa no caso de recalques elevados (grandes deformações). Este ponto também é abordado no trabalho de Martins e Abreu (2002).

2.4.6 Variações da teoria clássica

Segundo Martins e Abreu (2002), ao se abordar um problema prático de adensamento, normalmente surge uma série de dificuldades que, se consideradas, tornam-o de difícil solução.

Ainda segundo os referidos autores, essas dificuldades são de naturezas diferentes. A consideração da não “linearidade” da relação índice de vazios - tensão vertical efetiva (e x σ'_v), das grandes deformações, do carregamento variável com o tempo e do efeito de submersão do aterro com a evolução do adensamento, por exemplo, implica em dificuldades matemáticas de formulação e conseqüente solução da equação diferencial que modela o fenômeno. Por outro lado, as dificuldades de consideração do efeito do tempo sobre a relação e x σ'_v dizem respeito, antes das dificuldades matemáticas, ao entendimento do fenômeno físico propriamente dito.

2.4.7 O adensamento secundário

A curva de adensamento fornecida pela teoria clássica e a curva de adensamento experimental de laboratório apresentam boa concordância até um determinado instante, a partir do qual as curvas divergem. Enquanto a curva teórica tende para o valor da deformação final previsto pela teoria, a curva experimental continua a acusar deformações que não podem ser atribuídas à dissipação dos pequenos excessos de poropressão ainda remanescentes no corpo de prova. A essas deformações dá-se o nome de compressão secundária (ou adensamento secundário). A figura 2.9, a seguir, mostra a divergência entre as curvas.

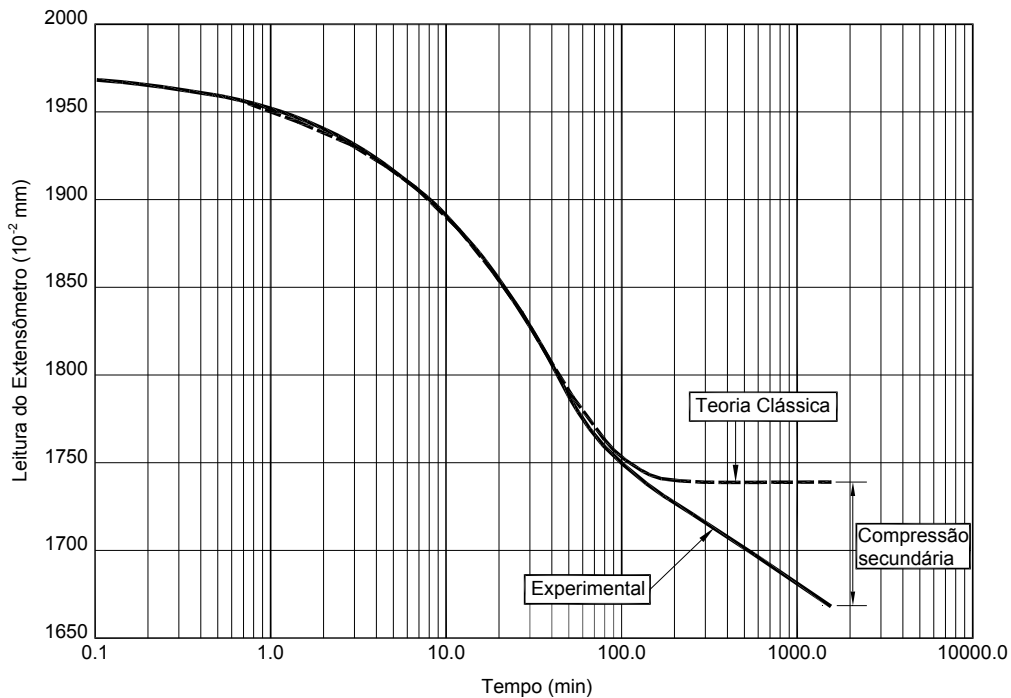


Figura 2.9: Comparação entre a curva teórica clássica e a curva experimental para um ensaio de adensamento edométrico convencional

Tal fato ocorre porque a teoria clássica só contempla as deformações que ocorrem devido à dissipação dos excessos de poropressão gerados pelo carregamento, fenômeno conhecido como adensamento primário. O adensamento secundário não é modelado pela teoria clássica.

2.5 Abordagens do adensamento secundário

2.5.1 Mecanismos do adensamento secundário (fenômeno físico)

Os mecanismos propostos para explicar o adensamento secundário podem ser divididos em quatro grupos, a saber:

1. O mesmo que o da compressão primária (Ladd, 1973; Mesri e Godlewski, 1977 e Mesri e Castro, 1987);
2. Mecanismo baseado na viscosidade estrutural devido à viscosidade da água adsorvida (Taylor e Merchant, 1940; Terzaghi, 1941; Taylor 1942; Leonards e Altschaeffl, 1964);

3. Mecanismo da teoria dos processos cinéticos (Mitchell, 1964; Kavazanjian e Mitchell, 1984, Martins e Lacerda, 1985);

4. Mecanismo baseado na existência de micro e macro poros (DeJong e Verruijt, 1965);

2.5.2 Quantificação do fenômeno (modelagem matemática)

2.5.2.1 Considerações iniciais

Existem, atualmente, duas correntes divergentes no que diz respeito à quantificação do fenômeno do adensamento dos solos.

A primeira corrente defende a idéia de que a compressão secundária só desenvolve-se após o término do adensamento primário, quando o excesso de poropressão é praticamente nulo.

A segunda corrente defende a idéia de que o adensamento primário e o adensamento secundário ocorrem simultaneamente.

2.5.2.2 Abordagem usando o parâmetro C_α

O trabalho de Buisman (1936) é o embrião da corrente que defende que a compressão secundária só tem início após o término do adensamento primário.

Esta abordagem admite que a relação entre o recalque e o logaritmo do tempo após o término do adensamento primário pode ser representado por uma linha reta. Esta reta é chamada de reta de compressão secundária e sua inclinação é um indicador da velocidade de adensamento secundário.

Na curva de adensamento em termos de índice de vazios (e), a inclinação da reta de compressão secundária é definida pelo parâmetro C_α através da expressão a seguir.

$$C_\alpha = \frac{-\Delta e}{\Delta \log t} \quad (2.26)$$

Na curva de adensamento em termos de deformação volumétrica (ϵ_v), a inclinação da reta de compressão secundária é definida pelo parâmetro $C_{\alpha\epsilon}$ através da expressão a seguir.

$$C_{\alpha\epsilon} = \frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\log t} \quad (2.27)$$

A figura 2.10, a seguir, ilustra a obtenção dos parâmetros C_α e $C_{\alpha\epsilon}$ na curva de adensamento de um ensaio de adensamento edométrico em termos de tempo em escala logarítmica.

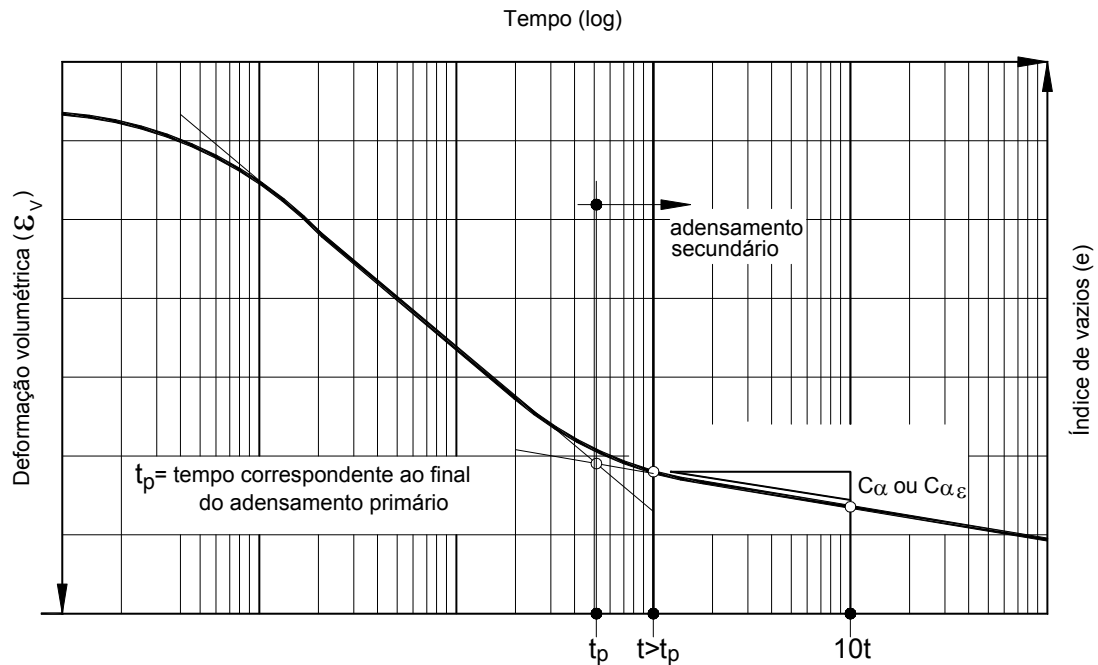


Figura 2.10: Obtenção dos parâmetros C_α e $C_{\alpha\epsilon}$ na curva de adensamento de um ensaio de adensamento edométrico

Ladd (1971) admite as seguintes hipóteses simplificadoras para essa abordagem:

1. C_α (ou $C_{\alpha\epsilon}$) independe do tempo
2. C_α (ou $C_{\alpha\epsilon}$) independe da espessura da camada que adensa.

3. C_α (ou $C_{\alpha\varepsilon}$) independe da razão de incremento da tensão ($\Delta\sigma/\sigma$), desde que o carregamento alcance a curva de compressão no trecho virgem.
4. C_α (ou $C_{\alpha\varepsilon}$) independe da tensão de adensamento para argilas normalmente adensadas que apresentem o trecho de compressão virgem retilíneo.

Mesri e Castro (1987) ainda acrescentam que quando o índice de compressão virgem (C_c) e o parâmetro (C_α) são variáveis, tem-se que a razão C_c/C_α é constante.

Martins (2005) faz as seguintes observações em relação a essa abordagem:

1. Segundo essa abordagem existe um tempo limite (t_{lim}), grande porém finito, tal que para $t > t_{lim}$, o índice de vazios é menor que zero ($e < 0$), o que é uma impossibilidade física.
2. O mecanismo é o mesmo que o adensamento primário. Mas, no adensamento primário, o índice de vazios é função exclusiva da tensão vertical efetiva, $e = f(\sigma'_v)$. E a abordagem admite que o adensamento secundário ocorre sob tensão vertical efetiva constante, $\sigma'_v = cte$, o que é uma contradição.
3. A abordagem não explica porque quanto menor o valor de $\Delta\sigma/\sigma$ mais os resultados experimentais afastam-se dos previstos pela teoria clássica.

Diante de tais constatações, o referido autor conclui que o mecanismo do adensamento secundário tem que ser diferente daquele que comanda o adensamento primário.

2.5.2.3 Discussão sobre a validade da hipótese que considera uma relação única entre índice de vazios (e) e tensão vertical efetiva (σ'_v)

As abordagens que serão apresentadas daqui em diante pertencem à segunda corrente de entendimento do fenômeno do adensamento secundário. Esta corrente sustenta-se sobre duas idéias básicas que estão intimamente ligadas:

- O chamado adensamento secundário ocorre junto com o adensamento primário.
- No domínio virgem da curva de compressão edométrica, o índice de vazios não é função exclusiva da tensão vertical efetiva.

Por isso, antes de comentar as abordagens que se seguem, é importante discutir a validade da hipótese da teoria clássica que considera, no domínio virgem, a tensão vertical efetiva como função exclusiva do índice de vazios.

Taylor (1948) mostra de maneira simples porque esta hipótese é inconsistente e pode acarretar em erros grosseiros.

Os comentários apresentados a seguir não são exatamente aqueles apresentados por Taylor (1948), embora sigam a mesma linha de raciocínio dos comentários expostos pelo referido autor.

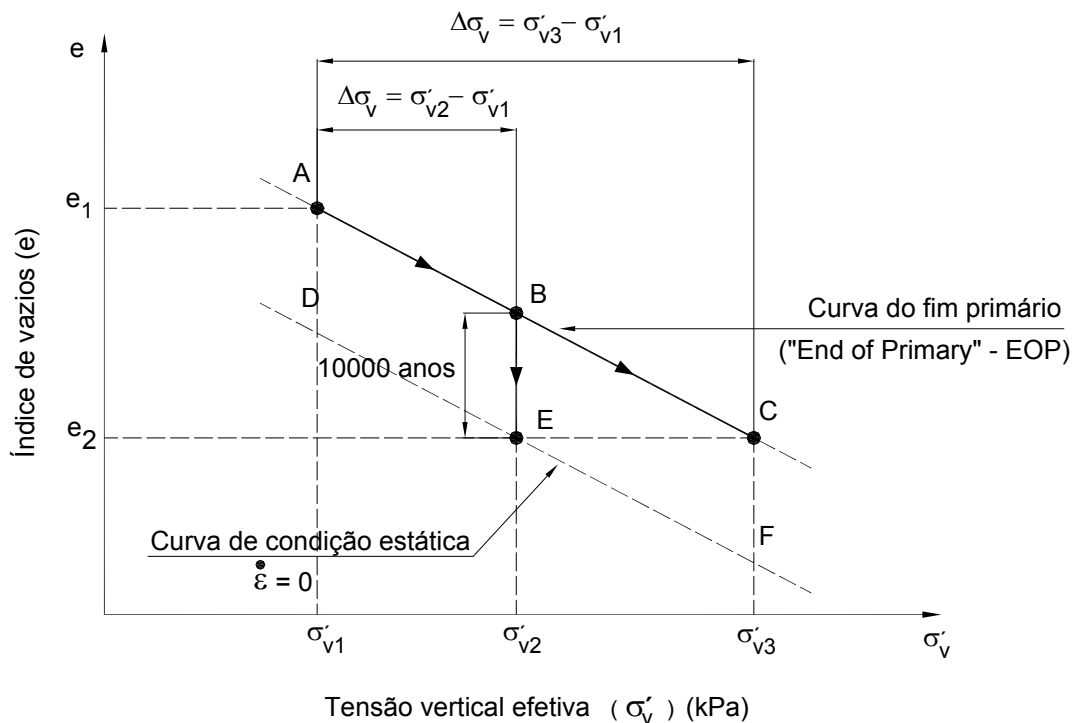


Figura 2.11: Relação única entre índice de vazios e tensão vertical efetiva – hipótese não realista

Na figura 2.11, a linha ABC retrata um trecho da curva de compressão virgem, que pode ser representado aproximadamente por uma reta, de um ensaio de adensamento edométrico convencional correspondente ao fim do adensamento primário (“End of primary” - EOP).

Suponha-se que, no ensaio de adensamento edométrico convencional, um corpo de prova “a” de índice de vazios e_1 sofre um incremento de tensão vertical efetiva ($\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v2} - \sigma'_{v1}$) indo do ponto A ao ponto B por compressão primária, e do ponto B ao ponto E por compressão secundária durante 10000 anos conforme modelo de Bjerrum (1967). Ao atingir o ponto E, pode-se considerar que a parcela de compressão secundária que falta a ocorrer é tão pequena que o solo está sob condição estática, ou seja, a velocidade de deformação específica é muito próxima de zero ($\dot{\epsilon} = 0$). Neste momento o índice de vazios do corpo de prova é e_2 .

Um corpo de prova “b”, idêntico ao corpo de prova “a”, é submetido a um incremento de tensão vertical efetiva ($\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v3} - \sigma'_{v1}$) indo do ponto A ao ponto C por compressão primária. No ponto C o índice de vazios é e_2 e a tensão vertical efetiva é σ'_{v3} . Neste momento, a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) ainda é consideravelmente maior do que zero, pois ainda falta ocorrer toda compressão secundária.

Assim sendo, têm-se para o mesmo índice de vazios e_2 , o corpo de prova “a” sob tensão vertical efetiva σ'_{v2} , e o corpo de prova “b” sob tensão vertical efetiva σ'_{v3} . Diante disso, torna-se claro que não pode existir uma relação única entre o índice de vazios e a tensão vertical efetiva no domínio virgem.

Diante do fato da velocidade de deformação específica do corpo de prova “b” no ponto C ser maior do que a velocidade de deformação específica do corpo de prova “a” no ponto E ($\dot{\epsilon}_C > \dot{\epsilon}_E$), e a tensão vertical efetiva do corpo de prova “b” no ponto C ser maior do que a tensão vertical efetiva do corpo de prova “a” no ponto E ($\sigma'_{v3} > \sigma'_{v2}$) poder-se-ia concluir que, sob condição edométrica, para um mesmo solo com o mesmo índice de vazios, quanto maior for a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) maior será a tensão vertical efetiva (σ'_v).

Em decorrência disso Taylor (1942) propõe que a tensão vertical efetiva seja dividida em duas parcelas, uma suportada pelos contatos sólidos que ocorrem entre os grãos (σ'_{vs}) e a outra suportada pela resistência viscosa quando os contatos entre os grãos se fazem pela água adsorvida que recobre as partículas sólidas (σ'_{vv}).

Assim, de acordo com essa concepção, a tensão vertical efetiva pode ser escrita por:

$$\sigma'_v = \sigma'_{vs} + \sigma'_{vv}, \quad (2.28)$$

A parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva é função exclusiva do índice de vazios:

$$\sigma'_{vs} = f(e). \quad (2.29)$$

A parcela viscosa da tensão vertical efetiva é função exclusiva da velocidade de deformação específica:

$$\sigma'_{vv} = f(\dot{\mathcal{E}}). \quad (2.30)$$

Quando a velocidade de deformação específica é nula ($\dot{\mathcal{E}}=0$) a parcela viscosa da tensão vertical efetiva também o é ($\sigma'_{vv} = 0$) e, neste caso:

$$\sigma'_v = \sigma'_{vs}, \quad (2.31)$$

que corresponde ao ponto E da figura 2.11.

Finalizando, para um mesmo índice de vazios, quanto maior a velocidade de deformação específica ($\dot{\mathcal{E}}$), maior é a parcela viscosa da tensão vertical efetiva (σ'_{vv}). Esta seria a explicação do porquê, para um mesmo índice de vazios, quanto maior for a velocidade de deformação ($\dot{\mathcal{E}}$) maior será a tensão vertical efetiva (σ'_v).

2.5.2.4 Abordagem de Taylor e Merchant (1940)

A teoria de Taylor e Merchant (1940) incorpora o adensamento secundário na equação diferencial do adensamento unidimensional, fornecendo uma melhor concordância com a curva experimental de laboratório do que a teoria clássica.

A equação do adensamento unidimensional pode ser escrita como:

$$\frac{k(1+e_o)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma'_v}{\partial z^2} = -\frac{\partial e}{\partial t} \quad (2.32)$$

Na teoria clássica, o índice de vazios é função exclusiva da tensão vertical efetiva. Essas grandezas relacionam-se por meio do coeficiente de compressibilidade (a_v) através da seguinte expressão:

$$de = -a_v d\sigma'_v \quad (2.33)$$

E como:

$$\sigma'_v = cte \rightarrow d\sigma'_v = -du \quad (2.34)$$

A equação do adensamento segundo a teoria clássica assume então a seguinte forma:

$$\frac{k(1+e_o)}{a_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.35)$$

Na teoria de Taylor e Merchant (1940) o índice de vazios não é função exclusiva da tensão vertical efetiva.

A figura 2.12, a seguir, apresenta a lei constitutiva adotada na teoria.

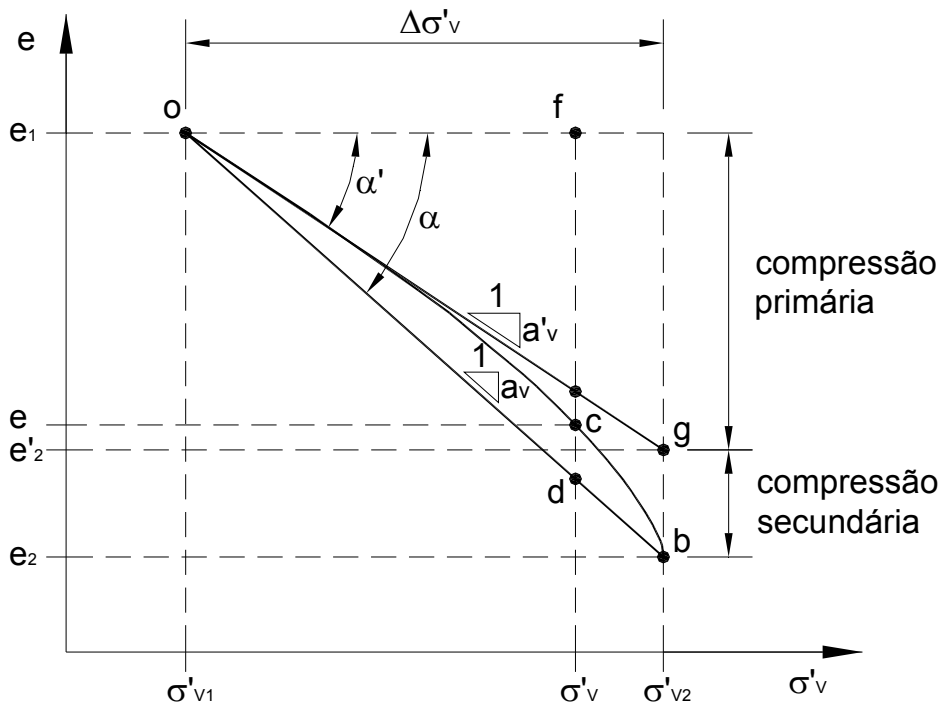


Figura 2.12: Lei constitutiva da teoria de Taylor e Merchant (1940)

Na figura 2.12, tem-se que:

$$\Delta\sigma'_v = \sigma'_{v2} - \sigma'_{v1} \quad (2.36)$$

σ'_{v1} : tensão vertical efetiva inicial;

σ'_{v2} : tensão vertical efetiva final;

$\Delta\sigma'_v$: incremento de tensão vertical efetiva;

e_1 : índice de vazios inicial;

e_2 : índice de vazios final;

$$\operatorname{tg}(\alpha') = a'_v = \frac{e_1 - e'_2}{\sigma'_{v2} - \sigma'_{v1}} \quad (2.37)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = a_v = \frac{e_1 - e_2}{\sigma'_{v2} - \sigma'_{v1}} \quad (2.38)$$

$e_1 - e_2$: variação do índice de vazios correspondente à compressão total.

$e_1 - e'_2$: variação do índice de vazios correspondente à compressão primária.

$e'_2 - e_2$: variação do índice de vazios correspondente à compressão secundária.

a'_v : coeficiente de compressão primária.

$$r = \frac{a'_v}{a_v} = \frac{e_1 - e'_2}{e_1 - e_2} \quad (2.39)$$

r : razão entre o recalque total por adensamento primário e o recalque total por adensamento primário mais secundário.

A taxa de variação do índice de vazios em relação ao tempo é composta de duas parcelas, uma correspondente ao adensamento primário e outra correspondente ao adensamento secundário.

$$\frac{de}{dt} = \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.40)$$

Onde:

$\frac{de}{dt}$: taxa de variação do índice de vazios em relação ao tempo;

$\frac{\partial e}{\partial t}$: parcela correspondente ao adensamento secundário;

$\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$: parcela correspondente ao adensamento primário.

A expressão acima pode ser expressa em palavras da seguinte maneira:

“A velocidade de variação do índice de vazios de um ponto no interior da massa de solo é igual à velocidade de variação do índice de vazios caso não houvesse

variação da tensão vertical efetiva (adensamento secundário) mais o produto entre $\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}$ e a velocidade de variação da tensão vertical efetiva $\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$ (adensamento primário).”

Na teoria clássica, $\frac{\partial e}{\partial t}$ não é considerado, e $\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v}$ é admitido como constante e igual à $-a_v$ (a_v - coeficiente de compressibilidade).

Na teoria de Taylor e Merchant (1940), considera-se que a primeira parte do adensamento processa-se ao longo da reta \overline{og} (ver figura 2.12). No final do processo o índice de vazios é e_2 (ponto b). A curva que representa o caminho seguido pelo índice de vazios e a tensão vertical efetiva é a curva ocb entre as retas \overline{og} e \overline{ob} . Ao passar pelo ponto “c”, a tensão vertical efetiva é σ'_v e a variação do índice de vazios é \overline{fc} . Neste ponto, o segmento \overline{cd} representa a parcela de compressão secundária que ainda faltaria a ocorrer caso o incremento de tensão tivesse sido $\Delta\sigma'_v = \sigma'_v - \sigma'_{v1}$.

A teoria assume a hipótese de que $\frac{\partial e}{\partial t}$ é proporcional ao segmento \overline{cd} . Desta forma:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\mu(\overline{cd}) \quad (2.41)$$

Onde:

μ : coeficiente de proporcionalidade chamado pela teoria de coeficiente de compressão secundária.

Como:

$$\overline{cd} = \overline{fd} - \overline{fc} \quad (2.42)$$

$$\overline{fc} = e_1 - e \quad (2.43)$$

$$\overline{fd} = a_v \bullet \overline{of} \rightarrow \overline{fd} = a_v (\sigma'_v - \sigma'_{v1}) \quad (2.44)$$

A expressão (2.41) fica:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\mu [a_v (\sigma'_v - \sigma'_{v1}) - (e_1 - e)] \quad (2.45)$$

Portanto, a taxa de variação do índice de vazios em relação ao tempo (expressão 2.40) assume a seguinte forma:

$$\frac{de}{dt} = -\mu [a_v (\sigma'_v - \sigma'_{v1}) - (e_1 - e)] - a'_v \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.46)$$

Substituindo a expressão 2.46 na expressão 2.32 (equação do adensamento) tem-se que:

$$\frac{k(1 + e_o)}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \sigma'_v}{\partial z^2} = -\mu [a_v (\sigma'_v - \sigma'_{v1}) - (e_1 - e)] - a'_v \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.47)$$

A expressão acima é a equação do adensamento segundo a teoria de Taylor e Merchant (1940).

A primeira parcela do termo à direita corresponde ao adensamento secundário e a segunda parcela corresponde ao adensamento primário.

A resolução da equação acima para a drenagem vertical pura fornece a seguinte solução:

$$\overline{U}_{TM} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{FM^2} [(\psi_1 - \psi_2)(\psi_3 - 1)e^{(\psi_1 + \psi_2)T} - (\psi_1 + \psi_2)(\psi_3 + 1)e^{(\psi_1 - \psi_2)T}], \quad (2.48)$$

Sendo:

$$M = (2m + 1) \frac{\pi}{2}, \quad (2.49)$$

$$T = \frac{k(1 + e_0)}{a'_v \gamma_w} \frac{t}{H_d^2} = \frac{c_v t}{H_d^2}, \quad (2.50)$$

$$F = \frac{\mu t}{rT} = \frac{\mu H_d^2}{rc_v}, \quad (2.51)$$

$$r = \frac{a'_v}{a_v} \leq 1, \quad (2.52)$$

$$\psi_1 = -\frac{1}{2}(F + M^2), \quad (2.53)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{2} \sqrt{(F + M^2)^2 - 4rFM^2}, \quad (2.54)$$

$$\psi_3 = \frac{\psi_1 + M^2}{\psi_2} e \quad (2.55)$$

$$\bar{U}_{TM} = f(r, F, T). \quad (2.56)$$

Onde:

\bar{U}_{TM} = grau de adensamento médio,

γ_w = peso específico da água,

k = coeficiente de permeabilidade,

t = tempo,

T = Fator tempo,

c_v = coeficiente de adensamento,

H_d = distância de drenagem,

r = razão entre o recalque total por adensamento primário e o recalque total por adensamento primário mais secundário
 μ = coeficiente de proporcionalidade chamado pela teoria de coeficiente de compressão secundária.

Segundo Taylor e Merchant (1940), a velocidade do adensamento secundário é proporcional ao coeficiente μ e independe da distância de drenagem (H_d). Desta forma, o parâmetro F traduz a razão entre a velocidade do adensamento secundário e a velocidade do adensamento primário.

Segundo o que foi exposto, quanto menor o valor de F maior é a velocidade do adensamento primário em relação ao adensamento secundário e, conseqüentemente, mais tardiamente o adensamento secundário manifesta-se em relação ao primário.

A figura 2.13, a seguir, mostra a porcentagem média de adensamento (\bar{U}_{TM}) x fator tempo (T) dada pela teoria de Taylor e Merchant (1940) para diferentes valores de F , e para $r=0,7$.

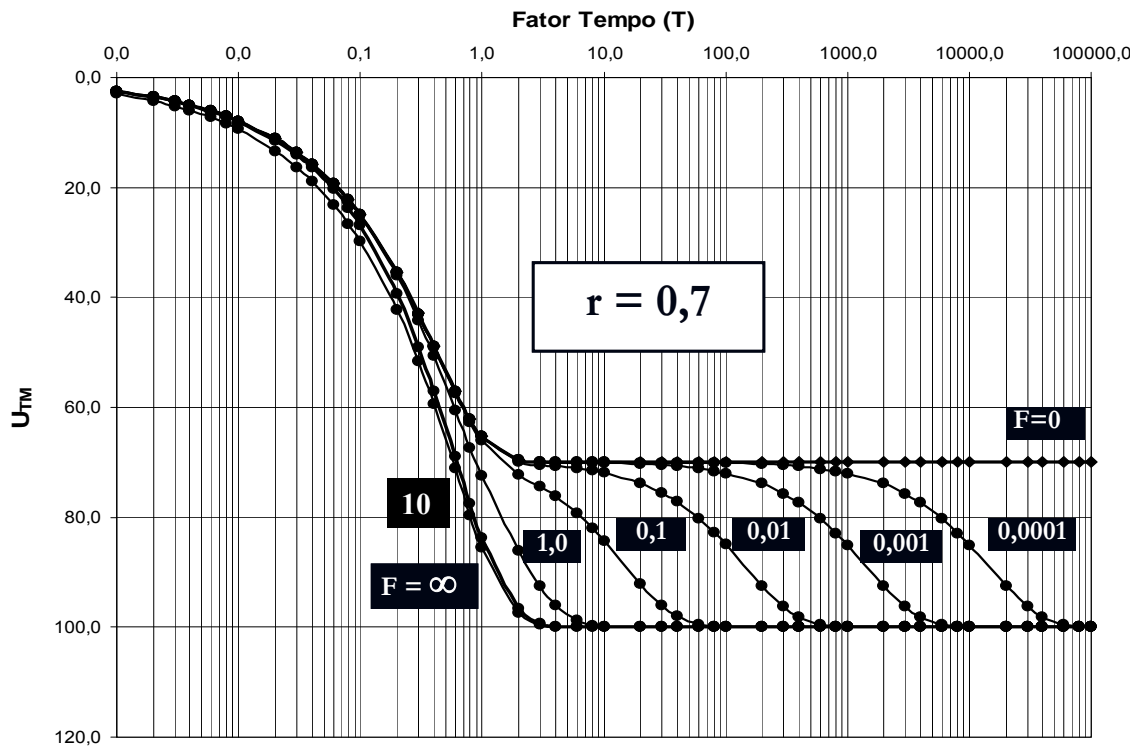


Figura 2.13: Curvas de Taylor e Merchant (1940) para diferentes valores de F para $r = 0,7$

O parâmetro F de laboratório, cuja distância de drenagem (H_d) é aproximadamente igual a 1cm, é da ordem de 10^{-4} . Já o parâmetro F de campo, cuja distância de drenagem (H_d) é usualmente centenas de centímetros, é da ordem de 10. Portanto, o atraso com que o adensamento secundário manifesta-se em relação ao primário é muito menor no campo do que no laboratório.

Isto ajuda a explicar o fato dos coeficientes de adensamento (c_v) retroanalizados através de interpretação de instrumentação geotécnica de campo serem maiores do que os determinados através de ensaios de laboratório. Isto ocorre porque a retroanálise é feita através da teoria clássica que contempla apenas o adensamento primário, porém com valores de recalques “primários” contaminados pelo adensamento secundário. Com isso, superestimam-se as porcentagens médias de adensamento com conseqüente hiperestimativa do valor de c_v .

A comparação entre as curvas $\bar{U}_{TM} \times T$ para diferentes valores de F também mostra que as curvas que estão no domínio $F \geq 10$ praticamente não apresentam diferença uma em relação à outra. Por esta razão, para estimativa de evolução dos recalques ao longo do tempo no campo não é necessário determinar o parâmetro F em laboratório e é recomendável o emprego de $F = \infty$.

Martins (2005) lista os seguintes pontos favoráveis e desfavoráveis da abordagem de Taylor e Merchant (1940):

1. Pontos favoráveis:

- 1.1 O adensamento secundário tem magnitude e tem um fim.
- 1.2 Explica o efeito de $\Delta\sigma/\sigma$.
- 1.3 Explica a diferença entre “ c_v de campo” e “ c_v de laboratório”.

2. Pontos desfavoráveis:

- 2.1 Não há um mecanismo explícito para o secundário.
- 2.2 O princípio das tensões efetivas não é válido, pois há variação de volume sem variação de σ'_v . Para isto basta observar a equação diferencial para $\sigma'_v = \sigma'_{v0}$
- 2.3 Não explica o que ocorre com σ'_h durante o processo.
- 2.4 Só é aplicável aos solos normalmente adensados. O caminho no plano $e-\sigma'_v$ parte de um ponto sobre a curva de final de compressão primária (EOP – “End of primary”).
- 2.5 É preciso saber a priori a razão entre a compressão primária e a compressão total (valor do parâmetro r).
- 2.6 O adensamento secundário nos ensaios de laboratório se dá mais rapidamente do que o previsto pela teoria.

2.5.2.5 Abordagem de Martins e Lacerda (1985)

Lacerda (1976) realizou ensaios de adensamento na câmara triaxial em amostras indeformadas de argila mole da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA. Tais ensaios tinham o intuito de investigar o comportamento de K_0 durante a compressão secundária.

Para isso, a amostra era adensada ao longo da reta K_0 e, após o “fim” do adensamento primário, permitia-se que o corpo de prova entrasse no processo de adensamento secundário. As diferenças entre as deformações volumétricas (ϵ_v) e as deformações axiais (ϵ_a) observadas durante o adensamento primário eram pequenas o suficiente para considerar que o ensaio estava realmente sendo realizado sob condições muito próximas da condição edométrica, deformação radial nula ($\epsilon_r=0$).

Admitindo que:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad (2.57)$$

e sob condição de simetria axial, tem-se que:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r \rightarrow \varepsilon_r = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_a}{2} \quad (2.58)$$

Após o fim do adensamento primário, durante o adensamento secundário, no qual a tensão vertical efetiva (σ'_v) permanece constante, constatou-se que era necessário aumentar continuamente a tensão de confinamento (σ_3) a fim de não permitir deformações radiais do corpo de prova. O aumento da tensão horizontal efetiva (σ'_h) via aumento da tensão de confinamento (σ_3) sob tensão vertical efetiva (σ'_v) constante significa aumento de K_0 e diminuição da tensão desviadora (σ_d). Vale lembrar que a diminuição da tensão desviadora (σ_d) sob um estado de deformações constante é um fenômeno conhecido em Mecânica dos Solos como “relaxação de tensões”.

Lembrando que:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad e \quad (2.59)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.60)$$

Martins e Lacerda (1985) associaram a compressão secundária com o processo de relaxação de tensões cisalhantes e, por conseguinte, diminuição da tensão desviadora (σ_d) que, sob tensão vertical efetiva constante, ocorre via aumento da tensão horizontal efetiva (σ'_h) e, conseqüentemente, aumento de K_0 .

Os referidos autores chamam a atenção para dois pontos de extrema importância, a saber:

1. Se o fenômeno do adensamento secundário é devido à existência de tensões cisalhantes, este deve ocorrer desde o início do processo e, portanto, em concomitância com o adensamento primário.
2. Sob esse enfoque, o adensamento secundário é coberto pelo princípio das tensões efetivas, uma vez que, o aumento da tensão horizontal efetiva (σ'_h) significa aumento da tensão octaédrica efetiva (σ'_{oct}), o que justificaria a deformação volumétrica do adensamento secundário.

Lembrando que:

$$\sigma'_{oct} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3}{3} \quad (2.61)$$

E no adensamento edométrico tem-se que:

$$\sigma'_1 = \sigma'_v \text{ e } \sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma'_h, \text{ e portanto: } \sigma'_{oct} = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} \quad (2.62)$$

A figura 2.14, a seguir, apresenta o caminho de tensões percorrido pelo corpo de prova no ensaio de adensamento edométrico durante a compressão primária e a compressão secundária no plano $p' \times q$ segundo Martins e Lacerda (1985).

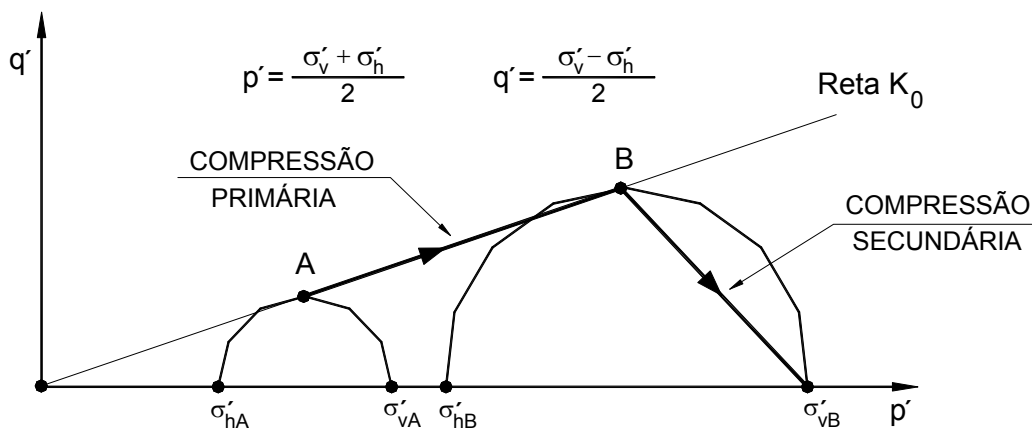


Figura 2.14: Caminho hipotético de tensões no plano $p' \times q$ seguido pelo solo durante a compressão secundária (Martins e Lacerda, 1985)

Analisando a figura 2.14, a relaxação de tensões cisalhantes ocorre via aumento de σ'_h tendendo a se igualar à σ'_v quando então o círculo de Mohr transforma-se em um ponto. Este momento seria o fim da compressão secundária com total dissipação das tensões cisalhantes, coeficiente de empuxo no repouso (K_0) igual a 1 e velocidade de deformação específica nula ($\dot{\epsilon} = 0$).

Com isso, Martins e Lacerda (1985) modificaram a figura apresentada por Bjerrum (1967) introduzindo um terceiro eixo correspondente a K_0 . A figura 2.15, a seguir, mostra a figura apresentada por Bjerrum (1967) modificada por Martins e Lacerda (1985).

Na figura 2.15, o corpo de prova percorre o trecho AB por adensamento primário e o trecho BC por adensamento secundário. Durante o adensamento primário ocorre aumento da tensão vertical efetiva (σ'_v) e o coeficiente de empuxo no repouso (K_0) mantêm-se constante igual a K_{0n} . Durante o adensamento secundário, a tensão vertical efetiva (σ'_v) permanece constante e K_0 aumenta atingindo o valor unitário a tempo infinito.

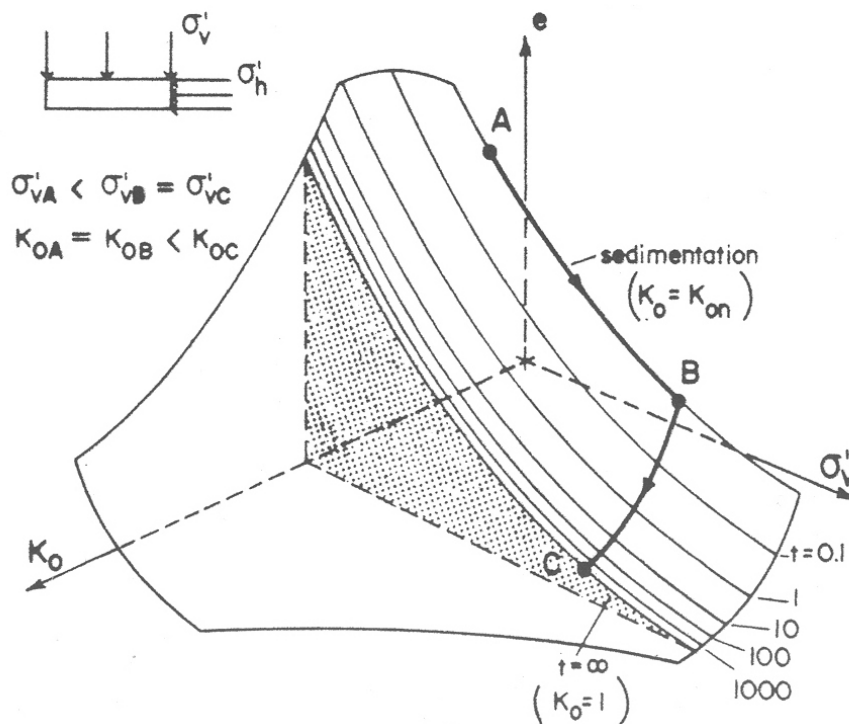


Figura 2.15: Relação entre índice de vazios (e), tensão vertical efetiva (σ'_v) e coeficiente de empuxo no repouso (K_0) (Martins e Lacerda, 1985).

Martins e Lacerda (1985) associaram as curvas de tempo a curvas de velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$), sendo que a linha de final de compressão secundária é a linha de velocidade de deformação específica nula ($\dot{\epsilon} = 0$).

Seguindo essa linha de raciocínio, Martins e Lacerda (1985) elaboraram uma teoria do adensamento unidimensional incluindo o adensamento secundário.

As hipóteses admitidas nesta teoria são as mesmas consideradas pela teoria clássica com o acréscimo de mais duas hipóteses, a saber:

- O solo é considerado isotrópico;
- Ocorre relaxação de tensões cisalhantes ao longo do tempo. Este processo ocorre de tal modo que a taxa de variação da tensão desviadora em relação ao tempo (dq/dt) é diretamente proporcional ao seu valor corrente. Sendo assim:

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda q, \quad (2.63)$$

onde λ é um coeficiente que depende do tipo de solo e controla a velocidade do adensamento secundário.

Com isso, Martins e Lacerda (1985) chegam à seguinte expressão para a deformação volumétrica (ϵ_v) do corpo de prova no ensaio de adensamento edométrico em um instante t qualquer:

$$\epsilon_v(t) = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{v0}}{M'} + \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{v0}}{M'} (1 - K_{on}) [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (2.64)$$

Onde:

σ'_{v0} = tensão vertical efetiva inicial.

$\sigma'_v(t)$ = tensão vertical efetiva em um instante t qualquer.

M' = módulo de deformação volumétrica.

A expressão 2.64 é composta por duas componentes:

$$\varepsilon_v(t) = \varepsilon_{vp}(t) + \varepsilon_{vs}(t), \quad (2.65)$$

onde:

$\varepsilon_v(t)$ = deformação volumétrica total em um dado instante t;

$\varepsilon_{vp}(t)$ = deformação volumétrica associada à compressão primária em um dado instante t;

$\varepsilon_{vs}(t)$ = deformação volumétrica associada à compressão secundária em um dado instante t.

A primeira componente que está associada à compressão primária é:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \frac{\sigma'_v(t) - \sigma'_{v0}}{M'} \quad (2.66)$$

Esta expressão pode ser calculada pela teoria clássica e é escrita como:

$$\varepsilon_{vp}(t) = \frac{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}}{M'} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \left[\text{sen}(2n+1) \frac{\pi z}{2H} \right] \exp\left(-\pi^2(2n+1)^2 \frac{T_v}{4}\right) \right\}, \quad (2.67)$$

onde:

σ'_{vf} = tensão vertical efetiva final;

z = distância em relação ao topo da camada que adensa;

2H = espessura da camada compressível;

T_v = fator tempo.

c_v = coeficiente de adensamento da teoria clássica;

A segunda componente, que independe de z, está associada à compressão secundária e é escrita como:

$$\varepsilon_{vs}(t) = \frac{2}{3} \frac{\sigma'_{v0}}{M'} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\lambda t)] \quad (2.68)$$

A figura 2.16, a seguir, ilustra o caminho seguido durante o adensamento primário unidimensional com compressão primária e secundária ocorrendo simultaneamente no plano e-log σ'_v , segundo Martins e Lacerda (1985).

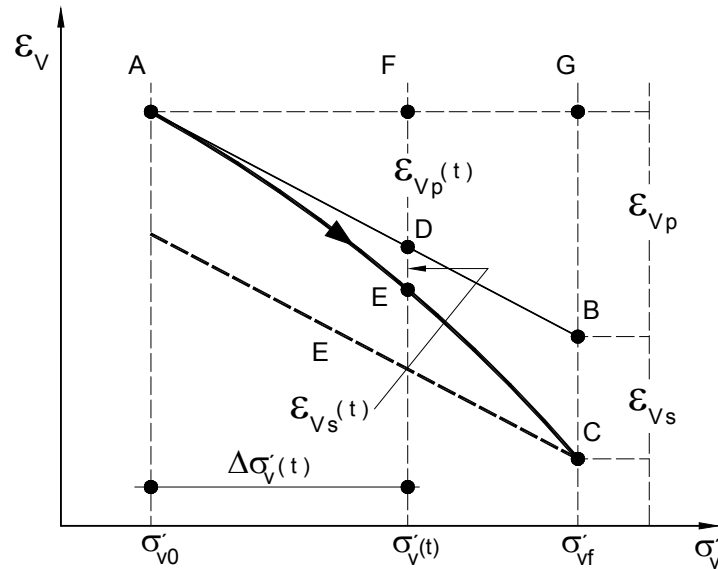


Figura 2.16: Caminho seguido durante o adensamento primário unidimensional com compressão primária e secundária ocorrendo simultaneamente (Martins e Lacerda, 1985)

Na figura 2.16 tem-se que:

σ'_{v0} = tensão vertical efetiva inicial;

σ'_{vf} = tensão vertical efetiva final;

$\sigma'_v(t)$ = tensão vertical efetiva em um dado instante t;

ϵ_{vp} = deformação volumétrica final associada à compressão primária;

ϵ_{vs} = deformação volumétrica final associada à compressão secundária;

$\epsilon_{vp}(t)$ = deformação volumétrica em um dado instante t associada à compressão primária;

$\epsilon_{vs}(t)$ = deformação volumétrica em um dado instante t associada à compressão secundária.

Os autores chamam a atenção para o fato das duas componentes ocorrerem simultaneamente ao longo do tempo e, portanto, na figura 2.16, o caminho percorrido pelo elemento de solo não é o ABC, mas sim o AEC.

Em qualquer instante de tempo t é possível calcular o grau de adensamento primário (U_{zp}) pela expressão:

$$U_{zp} = \frac{\overline{FD}}{\overline{GB}} = \frac{\sigma'_{vp}(t) - \sigma'_{v0}}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}} = \frac{\varepsilon_{vp}(t)}{\varepsilon_{vp}} \quad (2.69)$$

Da mesma forma, o grau de adensamento secundário (U_{zs}) é:

$$U_{zs} = \frac{\overline{DE}}{\overline{BC}} = \frac{\varepsilon_{vs}(t)}{\varepsilon_{vs}} \quad (2.70)$$

E, portanto:

$$U_{zs} = 1 - \exp(-\lambda t) \quad (2.71)$$

O grau de adensamento global é definido como:

$$U_z = \frac{\varepsilon_{vp}(t) + \varepsilon_{vs}(t)}{\varepsilon_{vp} + \varepsilon_{vs}} \quad (2.72)$$

ou ainda:

$$U_z(z, t) = \frac{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N} \left(\text{sen} \frac{Nz}{H} \right) \exp(-N^2 T_v) \right] + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\lambda t)]}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0} + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n})} \quad (2.73)$$

$$\text{onde: } N = \frac{\pi}{2} (2n + 1) \quad (2.74)$$

O grau de adensamento médio (\overline{U}_z) em determinado instante t é então dado por:

$$\bar{U}_z = \frac{\int_0^{2H} \varepsilon_v(z, t) dz}{\int_0^{2H} \varepsilon_v(z, \infty) dz} \quad (2.75)$$

Substituindo na expressão acima as expressões de $\varepsilon_v(z, t)$ e $\varepsilon_v(z, \infty)$ para o caso particular em que $(\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0})$ é constante ao longo de toda a camada que adensa e resolvendo a integral tem-se que:

$$\bar{U}_z = \frac{(\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0}) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} \exp(-N^2 T_v) \right]}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0} + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\lambda t)]}{\sigma'_{vf} - \sigma'_{v0} + \frac{2}{3} \sigma'_{v0} (1 - K_{0n})}, \quad (2.76)$$

Fazendo $\lambda t = \theta T_v$ e dividindo toda a expressão por σ'_{v0} tem-se que:

$$\bar{U}_z = \frac{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1 \right) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} \exp(-N^2 T_v) \right]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\theta T_v)]}{\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1 \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{0n})} \quad (2.77)$$

Finalmente, substituindo $\left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} - 1 \right)$ por $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$, a expressão passa a ser:

$$\bar{U}_z = \frac{\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) \left[1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{N^2} \exp(-N^2 T_v) \right]}{\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{0n})} + \frac{\frac{2}{3} (1 - K_{0n}) [1 - \exp(-\theta T_v)]}{\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) + \frac{2}{3} (1 - K_{0n})}, \quad (2.78)$$

$$\text{onde: } \theta = \frac{\lambda t}{T_v}. \quad (2.79)$$

A primeira parcela da soma corresponde ao adensamento primário, enquanto que a segunda parcela corresponde ao adensamento secundário.

É interessante destacar duas interpretações importantes da expressão acima:

1. Quanto menor o valor de θ (ou λ), mais lentamente o adensamento secundário desenvolve-se.
2. Quanto menor o valor de $\Delta\sigma/\sigma$, maior é a importância da compressão secundária na compressão total.

É importante mencionar que o trabalho realizado por Vieira (1988) dá respaldo experimental às interpretações mencionadas acima.

Os parâmetros c_v e θ são obtidos por ajuste da curva teórica à experimental. Tal procedimento é descrito por Vieira (1988).

2.5.2.6 Abordagem de Leroueil (1985)

Leroueil et al (1985) apresentam um modelo reológico para o adensamento unidimensional de argilas naturais baseado em resultados de ensaios edométricos de quatro tipos: convencional, CRS (no qual a velocidade de deformação é constante), CGTs (no qual o gradiente da poropressão entre a base e o topo é mantido constante) e adensamento secundário.

As amostras submetidas aos ensaios mencionados acima foram extraídas em cinco diferentes regiões do leste do Canadá. A tabela 2.1, a seguir, apresenta as propriedades geotécnicas das argilas dessas regiões segundo Leroueil et al (1985).

Tabela 2.1: Propriedades geotécnicas de algumas argilas do leste do Canadá (Leroueil et al 1985)

Local	Prof. (m)	Umidade (%)	Índice de plasticidade (%)	Fração argila (%)	Sensitividade (ensaio de cone)	Su (ensaio de palheta de campo) (kPa)	Tensão vertical efetiva de campo (kPa)	Tensão de sobreadensamento (kPa)
Batiscan	7,3	79,6	21	81	125	25	65	88
Joliette	6,7	65,0	19	54	96	29	40	115
Louiseville	9,2	76,5	43	81	28	45	58	160
Mascouche	3,8	67,6	30	77	65	70	34	270
St. Césaire	6,8	84,8	43	84	22	27	68	90

A argila de Batiscan foi submetida a oito ensaios do tipo CRS, nos quais a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) é constante e a tensão vertical efetiva (σ'_v) sofre um aumento contínuo, e a nove ensaios de adensamento secundário, nos quais a tensão vertical efetiva (σ'_v) é constante após o “fim” do adensamento primário, portanto, a taxa de variação da tensão vertical efetiva ($\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$) é nula.

Os oito ensaios do tipo CRS foram executados cada qual com uma determinada velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) que variaram de $1,7 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ a $1,4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Os resultados dos ensaios CRS são apresentados na figura 2.17, a seguir.

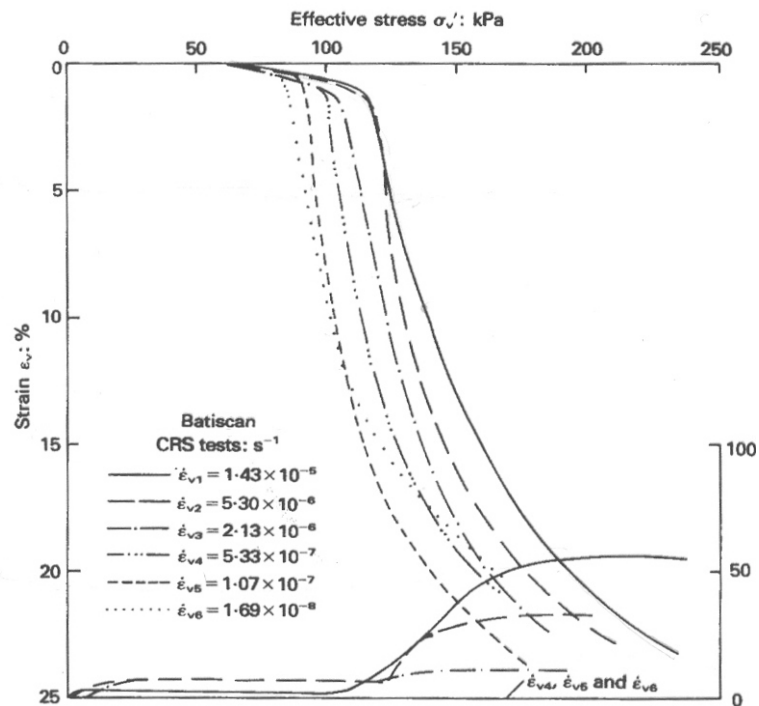


Figura 2.17: Ensaios de adensamento edométrico do tipo CRS feitos na argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

A figura 2.17 mostra que, para uma dada deformação volumétrica (ϵ_v), quanto maior a velocidade de deformação volumétrica ($\dot{\epsilon}$) maior é a tensão vertical efetiva (σ'_v).

Observa-se que quanto menor a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) maior é a contaminação do adensamento primário pelo secundário, o que faz com que a curva translade para esquerda e para baixo. O valor atribuído à tensão de sobreadensamento é tanto menor quanto menor for a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$).

Em todos os nove ensaios de adensamento secundário, o corpo de prova era carregado em estágios até a tensão vertical efetiva de campo (σ'_{v0}). Posteriormente, o corpo de prova era carregado em um único estágio até a tensão vertical final do ensaio (σ'_{vf}), que variou entre 67 kPa e 151 kPa, quando então permanecia sob esta tensão por um período mínimo de 70 dias.

Os resultados dos ensaios de adensamento secundário estão apresentados nas figuras 2.18 e 2.19, a seguir.

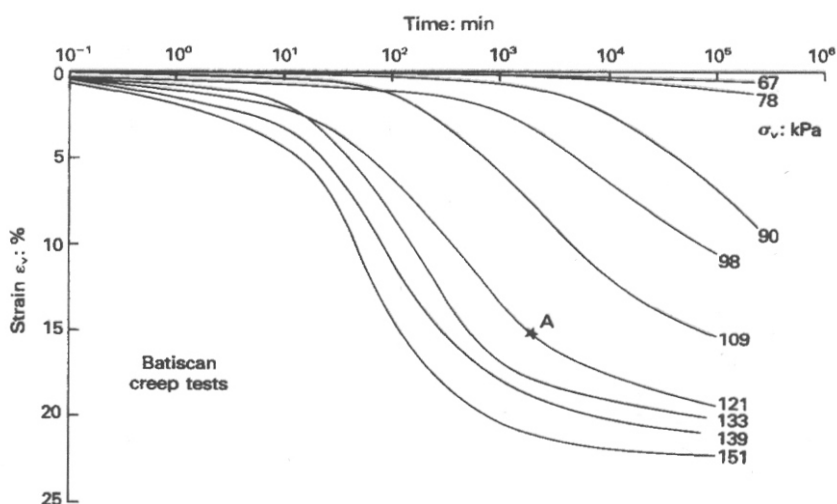


Figura 2.18: Curvas “tempo x deformação (ϵ_v)” dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

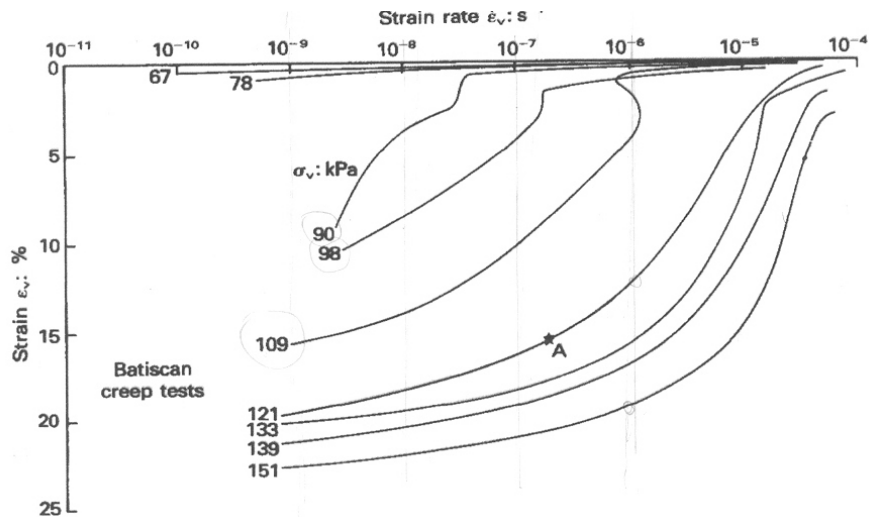


Figura 2.19: Curvas “deformação (ϵ_v) x velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$)” dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

Leroueil et al (1985) chamam a atenção para o fato da poropressão não ter sido medida nos ensaios de adensamento secundário. Ainda assim, baseando-se no formato das curvas e em experiências com outras argilas, os referidos autores acreditam que para $\dot{\epsilon} \leq 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ as poropressões eram tão pequenas que se pode considerar que a tensão vertical efetiva (σ'_v) no corpo de prova era praticamente igual à tensão vertical aplicada (σ_v).

Desta forma, a partir dos resultados dos ensaios de adensamento secundário foi possível definir relações tensão-deformação para as velocidades de deformação ($\dot{\epsilon}$) iguais a 10^{-6} s^{-1} , 10^{-7} s^{-1} , 10^{-8} s^{-1} e 10^{-9} s^{-1} . A figura 2.20, a seguir, apresenta as curvas obtidas.

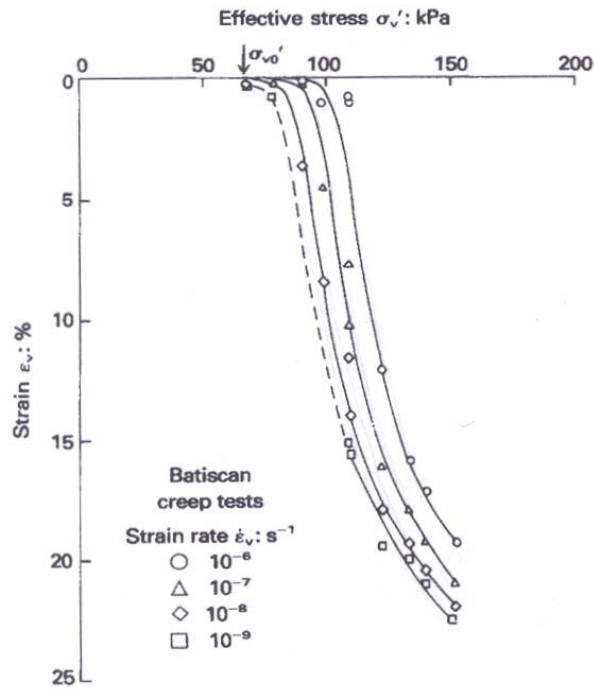


Figura 2.20: Curvas de compressibilidade de igual velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) deduzidas a partir dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

É interessante destacar o fato do formato das curvas de compressibilidade deduzidas a partir dos ensaios de adensamento secundário ser igual ao formato das curvas obtidas nos ensaios do tipo CRS.

Nos ensaios do tipo CRS, a tensão vertical efetiva (σ'_v) é continuamente incrementada, enquanto que no ensaio de adensamento secundário a tensão vertical efetiva permanece constante para $\dot{\epsilon} \leq 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ e, portanto, a taxa de variação da tensão vertical efetiva ($\dot{\sigma}'_v$) é nula. Assim sendo, nenhum efeito da tensão vertical efetiva (σ'_v) foi observado sobre o formato da curva de compressibilidade.

Nas deformações de 5%, 10% e 15% uma relação bem definida entre velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) e tensão vertical efetiva (σ'_v) foi encontrada, independentemente do tipo de ensaio. Tal fato mostra que não houve nenhum efeito da taxa de variação da tensão vertical efetiva ($\dot{\sigma}'_v$) nos resultados obtidos.

A partir dessas constatações os autores chegaram à conclusão de que existe uma única relação entre tensão vertical efetiva (σ'_v) – deformação (ϵ_v) – velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) para a argila estudada.

A existência dessa relação única foi confirmada por dois ensaios do tipo CRS especiais nos quais a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) era alterada durante o ensaio. A figura 2.21, a seguir, apresenta o resultado desses ensaios.

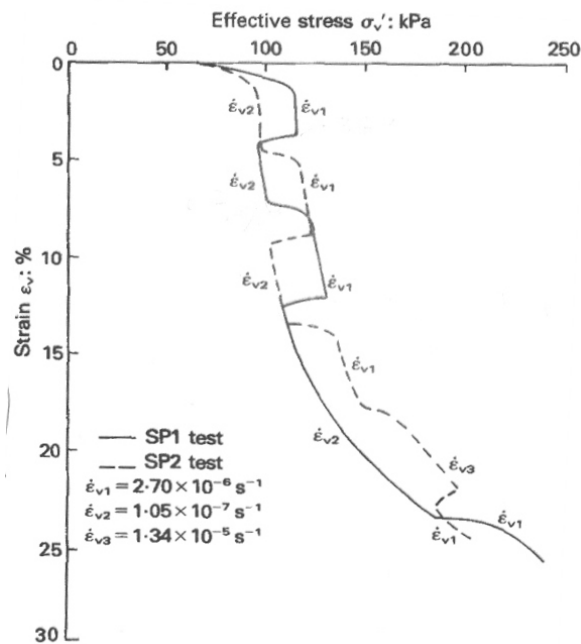


Figura 2.21: Curvas de compressibilidade de ensaios edométricos especiais do tipo CRS da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

De posse desses resultados, foi construída uma curva relacionando a tensão vertical efetiva (σ'_v) com a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$) para diversos valores de deformação volumétrica (ϵ_v) e outra curva relacionando tensão de sobreadensamento (σ'_p) com a velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$). A figura 2.22, a seguir, apresenta a curva $\sigma'_p \times \dot{\epsilon}$ obtida a partir dos resultados dos ensaios do tipo CRS e de adensamento secundário da argila de Batiscan.

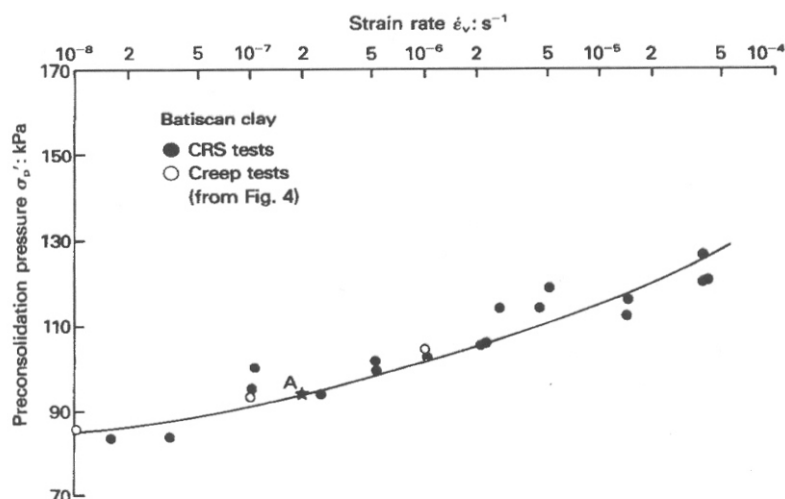


Figura 2.22: Curva de tensão de sobreadensamento (σ'_p) x velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$)

A semelhança entre os formatos das duas curvas σ'_v x $\dot{\epsilon}$ para diversos valores de ϵ_v e as curvas σ'_p x $\dot{\epsilon}$ obtidas levou a decisão de normalizar a tensão vertical efetiva (σ'_v) em relação à tensão de sobreadensamento (σ'_p) nas curvas σ'_v x ϵ_v .

A figura 2.23, a seguir, apresenta as curvas de tensão vertical efetiva normalizada em relação à tensão de sobreadensamento ($\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon})$) x deformação (ϵ_v) para a argila de Batiscan.

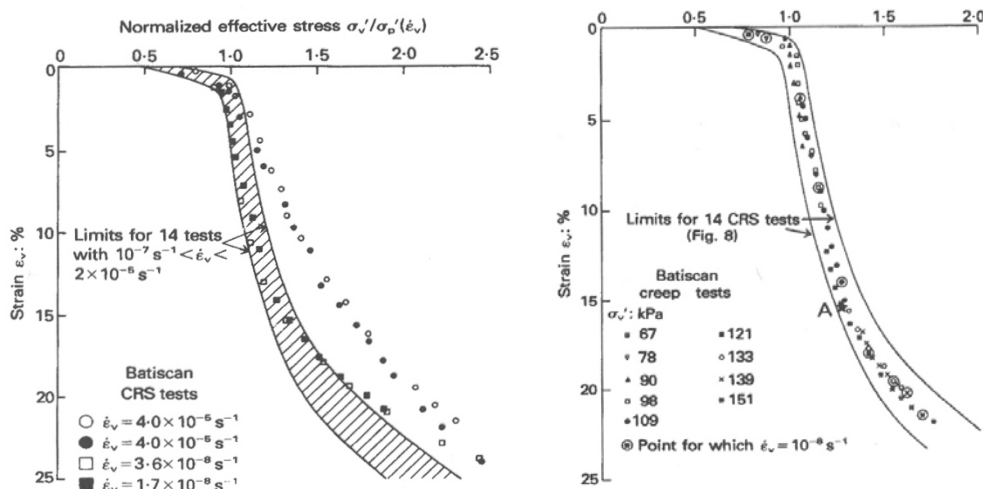


Figura 2.23: Curvas ($\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon})$) x ϵ_v dos ensaios do tipo CRS e dos ensaios de adensamento secundário da argila de Batiscan (Leroueil et al, 1985)

O mesmo tratamento foi dado aos ensaios edométricos dos tipos CGTs, CRS e convencional com carregamento no “fim” do adensamento primário feitos com a argila de St. Césaire.

A figura 2.24, a seguir, apresenta a curva de tensão vertical efetiva normalizada em relação à tensão de sobreadensamento ($\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon})$) x deformação volumétrica (ϵ_v) para a argila de St. Césaire.

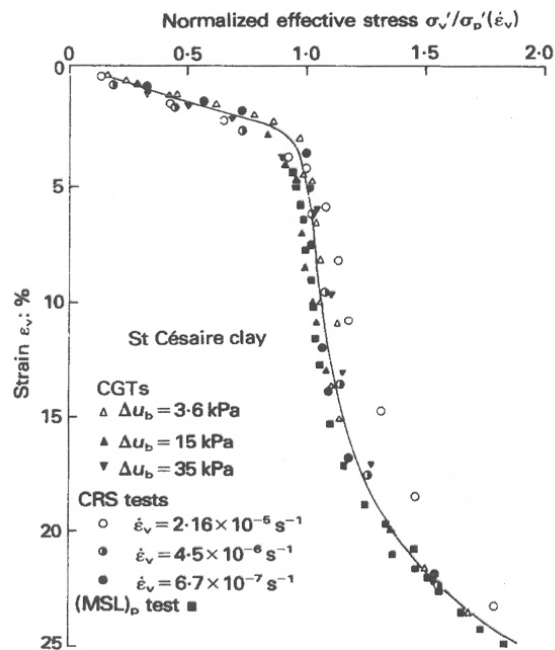


Figura 2.24: Curvas $(\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon})) \times \epsilon_v$ dos ensaios do tipo CRS, CGTs e convencional da argila de St. Césaire. (Leroueil et al, 1985)

Esses dados experimentais levaram os autores a concluírem que o comportamento reológico de argilas naturais pode ser completamente descrito por duas curvas $(\sigma'_p - \dot{\epsilon})$ e $(\sigma'_v / \sigma'_p(\dot{\epsilon}) - \epsilon_v)$ e, portanto, por duas equações:

$$\sigma'_p = f(\dot{\epsilon}_v) \quad (2.80)$$

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_p} = g(\epsilon_v) \quad (2.81)$$

As demais argilas apresentadas na tabela 2.1, também foram submetidas a ensaios edométricos dos tipos anunciados, e foi observado que seus comportamentos se enquadram perfeitamente no modelo proposto.

É importante chamar atenção para as seguintes observações que os referidos autores fazem a respeito do modelo:

- O modelo formulado é baseado principalmente em dados obtidos dentro do domínio normalmente adensado. O comportamento no domínio sobreadensado não é claro.
- O modelo foi desenvolvido em cima de resultados obtidos de uma grande variedade de argilas naturais. Entretanto, os corpos de prova eram de pequena espessura e as deformações eram continuamente aumentadas, e por isso, o modelo só deve ser aplicado sob essas condições.

2.5.2.7 Abordagem do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

A partir do trabalho de Martins e Lacerda (1985) iniciou-se na COPPE/UFRJ uma linha de pesquisa específica para o estudo do comportamento reológico de argilas saturadas. Esta linha de pesquisa segue as linhas de Taylor e Merchant (1940), Terzaghi (1941) e Taylor (1942) nos quais se considera o efeito da viscosidade dos solos.

Diversos trabalhos, tanto de caráter teórico quanto experimental, foram desenvolvidos na COPPE/UFRJ com o intuito de melhorar a compreensão do comportamento reológico de argilas saturadas. No caso específico da compressão edométrica, destacam-se os trabalhos experimentais de Feijó (1991), Lima (1993) e Garcia (1996).

Feijó (1991) realizou ensaios de adensamento edométrico convencionais de longa duração na Argila do Sarapuú, RJ, com o objetivo de observar o comportamento dos corpos de prova submetidos a diferentes razões de sobreadensamento (OCR). Em todos os ensaios, a tensão vertical final após o descarregamento era a mesma. O descarregamento era feito ao “final” do adensamento primário calculado pelo método de Taylor.

A tabela 2.2, a seguir, apresenta para cada um dos ensaios realizados os seguintes valores:

- Tensão vertical efetiva antes do descarregamento (σ'_{vm});
- Tensão vertical efetiva ao final da expansão primária provocado pelo descarregamento (σ'_v).
- Razão de sobreadensamento (OCR) gerado pelo descarregamento.
- Coeficiente de empuxo no repouso (K_0) estimado através da seguinte expressão sugerida por Mayne e Kulhawy (1982):

$$K_o = (1 - \text{sen } \phi') \times OCR^{\text{sen } \phi'} \quad (2.82)$$

Considerando que o ângulo de atrito efetivo (ϕ') da argila do Sarapuí é igual a 25°, tem-se que:

$$K_o = 0,577 \times OCR^{0,423} \quad (2.83)$$

Tabela 2.2: Condições das amostras após o descarregamento (Feijó, 1991)

Corpo de prova	σ'_{vm} (kPa)	σ'_v (kPa)	OCR	K_0 (estimado)
2CP1	150	100	1,5	0,69
2CP2	200	100	2,0	0,77
2CP3	400	100	4,0	1,04
2CP4	600	100	6,0	1,23
2CP5	800	100	8,0	1,39
2CP6	1200	100	12,0	1,65

A figura 2.25, a seguir, apresenta o comportamento das amostras após o descarregamento feito ao final do adensamento primário.

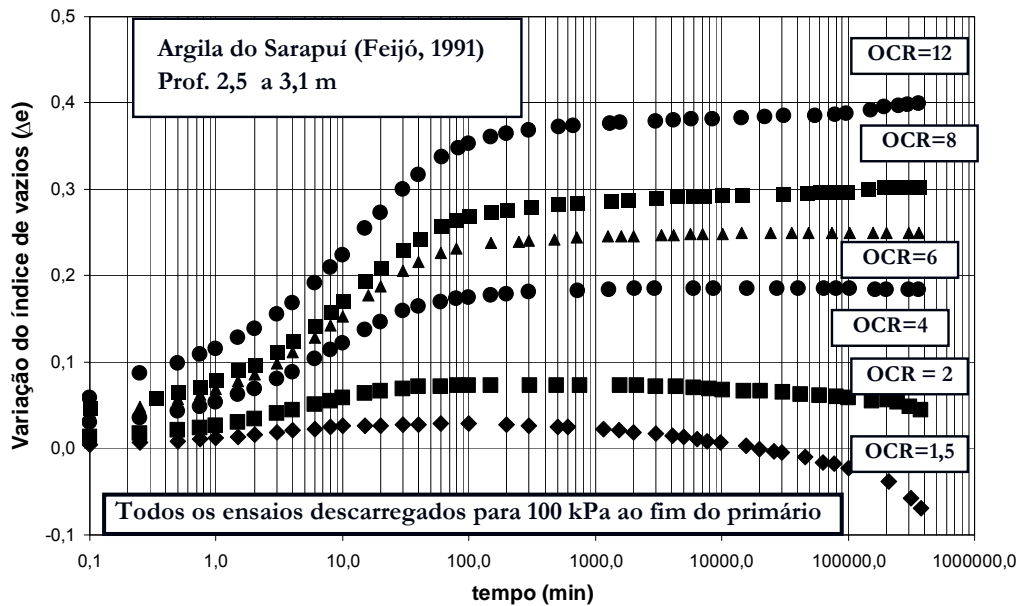


Figura 2.25: Comportamento da argila do Sarapuí após o descarregamento feito ao final do adensamento primário (Feijó e Martins, 1993)

Os resultados obtidos por Feijó (1991) mostram que, dependendo do valor do OCR gerado no descarregamento, após a expansão primária, pode ocorrer compressão secundária, equilíbrio indiferente ou expansão secundária. Para valores de OCR entre 1 e 2, observou-se que as amostras entraram na compressão secundária após a expansão primária. Para valores de OCR entre 8 e 12, observou-se que as amostras apresentaram expansão secundária após a expansão primária. Já as amostras submetidas a valores de OCR entre 2 e 6 não apresentaram nem compressão e nem expansão secundárias.

Esses resultados sugerem a existência de uma região na qual $0,8 < K_0 < 1,2$ ($2 < OCR < 6$) no plano e - $\log \sigma'_v$ e no plano p' - q onde o equilíbrio é indiferente.

As amostras que ficam situadas fora da região de equilíbrio indiferente após a expansão primária tendem a caminhar em direção a esta região por compressão ou expansão secundária. Quanto mais afastado o solo fica da zona de equilíbrio indiferente maior a velocidade de entrada na compressão ou expansão secundária. A velocidade

diminui à medida que o solo aproxima-se da região de equilíbrio indiferente, tornando-se nula quando solo toca as retas que delimitam a referida região.

A figura 2.26, a seguir, apresenta a zona de equilíbrio indiferente no plano e - $\log \sigma'_v$.

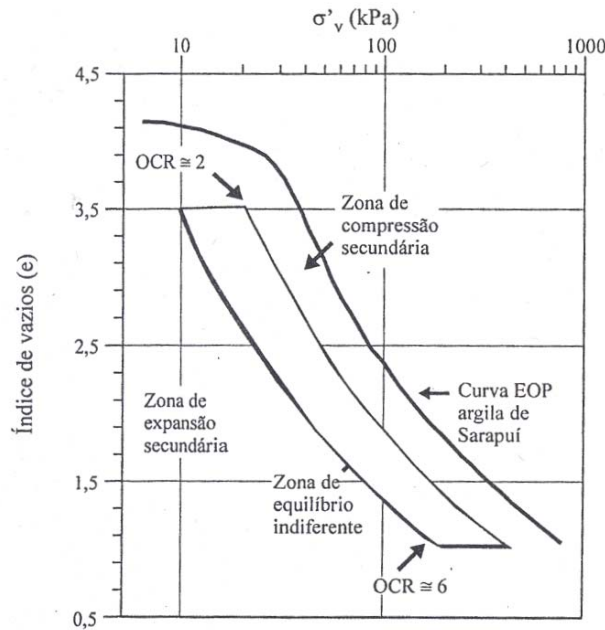


Figura 2.26: Zona de equilíbrio indiferente no plano e - $\log \sigma'_v$ observada para a argila do Sarapuí (Feijó e Martins, 1993)

A figura 2.27, a seguir, apresenta a zona de equilíbrio indiferente no plano p' - q .

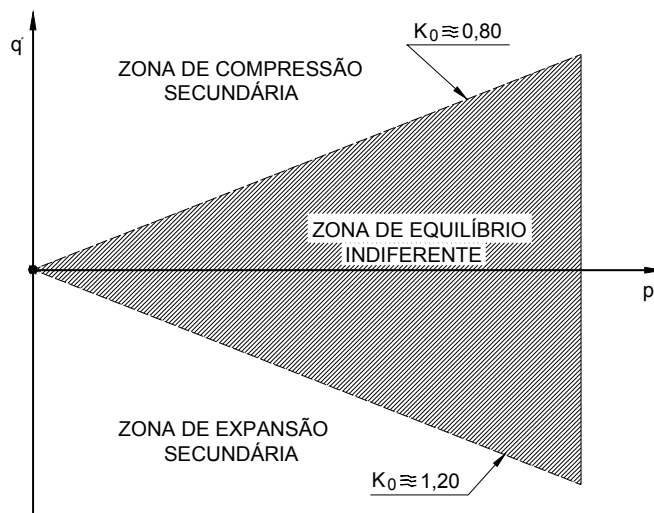


Figura 2.27: Zona de equilíbrio indiferente no plano p' - q observada para a argila do Sarapuí (Feijó e Martins, 1993)

Desta forma, o adensamento secundário não estaria associado à relaxação completa das tensões cisalhantes, mas sim de uma parte delas.

Conforme o “*O princípio das tensões efetivas expandido*” formulado por Martins (1992), assim como as tensões normais totais, as tensões cisalhantes devem ser divididas em duas parcelas. Uma parcela correspondente ao atrito e outra correspondente a viscosidade. Desta maneira, a compressão secundária estaria associada à relaxação total das tensões cisalhantes de origem viscosa. Ao final da compressão secundária, o estado de tensões do solo no plano $p'-q$ seria representado por um círculo de Mohr de raio igual a tensão cisalhante correspondente a parcela de atrito no plano onde a tensão cisalhante é máxima.

Para estimativa da magnitude da compressão secundária, Feijó e Martins (1993) sugerem localizar a curva de final da compressão secundária a uma distância correspondente ao OCR igual a dois em relação à linha de final da compressão primária no plano $e-\log\sigma'_v$.

Lima (1993) com o objetivo de comprovar a existência de uma parcela viscosa na tensão vertical efetiva durante o adensamento unidimensional, realizou ensaios de relaxação no edômetro com controle da drenagem e medidas de excesso de poropressão. As amostras eram adensadas normalmente e, ao final do adensamento primário calculado pelo método de Taylor, a drenagem era interrompida e a poropressão era monitorada. Observou-se que após o fechamento da drenagem a poropressão crescia. A figura 2.28, a seguir, apresenta o monitoramento da poropressão antes e após o fechamento da drenagem em um dos ensaios realizados por Lima (1993).

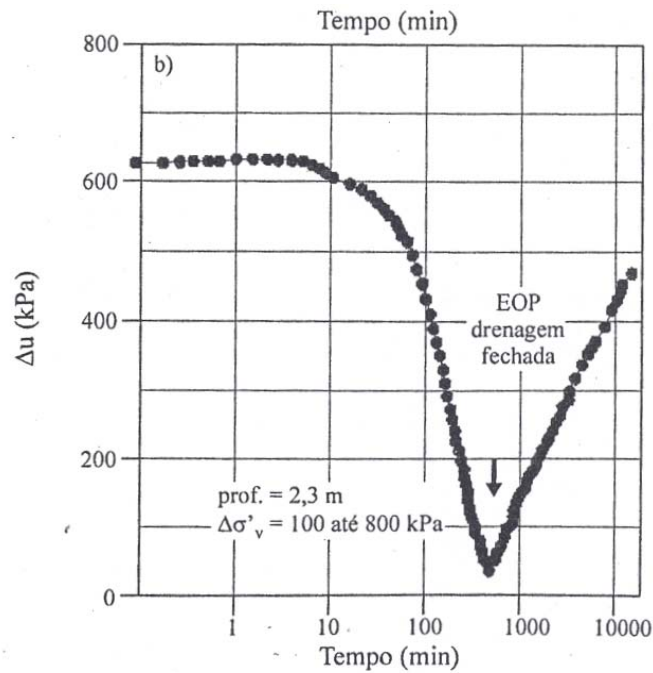


Figura 2.28: Aumento da progressão após a interrupção da drenagem no final do adensamento primário (Lima, 1993)

O aumento da poropressão pode ser explicado pela equação a seguir.

$$\sigma_v = \sigma'_{vs} + \sigma'_{vv} + u, \quad (2.84)$$

onde:

σ_v = tensão vertical total;

σ'_{vs} = parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva;

σ'_{vv} = parcela viscosa da tensão vertical efetiva.

u = poropressão.

Quando a drenagem era bloqueada, a velocidade de deformação tornava-se nula ($\dot{\epsilon} = 0$). Conseqüentemente, a parcela viscosa da tensão vertical efetiva era completamente desmobilizada, tornando-se nula. O atendimento da condição de equilíbrio da equação tem que se dar via aumento da poropressão (u), uma vez que a parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva só pode aumentar via diminuição do índice de vazios do corpo de prova. Portanto, o acréscimo de poropressão observado após a interrupção da drenagem correspondia à parcela viscosa da tensão vertical efetiva desmobilizada.

Garcia (1996) realizou um estudo de relaxação de tensões e adensamento secundário de uma argila mole existente na região da Barra da Tijuca, Rio de Janeiro. Um dos objetivos era estabelecer uma relação existente entre o adensamento secundário e a relaxação de tensões sob condições edométricas nos moldes do mecanismo apresentado por Taylor (1942), Martins e Lacerda (1985) e Feijó e Martins (1993).

Foram realizados diversos ensaios de adensamento edométrico, nos quais, ao final do adensamento primário calculado pelo método de Taylor a partir de uma determinada tensão vertical efetiva, o deslocamento do braço da prensa era bloqueado por uma célula de carga. Tal procedimento tinha o intuito de impedir a deformação do corpo de prova e acompanhar o comportamento da tensão vertical efetiva (σ'_v) durante um período de 15 dias.

A figura 2.29, a seguir, apresenta o caminho seguido pelo solo durante a relaxação de tensões drenada a partir de diferentes tensões verticais efetivas iniciais.

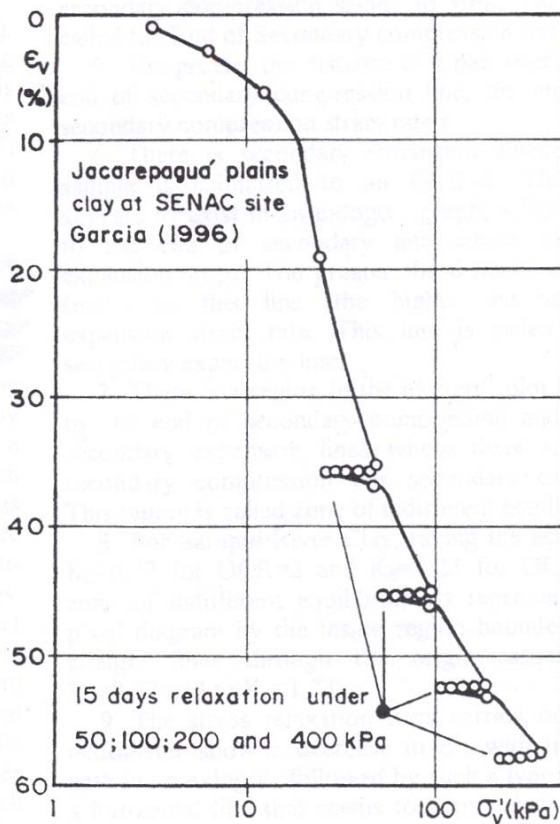


Figura 2.29: Caminho seguido durante a relaxação de tensões drenada no edômetro (Garcia, 1996)

Os resultados apresentados por Garcia (1996) mostram que durante o processo de relaxação, solos normalmente adensados, no plano “ $\varepsilon_v \times \log \sigma'_v$ ” apresentam uma tendência de marcharem horizontalmente rumo à linha de final da compressão secundária que representa o lugar geométrico dos pontos $(\varepsilon_v, \sigma'_v)$ para os quais a velocidade de deformação ($\dot{\varepsilon}$) é nula.

Baseado na abordagem de Martins e Lacerda (1985) e nas evidências experimentais de Feijó (1991), Lima (1993), Garcia (1996) e de outros trabalhos realizados, Martins et al (1997) destacam as principais conclusões do Grupo de Reologia da COPPE até então, a saber:

1. Existe dissipação de tensões cisalhantes durante a compressão secundária como consequência da relaxação de tensões que implica em aumento de σ'_h e K_0 com o tempo.
2. Existe uma linha no plano $e\text{-}\log\sigma'_v$, paralela à linha de final do adensamento primário associada a um OCR aproximadamente igual a 2, abaixo da qual a compressão secundária não ocorre. Esta linha é chamada de linha de final do adensamento secundário.
3. Existe uma linha no plano $e\text{-}\log\sigma'_v$, paralela à linha de final do adensamento primário associada a um OCR aproximadamente igual a 6, abaixo da qual ocorre expansão secundária. Esta linha é chamada de linha de final da expansão secundária.
4. Não ocorre nem compressão e nem expansão secundária na região delimitada pelas linhas de final de compressão secundária e final de expansão secundária ($2 \leq \text{OCR} \leq 6$). Essa região é chamada de região de equilíbrio indiferente.
5. Ensaio de relaxação de tensões drenada no edômetro mostram uma redução da tensão vertical efetiva (σ'_v) com o tempo. No plano $e\text{-}\log\sigma'_v$ o caminho seguido por esse ensaio é horizontal com final na linha de fim do adensamento secundário.

3. ENSAIOS DE ADENSAMENTO – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Extração das amostras

As amostras submetidas aos ensaios de adensamento edométrico foram extraídas na área do aterro piloto do Novo Terminal Portuário da Embraport. Este terminal localiza-se na região da Ilha Barnabé no canal do Porto de Santos no litoral do Estado de São Paulo. Uma vista aérea do local antes da construção do aterro é apresentada na figura 3.1, a seguir.



Figura 3.1: Vista aérea do local com a projeção do aterro piloto

A figura 3.2, a seguir, mostra um detalhe da região da Ilha Barnabé com a localização do aterro piloto.

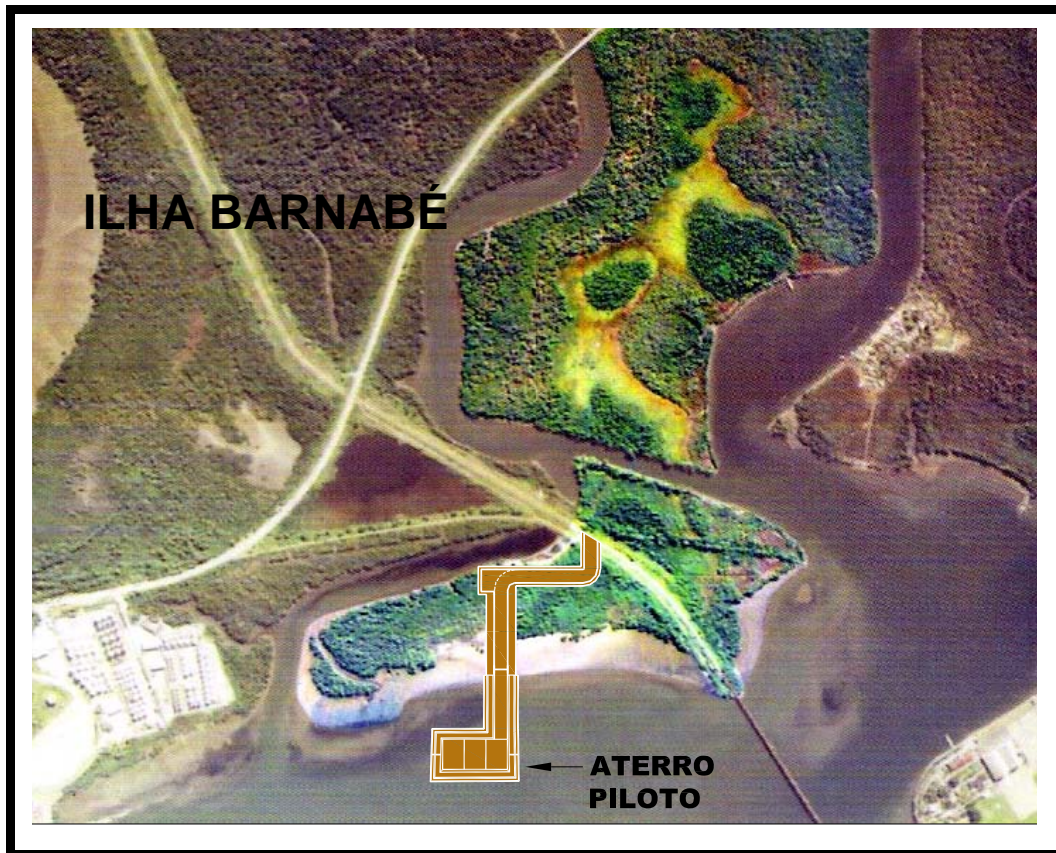


Figura 3.2: Detalhe da região da Ilha Barnabé com a localização do aterro piloto

A figura 3.3, a seguir, apresenta a locação dos furos de sondagem à percussão (SP) e os furos de sondagem de retirada de amostras indeformadas (SRA) dentro da área de projeção do aterro piloto. As amostras indeformadas extraídas do furo SRA-203 foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, onde foram ensaiadas.

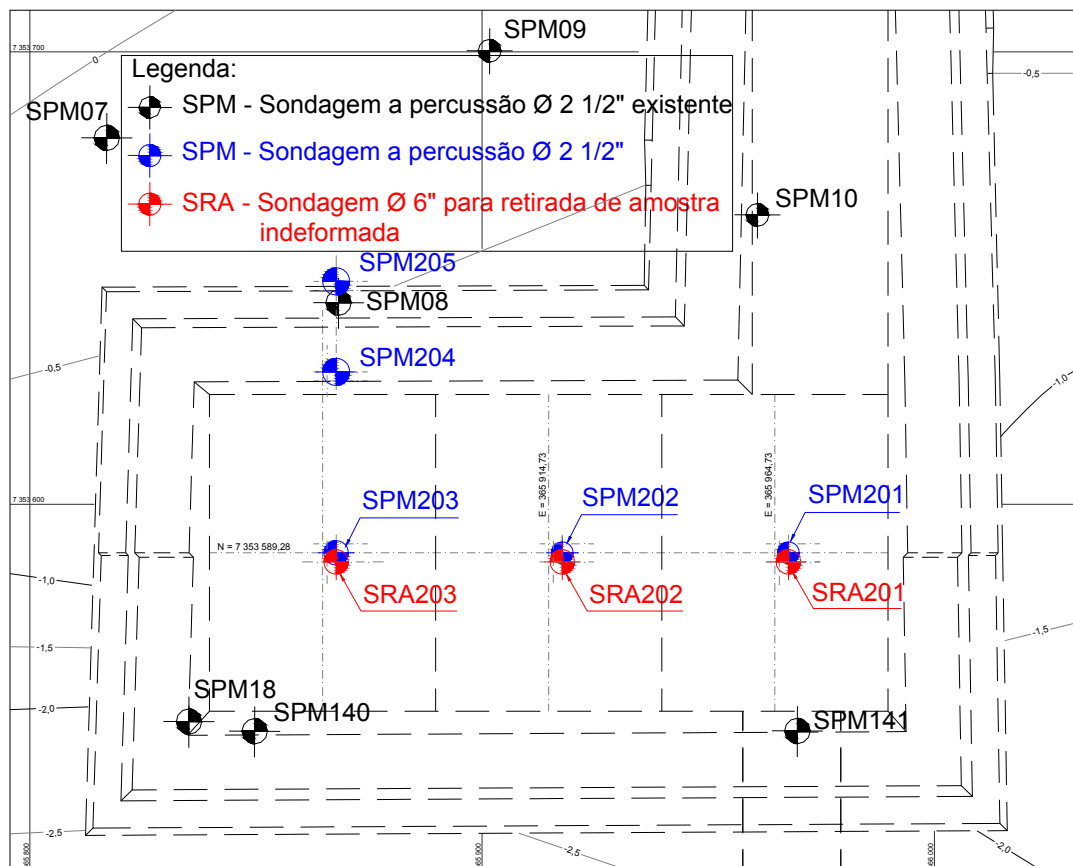


Figura 3.3: Locação das sondagens à percussão e sondagens para retiradas de amostras indeformadas dentro da área de projeção do aterro piloto

A tabela 3.1, a seguir, apresenta as profundidades das amostras extraídas do furo SRA-203, as quais foram encaminhadas ao Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Tabela 3.1: Profundidade das amostras indeformadas extraídas no furo SRA-203

Amostra	Profundidade (m)
SRA203(1)	5,10 - 5,70
SRA203(2)	6,00 - 6,60
SRA203(3)	7,00 - 7,60
SRA203(4)	8,00 - 8,60
SRA203(5)	9,00 - 9,60
SRA203(6)	10,00 - 10,60
SRA203(7)	11,00 - 11,60
SRA203(8)	12,00 - 12,60
SRA203(9)	14,00 - 14,60
SRA203(10)	16,00 - 16,60
SRA203(11)	18,00 - 18,60
SRA203(12)	23,45 - 24,05

A figura 3.4, a seguir, apresenta a localização das amostras extraídas no furo SRA-203 no boletim de sondagem à percussão SPM-203.

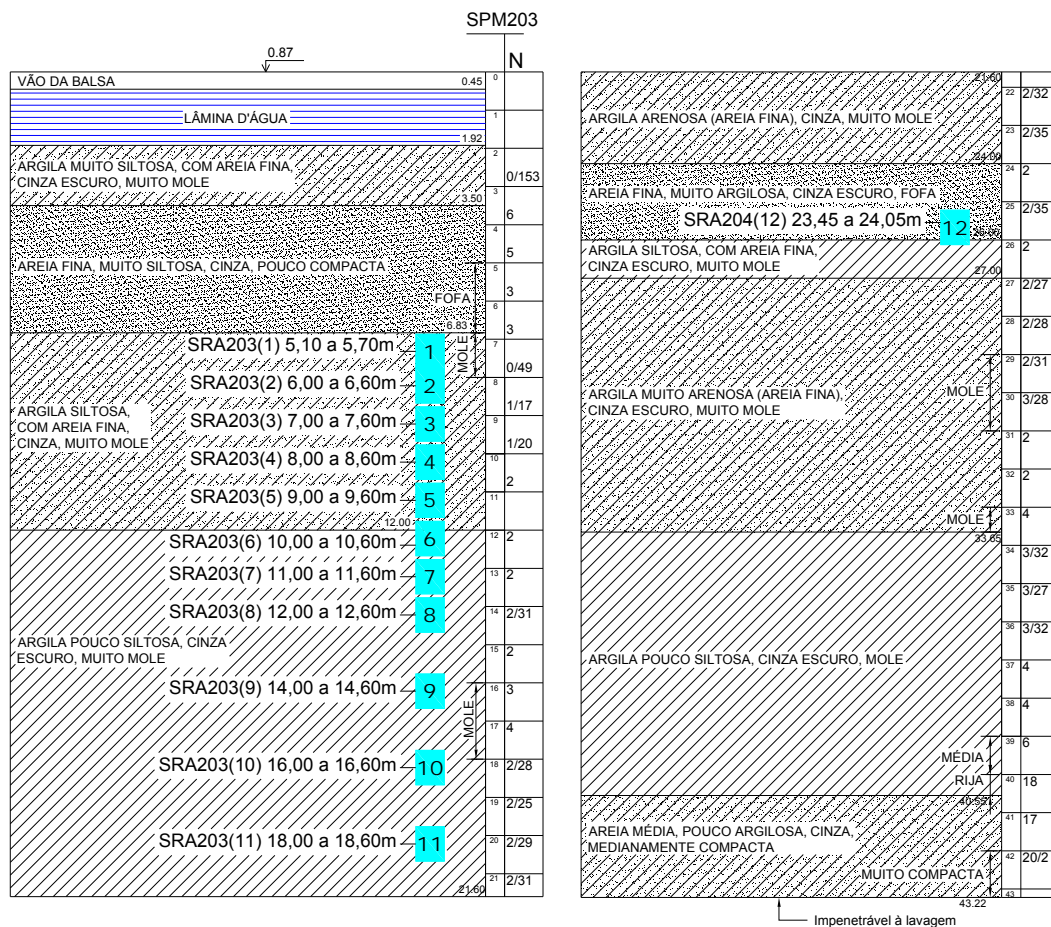


Figura 3.4: Localização das amostras extraídas no furo SRA-203 no boletim de sondagem à percussão SPM-203

Com a finalidade de garantir a obtenção de amostras de boa qualidade, exigiu-se o cumprimento da norma ABNT NBR-9820/1997 - “Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagens”, além de uma série de exigências complementares descritas no documento “Especificação Técnica para Coleta de Amostras Indeformadas” que se encontra no anexo C. Essas exigências foram elaboradas baseando-se na experiência dos orientadores em trabalhos anteriores. Ainda assim, vale dizer aqui que as amostras foram extraídas com amostradores do tipo “Shelby” de pistão estacionário de paredes finas de diâmetro interno igual a 10cm e altura igual a 70cm. A engenheira responsável pelo acompanhamento e fiscalização da retirada de todas as amostras e a equipe de amostragem foram orientadas no campo pelo

aluno Vitor Aguiar e pelo professor Ian Martins na ocasião da extração da amostra SRA-203(1).

As 12 amostras foram transportadas dentro de caixas de madeira até o laboratório onde ficaram armazenadas dentro da câmara úmida.

Para a elaboração desta dissertação foram ensaiadas as seis primeiras amostras, a saber: SRA-203(1), SRA-203(2), SRA-203(3), SRA-203(4), SRA-203(5) e SRA-203(6).

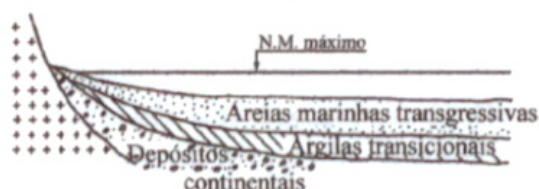
3.2 Formação geológica do depósito

Segundo Pacheco Silva (1953), durante várias décadas as argilas sedimentares da Baixada Santista foram consideradas como moles e normalmente adensadas. Acreditava-se que elas se formaram em um único ciclo de sedimentação contínuo e ininterrupto, sem nenhum processo erosivo.

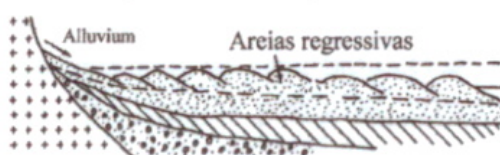
As variações do nível do mar durante o Quaternário, constituem o mecanismo principal de formação dos sedimentos marinhos das planícies costeiras brasileiras (Suguio e Martin, 1978 e 1981). Os referidos autores mencionam ainda que ocorreram pelo menos dois ciclos de sedimentação, entremeados por intenso processo erosivo, associados, com pelo menos dois episódios transgressivos, de níveis marinhos mais elevados que o atual, que deram origem a dois tipos de sedimentos argilosos, com propriedades geotécnicas distintas.

A figura 3.5, a seguir, ilustra os possíveis estágios de gênese das Planícies Sedimentares Paulistas (Suguio, Martin, 1981).

1º Estádio: máximo da transgressão - Cananéia (Pleistoceno)



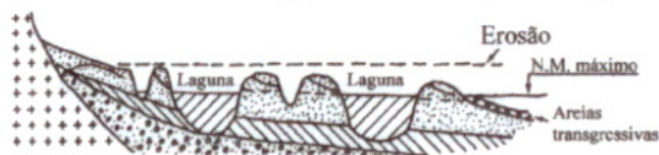
2º Estádio: Regressão e formação de cordões de areia



3º Estádio: Erosão parcial dos sedimentos marinhos



4º Estádio: Máximo da transgressão - Santos (Holoceno)



5º Estádio: Regressão em direção ao N.M. atual



Figura 3.5: Ilustração dos possíveis estágios de gênese das Planícies Sedimentares Paulistas (Suguio e Martin, 1981). Extraído de Massad (1999)

Massad (1985, 1988 e 1994) complementa afirmando que as variações do nível do mar durante o Quaternário não estão traduzidos apenas na origem desses depósitos. Este mecanismo traduz-se, também, na história destes sedimentos, que sofreram alterações nas suas características de adensamento ao longo do tempo.

Segundo este mesmo autor, os primeiros sedimentos argilosos os quais se depositaram há cerca de 100.000 a 120.000 anos atrás são denominados de Sedimentos Pleistocênicos. A sedimentação ocorreu em ambiente misto, continental e marinho. Os Sedimentos Pleistocênicos argilosos são denominados de Argilas Transicionais enquanto que os sedimentos Pleistocênicos arenosos na sua base e arenosos no seu topo são chamados de Areias Transgressivas. Na ocasião da regressão marinha que ocorreu há cerca de 15000 anos atrás, o nível do mar baixou de 110 a 130m em relação ao nível atual. Durante o recuo do mar formaram-se os cordões de praia por sobre as Areias Transgressivas. Posteriormente, os Sedimentos Pleistocênicos foram intensamente erodidos pela rede hidrográfica de então. O importante sob o ponto de vista geotécnico é que as Argilas Transicionais foram submetidas a uma tensão vertical correspondente ao peso de terra.

Os segundos sedimentos, que se formaram de 7000 anos até hoje, são denominados de Sedimentos Holocênicos. São também chamados de Sedimentos Flúvio-Lagunares e de Baías (SFL) por terem sido depositados em locais de erosão dos sedimentos Pleistocênicos, em canais, lagunas ou estuários. Estes sedimentos são constituídos de areias e argilas ricas em concha.

Massad (1985) ao analisar milhares de sondagens e mapas do litoral paulista elaborou a seguinte classificação para as argilas marinhas da Baixada Santista:

- a) Argilas de Manguesais – são argilas de deposição recente com SPTs nulos e OCR igual a 1.
- b) Argilas de SFL (Sedimentos Flúvio-Lagunares) – são argilas que se depositaram no Holoceno, a partir de 7000 anos atrás, com SPT entre 0 e 2 golpes. São em geral solos levemente sobre-adensados com OCR entre 1,1 e 2,5, exceto em locais de ação eólica, como é o caso na Ilha de Santo Amaro.
- c) ATs (Argilas Transicionais) – são mistos de solos continentais e marinhos, depositados durante o Pleistoceno. São solos muito sobreadensados, com tensões de sobreadensamentos que podem atingir valores da ordem de 300

a 500kPa ($OCR > 2,5$), e com SPTs acima de 5, podendo atingir 25 golpes ou mais.

Com base nos valores de SPT indicados na sondagem SPM-203 dentro da classificação proposta por Massad (1985) as amostras ensaiadas neste trabalho pertencem à Argila de SFL.

3.3 Caracterização geotécnica do depósito

Os seguintes ensaios de caracterização foram realizados com o solo restante da moldagem dos corpos de prova dos ensaios de adensamento:

- Análise granulométrica por peneiramento e sedimentação seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 7181/84 – “Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio”.
- Umidade natural (w) seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 6457/86 – “Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio”;
- Limite de liquidez (LL) seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 6459/84 “Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio”;
- Limite de plasticidade (LP) seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 7180/84 - “Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio”;
- Densidade real dos grãos (G) seguindo o que preconiza a norma ABNT NBR 6508/84 – “Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica”;

O peso específico natural (γ_{nat}), o índice de vazios inicial (e_0), o grau de saturação (S) de cada corpo de prova esculpido foram calculados a partir do volume total, peso total, umidade natural (w) do corpo de prova e densidade real dos grãos (G).

Devido ao fato de terem sido moldados 4 corpos de prova a partir de cada uma das amostras, para cada uma delas foram determinados quatro valores de umidade (w), peso específico natural (γ_{nat}), índice de vazios inicial (e_0) e grau de saturação (S).

As curvas de distribuição granulométrica estão apresentadas no anexo E.

A tabela 3.2, a seguir, apresenta os valores dos parâmetros de caracterização de todas as amostras ensaiadas.

Os perfis dos parâmetros de caracterização plotados lado a lado encontram-se na figura 3.6 adiante.

Os perfis dos parâmetros de caracterização indicam que as três amostras mais superficiais ensaiadas a saber, SRA203(1), SRA203(2) e SRA203(3), pertencem, na realidade, a uma camada de transição entre a camada superficial de areia sobrejacente identificada no boletim de sondagem a percussão e a Argila de SFL subjacente. Enquanto que as amostras mais profundas ensaiadas a saber, SRA203(4), SRA203(5) e SRA203(6), tratam-se de amostras mais argilosas e, portanto, pertencem realmente a Argila de SFL em consonância com a classificação proposta por Massad (1985).

Tabela 3.2: Parâmetros de caracterização

Caracterização																
Amostra	Profundidade da amostra (m)	Umidade w (%)	Umidade média w (%)	Densidade real dos grãos G	Grau de saturação S (%)	Grau de Saturação médio S (%)	Índice de vazio inicial e_0	Índice de vazios inicial médio e_0	Peso específico natural γ_{nat} (kN/m ³)	Peso específico natural médio γ_{nat} (kN/m ³)	Limites de Atterberg			Granulometria		
											LL (%)	LP (%)	IP (%)	% de areia	% de silte	% de argila
SRA-203(1)	5,10 - 5,70	48	50	2,64	99	98	1,30	1,37	17,1	16,8	51	21	31	42	38	20
		51			99		1,35		16,9							
		51			99		1,37		16,8							
		51			94		1,44		16,3							
SRA-203(2)	6,00 - 6,60	36	38	2,65	90	94	1,07	1,07	17,4	17,6	34	13	21	69	19	12
		40			95		1,11		17,5							
		37			97		1,00		18,1							
		39			93		1,11		17,5							
SRA-203(3)	7,00 - 7,60	57	62	2,64	97	98	1,55	1,65	16,3	16,2	71	26	45	44	25	31
		65			100		1,69		16,2							
		60			100		1,52		16,7							
		67			96		1,83		15,6							
SRA-203(4)	8,00 - 8,60	86	86	2,60	100	99	2,24	2,25	14,9	14,9	104	35	68	13	34	53
		88			100		2,26		15,0							
		83			100		2,17		15,0							
		87			97		2,31		14,6							
SRA-203(5)	9,00 - 9,60	78	79	2,62	100	99	1,97	2,04	15,7	15,4	110	33	77	15	36	49
		79			100		2,02		15,5							
		80			98		2,14		15,0							
		- (*)			-		-		-							
SRA-203(6)	10,00 - 10,60	100	103	2,53	100	100	2,53	2,57	14,3	14,3	128	46	82	3	38	59
		102			100		2,57		14,3							
		106			100		2,60		14,3							
		101			99		2,58		14,2							

(*) Não foi determinada a umidade do corpo de prova.

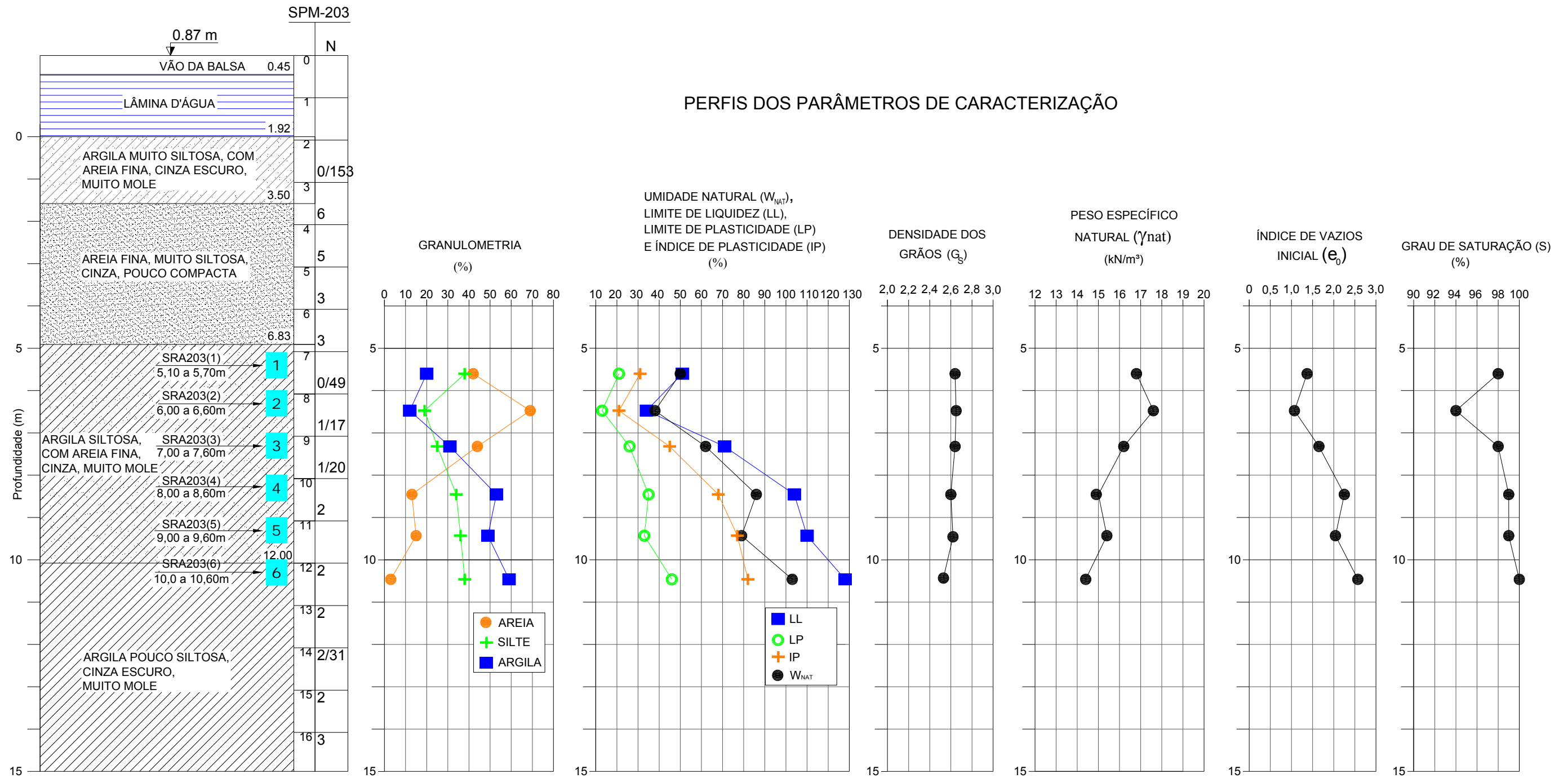


Figura 3.6 Perfis dos parâmetros de caracterização

3.4 Metodologia de execução dos ensaios de adensamento

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Reologia dos Solos que se localiza dentro do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. O Laboratório de Reologia dos Solos foi concebido e construído para a realização de ensaios especiais que necessitam de controle rigoroso de temperatura, requisito indispensável para os ensaios de adensamento desta dissertação.

Os ensaios de adensamento foram realizados em prensas de adensamento do tipo Bishop com relação de braços de 1:10. Durante os ensaios, a temperatura da sala de ensaios variou entre 19°C e 21°C.

Os corpos de prova de aproximadamente 2cm de altura e 7cm de diâmetro foram esculpidos seguindo as recomendações de Ladd e DeGroot (2003). O procedimento de moldagem dos corpos de prova encontra-se descrito no anexo F.

Foi realizada uma bateria de 4 ensaios de adensamento edométrico convencionais para cada uma das seis amostras. As localizações dos corpos de provas esculpidos em cada uma das amostras são apresentadas na figura F.6 no anexo F.

Nesses ensaios lançou-se mão de um critério de carregamento diferente do que normalmente adota-se nos ensaios de adensamento edométrico convencionais. Nos ensaios convencionais, os estágios de carregamento possuem a duração de 24 horas. Também não foi adotado aqui o critério utilizado por Vieira (1988) e Feijó (1991), onde um novo estágio de carga era aplicado ao “fim” do adensamento primário do estágio anterior calculado pelo Método de Taylor.

Nos ensaios realizados foi adotado um critério de aplicação de estágio de carga baseado na velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) do corpo de prova. Um novo estágio de carga era aplicado quando o corpo de prova atingia a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1} . Com base na experiência do Grupo de Reologia da COPPE em trabalhos anteriores, este valor de deformação específica corresponde à primeira potência inteira de 10 após o “fim” do adensamento primário calculado tanto pelo Método de Taylor quanto pelo Método de Casagrande, para corpos de prova cuja distância de drenagem é menor ou igual a 1cm. A velocidade de

deformação específica ($\dot{\epsilon}$) do corpo de prova era calculada através da seguinte expressão:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta H / H}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Onde:

ΔH = variação da altura do corpo de prova entre duas leituras do extensômetro consecutivas (leituras i e $i+1$).

H = altura do corpo de prova correspondente à leitura i .

Δt = intervalo de tempo entre as leituras i e $i+1$.

Os ensaios de adensamento realizados podem ser divididos basicamente em quatro tipos:

1. Ensaio tipo 1: acompanhamento da compressão secundária sob uma determinada tensão vertical σ'_v com OCR=1.

Neste tipo de ensaio, o corpo de prova era carregado em estágios até uma determinada tensão vertical σ_v e então permanecia sob esta tensão durante um período mínimo de 17 dias para acompanhamento da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) durante a compressão secundária. Tal medida tinha o objetivo de determinar as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) na curva de compressibilidade. Durante este período, era feita leitura do extensômetro todos os dias. Transcorrido o período de acompanhamento da compressão secundária, o corpo de prova voltava a ser carregado em estágios de carga até a tensão vertical máxima (400kPa para a amostra SRA-203(1) e 800kPa para as demais amostras). Posteriormente, o corpo de prova era descarregado em três estágios, para a amostra SRA-203(1), ou em dois estágios, para as demais amostras, até gerar um OCR igual a 4, terminando-se o ensaio.

A figura 3.7, a seguir, ilustra a determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) durante o acompanhamento da compressão secundária nos ensaios tipo 1.

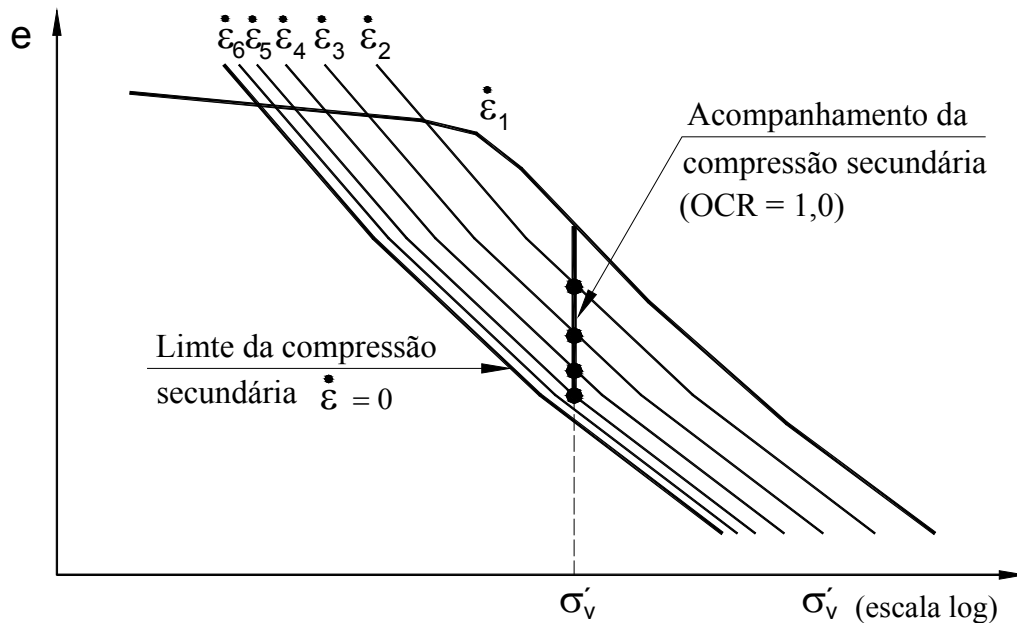


Figura 3.7: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica nos ensaios tipo 1

2. Ensaio tipo 2: acompanhamento da compressão secundária sob uma determinada tensão vertical σ'_{v2} com $OCR > 1$.

Neste tipo de ensaio, o corpo de prova era carregado até uma determinada tensão vertical σ'_{v1} e descarregado para σ'_{v2} , quando permanecia sob esta tensão com $OCR = \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v2}}$ durante um período mínimo de 17 dias para acompanhamento da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) durante a compressão secundária. O corpo de prova entra na compressão secundária após sofrer expansão primária provocada pelo descarregamento de σ'_{v1} para a σ'_{v2} . O acompanhamento da compressão secundária possuía o objetivo de determinar as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) na curva de compressibilidade. Durante este período, era feita leitura do extensômetro todos os dias. Transcorrido o período de acompanhamento da compressão

secundária o corpo de prova era recarregado para a tensão vertical σ'_{v1} e carregado em estágios de carga até a tensão vertical máxima (400kPa para a amostra SRA-203(1) e 800kPa para as demais amostras). Posteriormente, o corpo de prova era descarregado em três estágios, para a amostra SRA-203(1), ou em dois estágios, para as demais amostras, até gerar um OCR igual a 4, terminando-se o ensaio.

A figura 3.8, a seguir, ilustra a determinação das curvas de igual velocidade de de deformação específica nos ensaios tipo 2.

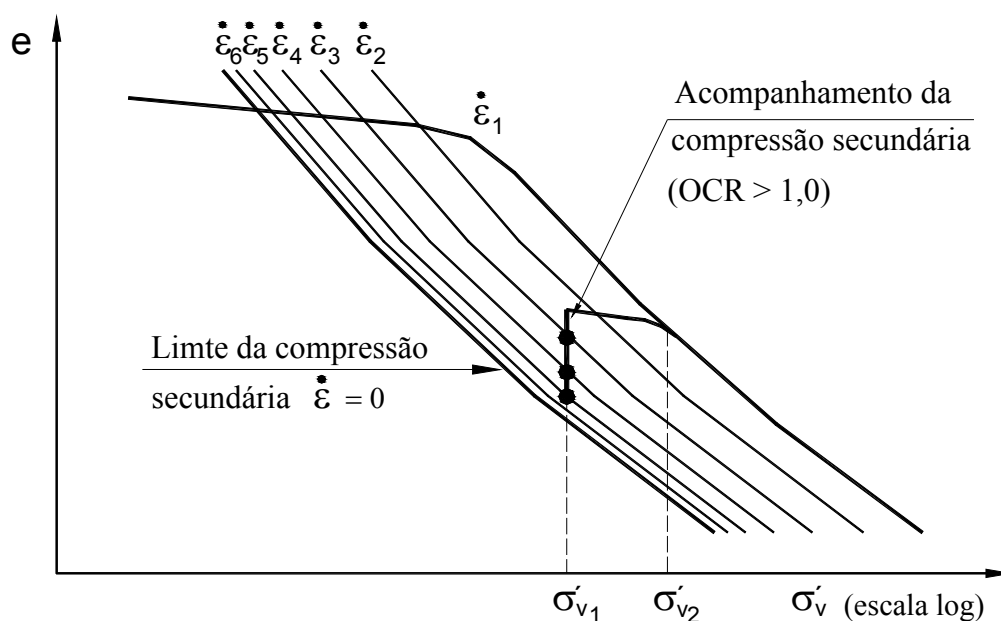


Figura 3.8: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica nos ensaios tipo 2

3. Ensaio tipo 3: ensaio de relaxação imperfeita

Da mesma forma que Garcia (1996), foram realizados ensaios de adensamento edométrico com relaxação de tensões. Todavia, ao invés de utilizar uma célula de carga para bloquear o deslocamento do braço da prensa conforme Garcia (1996), nesta dissertação foi utilizado um anel dinamométrico. Isto foi feito com intuito de permitir um deslocamento ainda que pequeno do corpo de prova a fim de obter as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) na curva de compressibilidade. Como

era permitida a deformação do corpo de prova, não se tratava de uma relaxação pura conforme Garcia (1996), mas sim, de um híbrido de relaxação e compressão secundária (relaxação imperfeita). A figura 3.9, a seguir, mostra a imagem do ensaio.

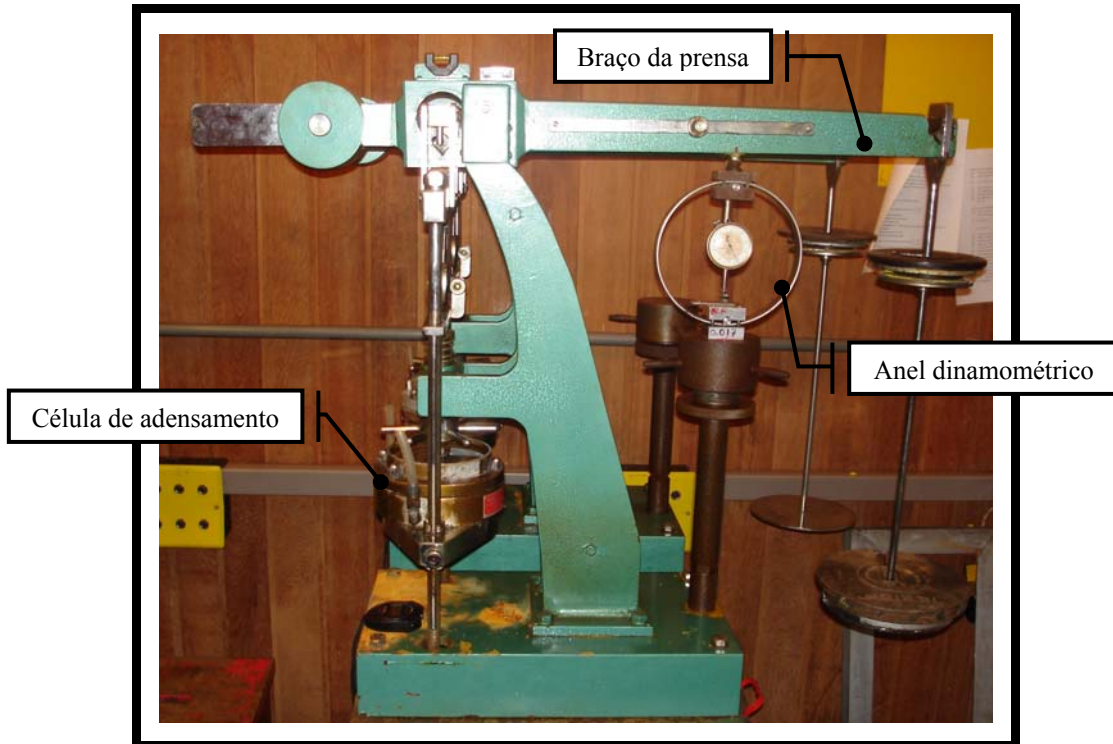


Figura 3.9: Imagem do ensaio de relaxação imperfeita no equipamento edométrico convencional

Desta forma, neste tipo de ensaio, carregava-se o corpo de prova até uma determinada tensão vertical efetiva σ'_{v1} . A partir desta tensão o anel dinamométrico era introduzido, e acompanhava-se a relaxação imperfeita durante um período mínimo de 17 dias. Transcorrido esse período, retirava-se o anel dinamométrico e o corpo de prova voltava a ser carregado em estágios de carga até a tensão vertical máxima (400kPa para a amostra SRA-203(1) e 800kPa para as demais amostras). Posteriormente, o corpo de prova era descarregado em três estágios, para a amostra SRA-203(1), ou em dois estágios, para as demais amostras, até gerar um OCR igual a 4, terminando-se o ensaio.

A figura 3.10, a seguir, ilustra a determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) nos ensaios tipo 3.

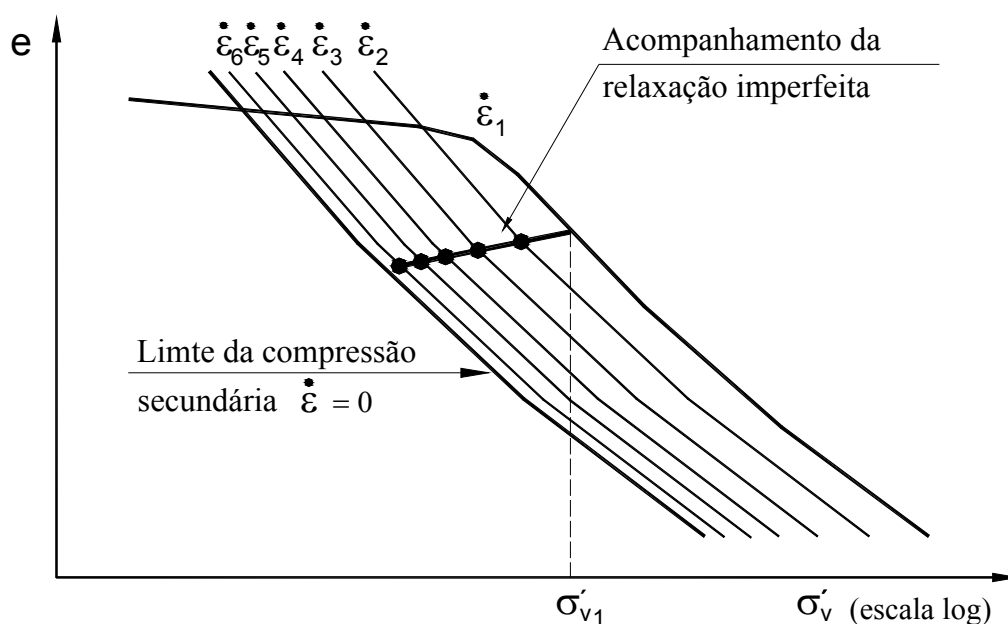


Figura 3.10: Determinação das curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) nos ensaios tipo 3

4. Ensaio tipo 4: amostra remoldada em laboratório.

Com o objetivo de checar a qualidade da amostragem e da moldagem dos corpos de prova, a partir da amostra SRA-203(2) em diante tomou-se a decisão de realizar um ensaio em cada bateria com amostra remoldada no laboratório. Durante o período de acompanhamento da compressão secundária dos ensaios tipo 1 e 2 e da relaxação imperfeita dos ensaios tipo 3, o ensaio tipo 4 ficava repousando sob uma tensão vertical efetiva igual a 50kPa sob OCR igual a 4. Transcorrido o período de acompanhamento da compressão secundária e da relaxação imperfeita dos demais ensaios, este ensaio era recarregado para 100 kPa, para 200kPa e carregado em estágios de carga até 800 kPa. Posteriormente, o ensaio era descarregado para 400kPa e em seguida para 200kPa, terminando-se o ensaio.

Em decorrência da diversidade de tipos de ensaios realizados e de uma melhor definição da tensão de sobreadensamento, os valores de carregamento aplicados não seguiram um padrão único para todos os ensaios. Esses valores de carregamento estão apresentados nos quadros 3.3A e 3.3B, a seguir.

Tabela 3.3A: Tipos de ensaios e seqüência de estágios de carregamento

Ensaio	Amostra	Profundidade da amostra (m)	Profundidade do corpo de prova (m)	Tipo do ensaio	Tensão vertical efetiva de acompanhamento (kPa)	Duração do acompanhamento (dias)	Seqüência de estágios de carregamento e descarregamento (kPa)
1A	SRA203(1)	5,10 - 5,70	5,550 - 5,650	Secundário - OCR (1,0)	200	42	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 350 - 200 - 100
1B			5,550 - 5,650	Relaxação imperfeita (*)	a partir de 200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 350 - 200 - 100
1C			5,550 - 5,650	Secundário - OCR (1,25)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 250 - 200 (acompanhamento) - 250 - 400 - 350 - 200 - 100
1D			5,550 - 5,650	Secundário - OCR (1,5)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 300 - 200 (acompanhamento) - 300 - 400 - 350 - 200 - 100
2A	SRA203(2)	6,00 - 6,60	6,475 - 6,550	Secundário - OCR (1,0)	200	19	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
2B			6,475 - 6,550	Relaxação imperfeita	a partir de 200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
2C			6,400 - 6,475	Secundário - OCR (1,25)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 250 - 200 (acompanhamento) - 250 - 400 - 800 - 400 - 200
2D			6,400 - 6,475	Amostra remoldada	50		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 - 50 (acompanhamento) - 100 - 200 - 400 - 800 - 200 - 400 - 800 - 400 - 200
3A	SRA203(3)	7,00 - 7,60	7,245 - 7,320	Secundário - OCR (1,0)	200	17	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
3B			7,320 - 7,395	Relaxação imperfeita	a partir de 200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
3C			7,245 - 7,320	Secundário - OCR (1,25)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 250 - 200 (acompanhamento) - 250 - 400 - 800 - 400 - 200
3D			7,320 - 7,395	Amostra remoldada	50		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 - 50 (acompanhamento) - 100 - 200 - 400 - 800 - 200 - 400 - 800 - 400 - 200

(*) Ensaio de relaxação imperfeita (1B) foi feita em duas etapas. Na primeira etapa, o anel dinamométrico foi mantido durante 17 dias. Transcorrido este período, o anel dinamométrico foi retirado e recolocado após 6 dias quando então iniciou-se a segunda etapa da relaxação imperfeita que durou 19 dias. Durante os 6 dias entre as etapas 1 e 2, o corpo de prova ficou submetido ao adensamento secundário puro.

Tabela 3.3B: Tipos de ensaios e seqüência de estágios de carregamento

Ensaio	Amostra	Profundidade da amostra (m)	Profundidade do segmento (m)	Tipo do ensaio	Tensão vertical efetiva de acompanhamento (kPa)	Duração do acompanhamento (dias)	Seqüência de estágios de carregamento e descarregamento (kPa)
4A	SRA203(4)	8,00 - 8,60	8,380 - 8,455	Secundário - OCR (1,0)	200	19	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
4B			8,455 - 8,530	Relaxação imperfeita	a partir de 200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
4C			8,380 - 8,455	Secundário - OCR (1,5)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 300 - 200 (acompanhamento) - 300 - 400 - 800 - 400 - 200
4D			8,455 - 8,530	Amostra remoldada	50		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 - 100 - 50 (acompanhamento) - 100 - 400 - 800 - 200 - 400 - 800 - 400 - 200
5A	SRA203(5)	9,00 - 9,60	9,335 - 9,385	Secundário - OCR (1,0)	200	47	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 (acompanhamento) - 300 - 400 - 800 - 400 - 200
5B			9,385 - 9,450	Relaxação imperfeita	a partir de 300		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 - 300 (acompanhamento) - 400 - 800 - 400 - 200
5C			9,385 - 9,450	Secundário - OCR (1,5)	200		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 - 300 - 200 (acompanhamento) - 300 - 400 - 800 - 400 - 200
5D			9,450 - 9,525	Amostra remoldada	50		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 - 100 - 50 (acompanhamento) - 100 - 400 - 800 - 200 - 400 - 800 - 400 - 200
6A	SRA203(6)	10,00 - 10,60	10,500 - 10,550	Secundário - OCR (1,0)	400	42	3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 - 400 (acompanhamento) - 800 - 400 - 200
6B			10,425 - 10,500	Secundário - OCR (1,8)	400		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 - 400 - 720 - 400 (acompanhamento) - 640 - 800 - 400 - 200
6C			10,425 - 10,500	Secundário - OCR (1,6)	400		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 150 - 200 - 400 - 640 - 400 (acompanhamento) - 640 - 800 - 400 - 200
6D			10,425 - 10,500	Amostra remoldada	50		3,125 - 6,25 - 12,5 - 25 - 50 - 100 - 200 - 100 - 50 (acompanhamento) - 100 - 400 - 800 - 200 - 400 - 800 - 400 - 200

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Parâmetros de compressibilidade e adensamento

A partir das curvas de compressibilidade foram obtidos os seguintes parâmetros:

- Índice de recompressão (C_r);
- Índice de compressão (C_c);
- Índice de expansão (C_e);
- Tensão de sobreadensamento (σ'_{vm});

O índice de recompressão (C_r) corresponde à inclinação da tangente à curva de recompressão no ponto correspondente à tensão vertical efetiva inicial (geostática) (σ'_{v0}) estimada com base no perfil de peso específico e na profundidade de cada amostra.

O índice de compressão (C_c) corresponde à inclinação da reta de compressão virgem, definida pelos pontos até a tensão vertical efetiva final de campo estimada (σ'_{vf}). Esta tensão foi estimada somando-se a tensão vertical efetiva inicial e o acréscimo de tensão vertical ($\Delta\sigma'_v$) efetiva provocado pelo peso do aterro do Terminal Portuário da Embraport que corresponderá à aproximadamente 200kPa, considerando o efeito de submersão.

O índice de expansão (C_e) corresponde à inclinação da reta de descarregamento final.

A tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) foi determinada pelo método de Pacheco Silva.

A figura 4.1, a seguir, ilustra a determinação da tensão de sobreadensamento (σ'_{vm}) pelo Método de Pacheco Silva.

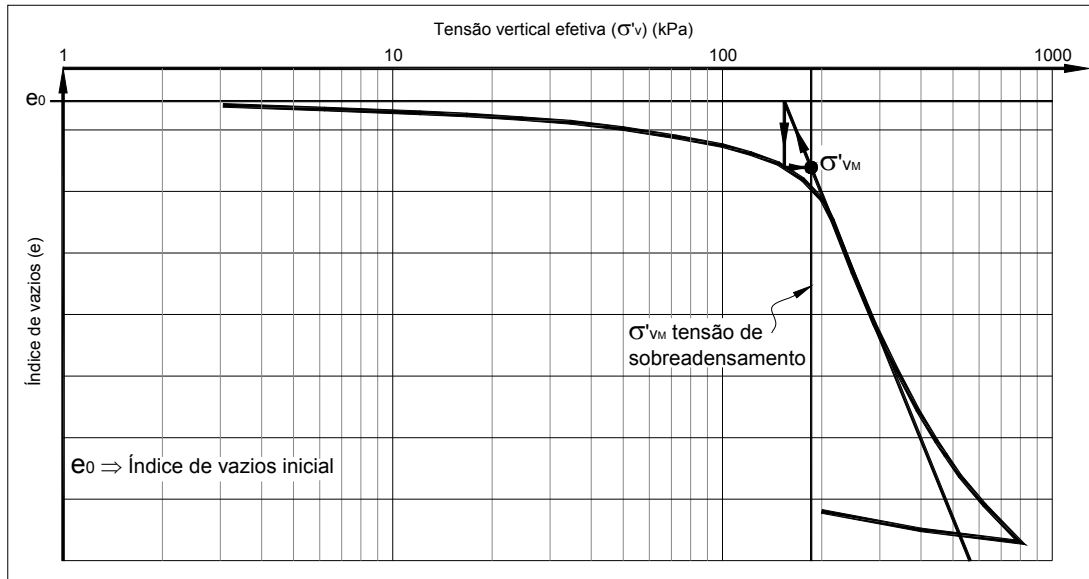


Figura 4.1: Determinação da tensão de sobreadensamento pelo método de Pacheco Silva

A figura 4.2, a seguir, ilustra a determinação do índice de recompressão (C_r), do índice de compressão (C_c) e do índice de expansão (C_e).

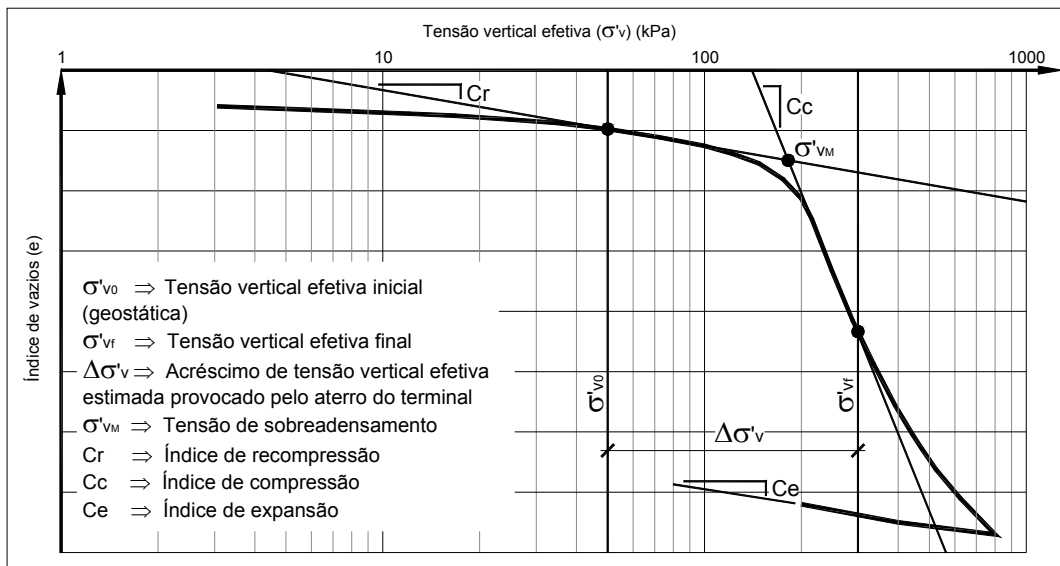


Figura 4.2: Determinação do índice de recompressão (C_r), do índice de compressão (C_c) e do índice de expansão (C_e)

A tabela 4.1, a seguir, apresenta os parâmetros de compressibilidade obtidos. Os parâmetros de compressibilidade foram determinados a partir da curva de compressibilidade correspondente à velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1} .

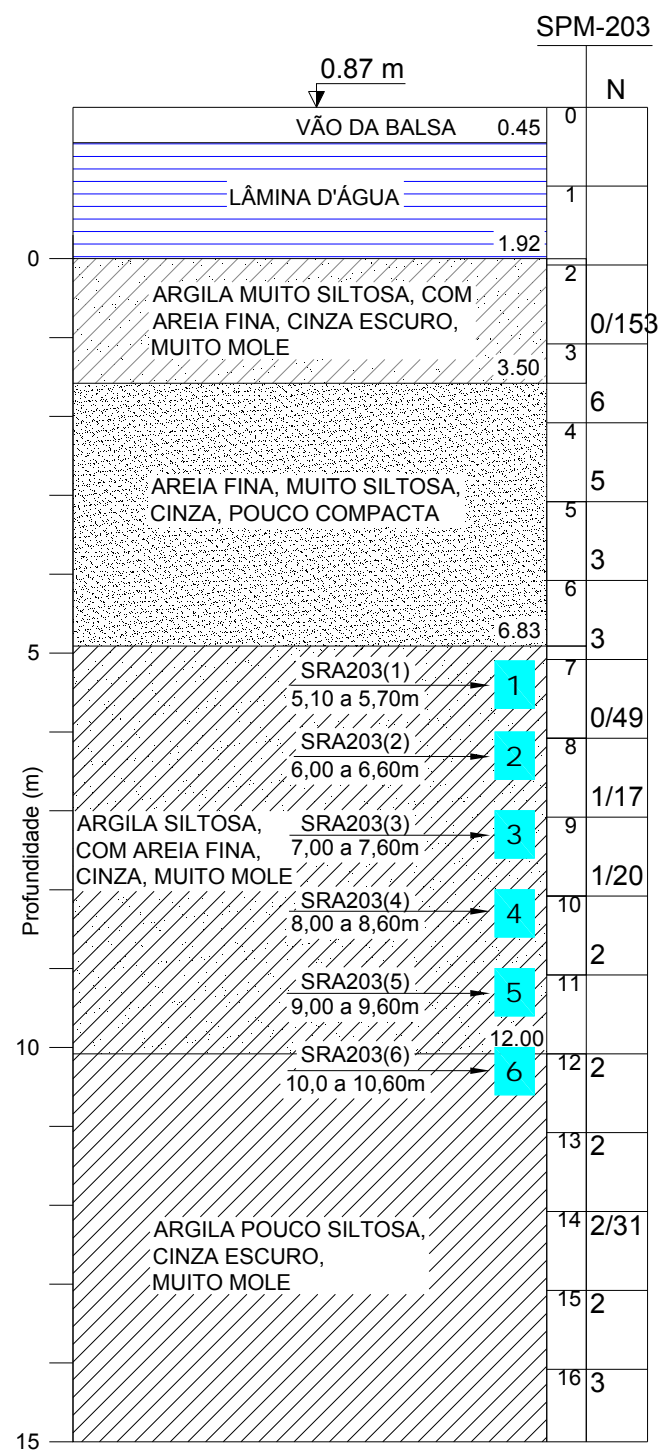
A figura 4.3 adiante apresenta os perfis dos parâmetros de compressibilidade com a profundidade dos corpos de prova indeformados.

Não foram determinados os parâmetros de compressibilidade dos ensaios realizados na amostra SRA-203(2), em virtude desta ser bastante arenosa e, por esse motivo, não apresentar a tensão de sobreadensamento bem definida.

Tabela 4.1: Parâmetros obtidos a partir das curvas de compressibilidade correspondente à velocidade de deformação específica igual a 10^{-6} s^{-1}

Ensaio	Amostra	Profundidade da amostra (m)	Profundidade do corpo de prova (m)	Índice de vazios inicial e_0	σ'_{vm} (kPa)	Cr	Cc	$Cc/(1+e_0)$	Ce
1A	SRA203(1)	5,10 - 5,70	5,550 - 5,650	1,30	100	0,08	0,48	0,21	0,02
1B			5,550 - 5,650	1,35	100	0,09	0,46	0,20	0,02
1C			5,550 - 5,650	1,37	92	0,09	0,51	0,22	0,02
1D			5,550 - 5,650	1,44	90	0,10	0,57	0,23	0,02
2A	SRA203(2)	6,00 - 6,60	6,475 - 6,550	1,07	-	-	-	-	-
2B			6,475 - 6,550	1,11	-	-	-	-	-
2C			6,400 - 6,475	1,00	-	-	-	-	-
2D (*)			6,400 - 6,475	1,11	-	-	-	-	-
3A	SRA203(3)	7,00 - 7,60	7,245 - 7,320	1,55	105	0,10	0,80	0,31	0,06
3B			7,320 - 7,395	1,69	100	0,10	0,86	0,32	0,06
3C			7,245 - 7,320	1,52	120	0,11	0,66	0,26	0,05
3D (*)			7,320 - 7,395	1,88	35	-	0,67	0,23	0,06
4A	SRA203(4)	8,00 - 8,60	8,380 - 8,455	2,24	170	0,14	1,91	0,59	0,15
4B			8,455 - 8,530	2,26	165	0,19	1,73	0,53	0,15
4C			8,380 - 8,455	2,17	170	0,19	1,89	0,60	0,13
4D (*)			8,455 - 8,530	2,31	70	0,47	0,90	0,27	0,15
5A	SRA203(5)	9,00 - 9,60	9,335 - 9,385	1,97	170	0,17	1,56	0,53	0,10
5B			9,385 - 9,450	2,02	165	0,20	1,53	0,51	0,11
5C			9,385 - 9,450	2,14	155	0,18	1,42	0,45	0,11
5D (*)			9,450 - 9,525	-	65	0,50	0,66	-	0,11
6A	SRA203(6)	10,00 - 10,60	10,500 - 10,550	2,53	175	0,15	2,22	0,63	0,16
6B			10,425 - 10,500	2,57	175	0,20	2,18	0,61	0,14
6C			10,425 - 10,500	2,60	180	0,21	2,37	0,66	0,17
6D (*)			10,425 - 10,500	2,58	80	-	1,17	0,33	0,10

(*) Corpos de prova remoldados no laboratório.



PERFIS DOS PARÂMETROS DE COMPRESSIBILIDADE

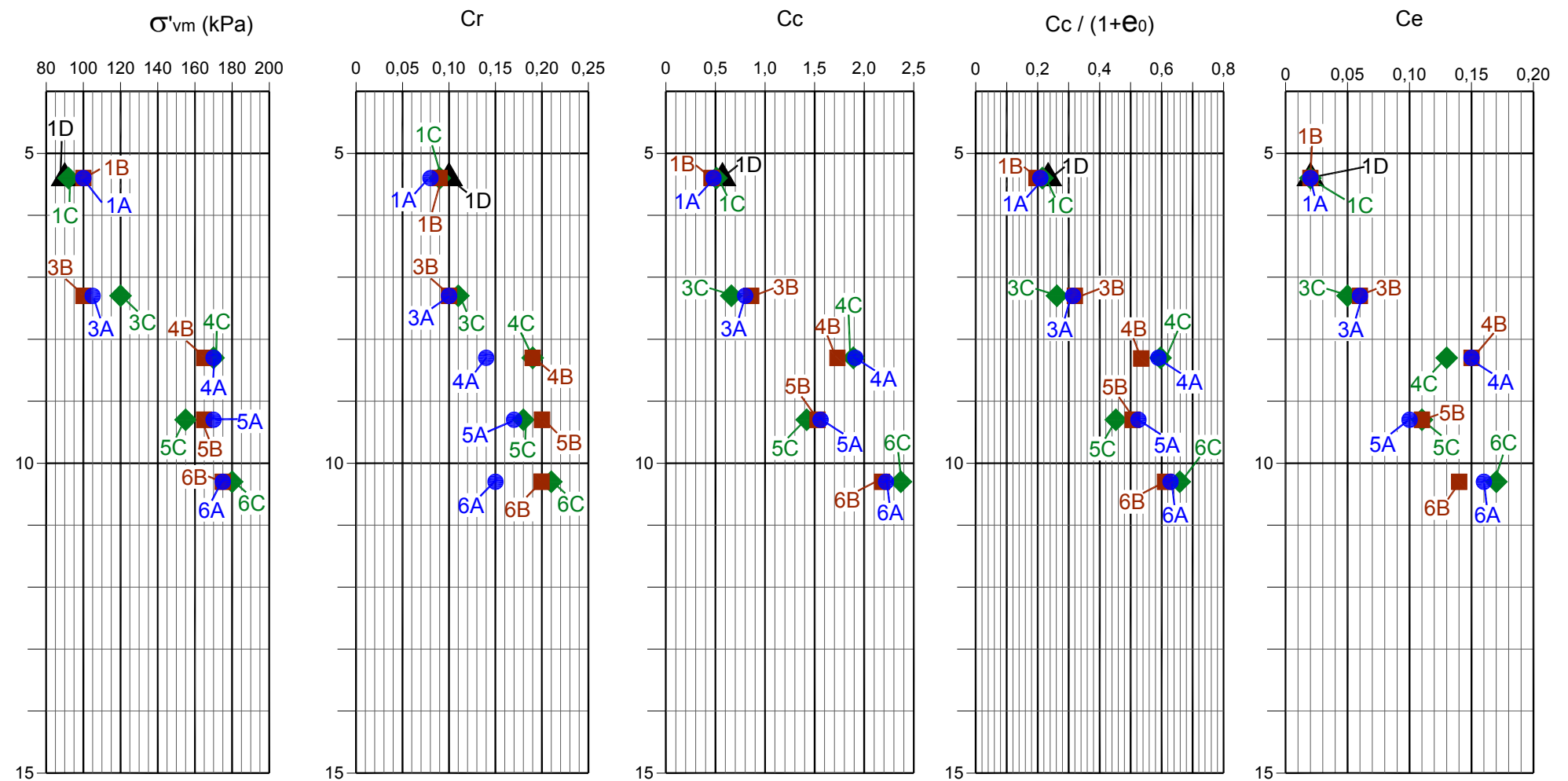


Figura 4.3 Perfis dos parâmetros de compressibilidade

Em cada estágio de carregamento foi determinado o coeficiente de adensamento (c_v) e a leitura do extensômetro correspondente ao “fim” do adensamento primário pelo método de Taylor. Para o critério de aplicação de estágio de carga adotado, não é possível determinar com acurácia o “fim” do adensamento primário e, por conseguinte, o coeficiente de adensamento (c_v) pelo Método de Casagrande. Isto se deve ao fato deste critério impedir a obtenção de pontos suficientes para a definição da reta de compressão secundária na curva de adensamento plotada em termos de tempo em escala logarítmica. Ainda assim, em todos os ensaios realizados verificou-se que a velocidade de deformação específica igual a 10^{-6} s^{-1} é atingida após o “fim” do adensamento primário mesmo quando determinado pelo método de Casagrande, para corpos de prova cuja distância de drenagem é menor ou igual a 1cm.

As figuras 4.4 a 4.51 apresentam as curvas de compressibilidade em termos de índice de vazios, e as curvas de coeficiente de adensamento (c_v) x tensão vertical efetiva média de cada estágio de cada ensaio individualmente.

As figuras 4.52 a 4.63 apresentam as curvas de compressibilidade em termos de deformação volumétrica e as curvas de coeficiente de adensamento (c_v) x tensão vertical efetiva média de cada estágio reunindo os ensaios feitos na mesma amostra.

Nas curvas individuais de compressibilidade plotadas em termos de índice de vazios, a linha com círculos corresponde à velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1} e a linha com quadrados corresponde ao “fim” do adensamento primário calculado pelo método de Taylor. Todas as curvas de compressibilidade plotadas em termos de deformação volumétrica correspondem à velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1} .

As figuras 4.64 a 4.86 apresentam as curvas de adensamento ($\epsilon_v \times t$) e de relaxação imperfeita ($\sigma'_v \times t$) dos estágios de longa duração. Não foram plotadas as curvas de adensamento ($\epsilon_v \times t$) e de relaxação imperfeita ($\sigma'_v \times t$) dos ensaios da amostra SRA203(2) pelo fato desta ser bastante arenosa.

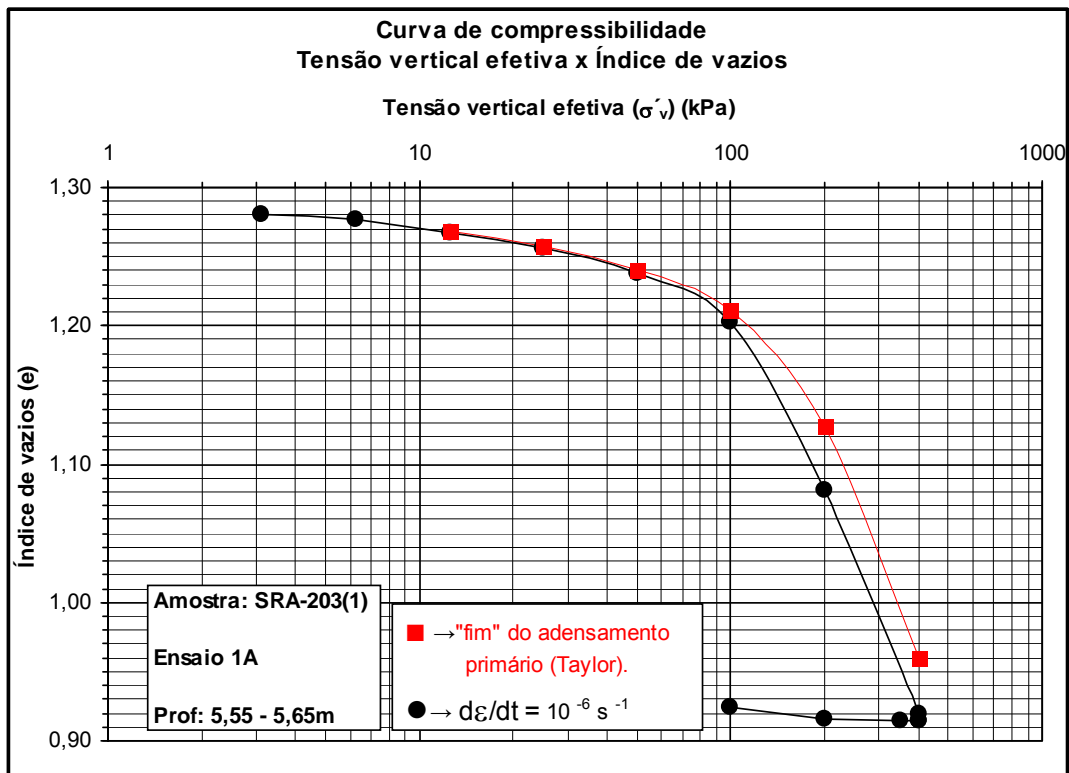


Figura 4.4: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1A

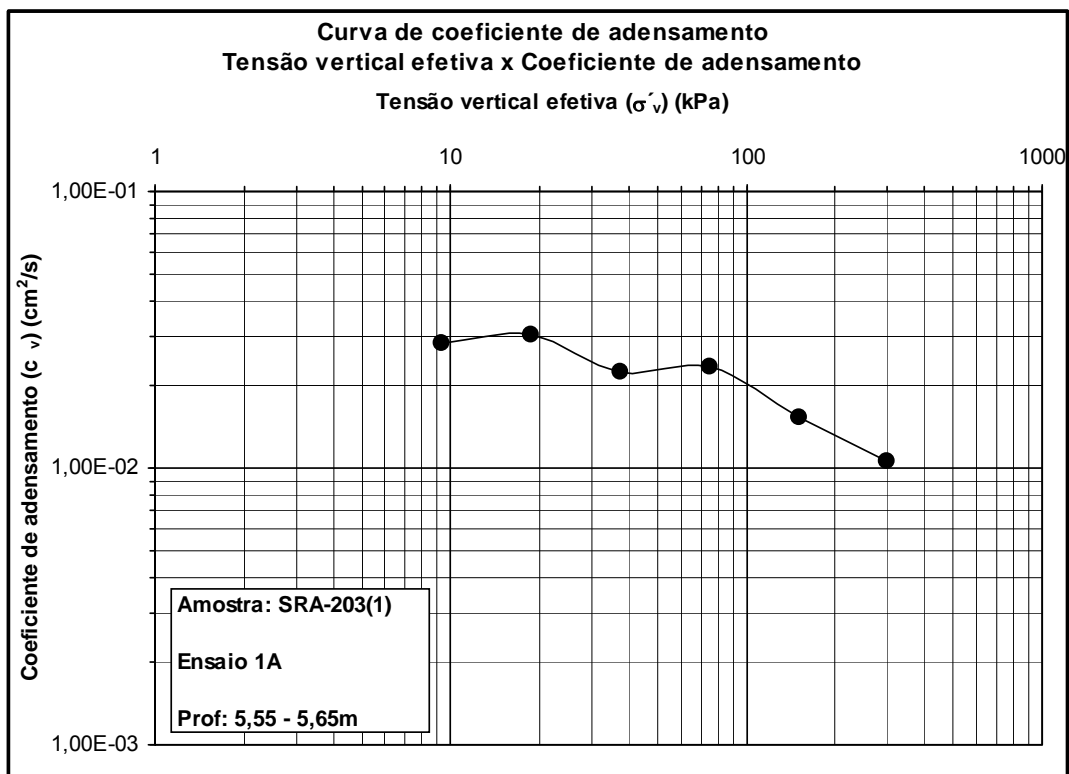


Figura 4.5: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1A

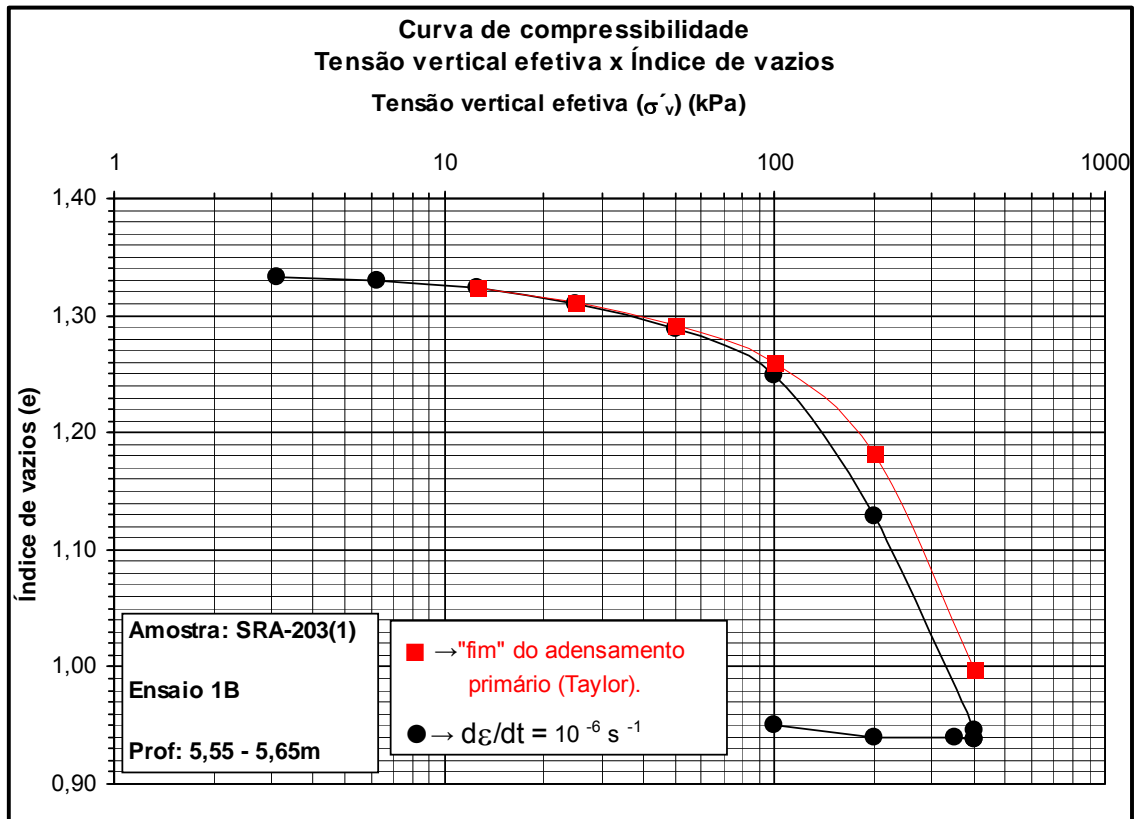


Figura 4.6: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1B

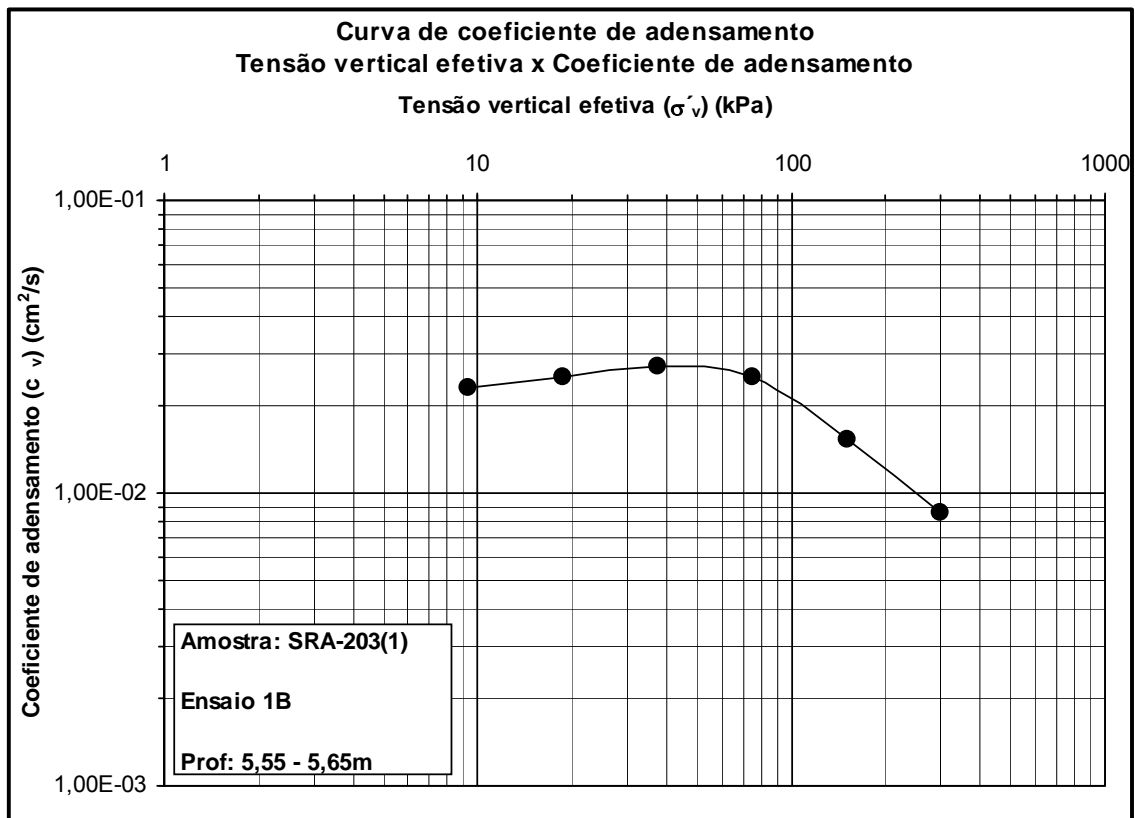


Figura 4.7: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1B

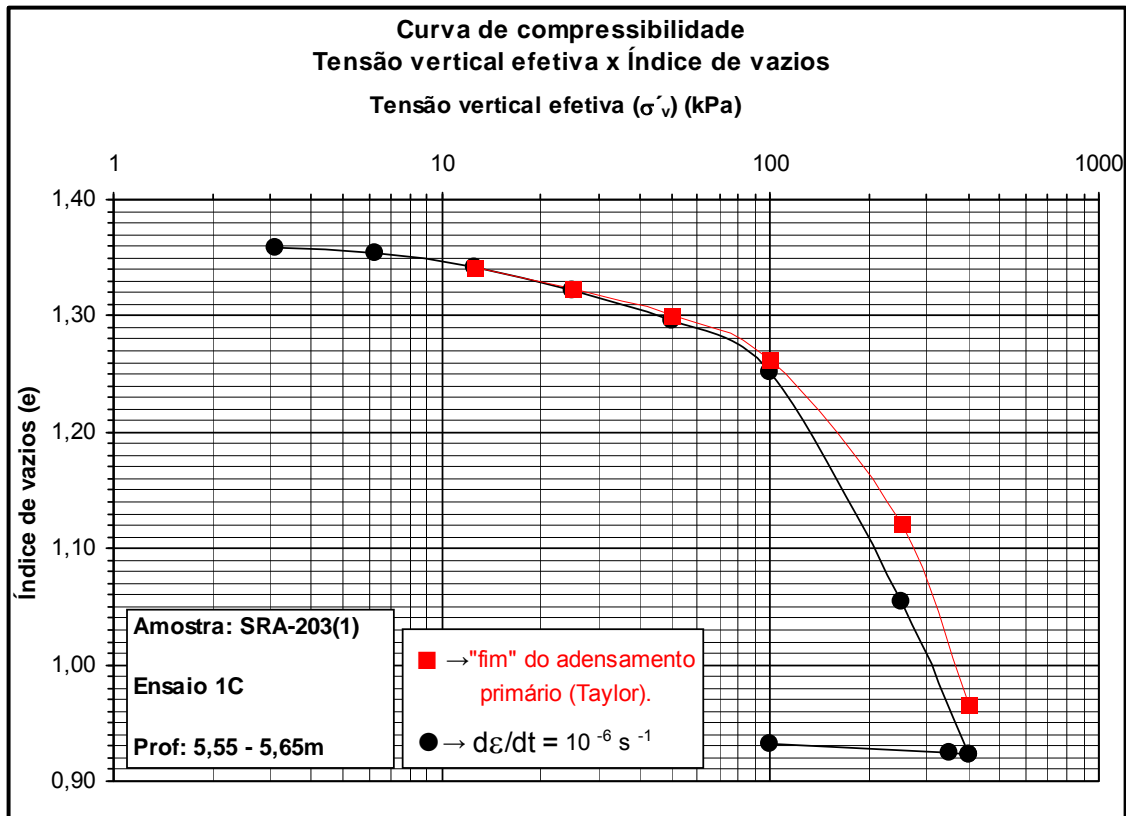


Figura 4.8: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1C

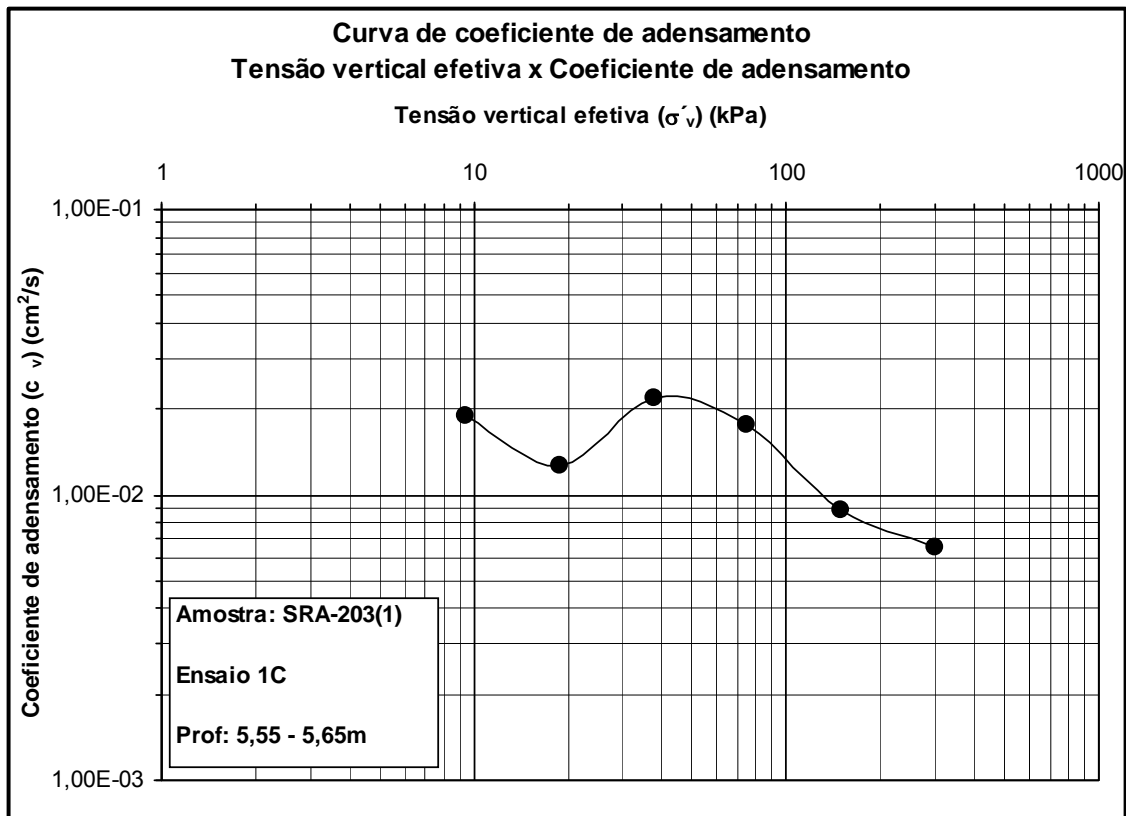


Figura 4.9: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1C

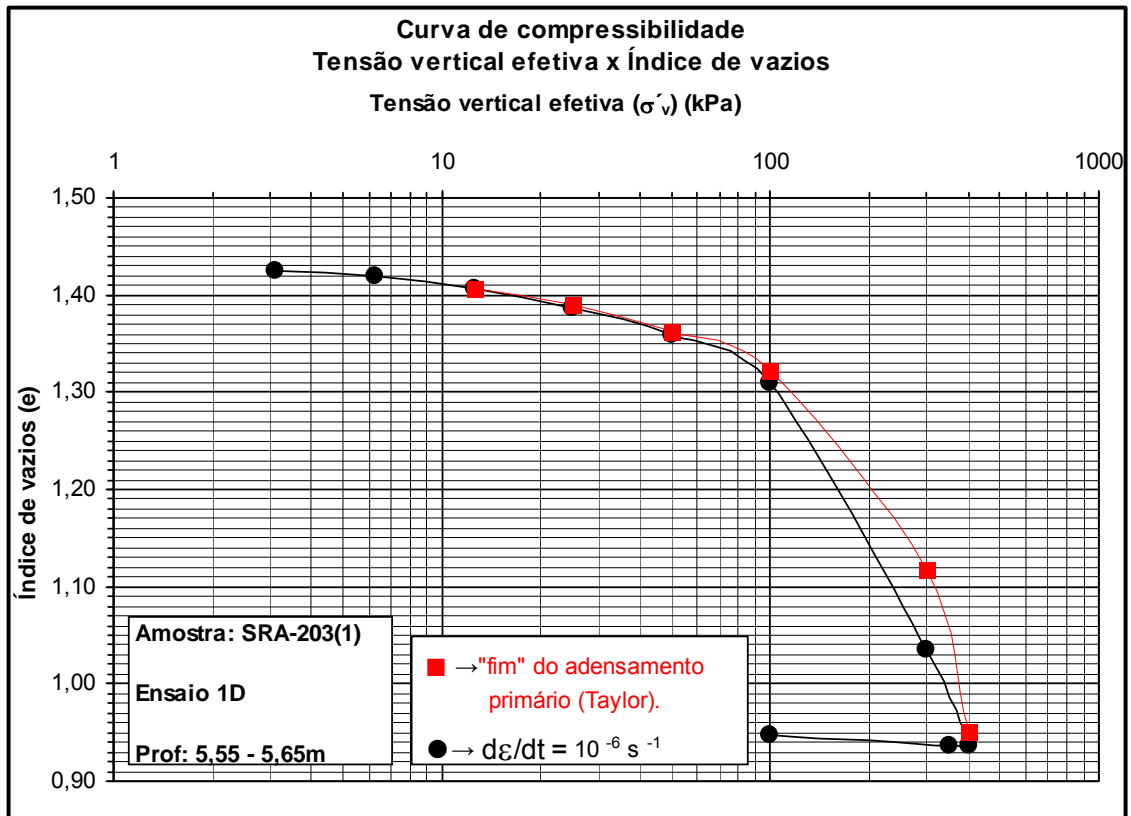


Figura 4.10: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 1D

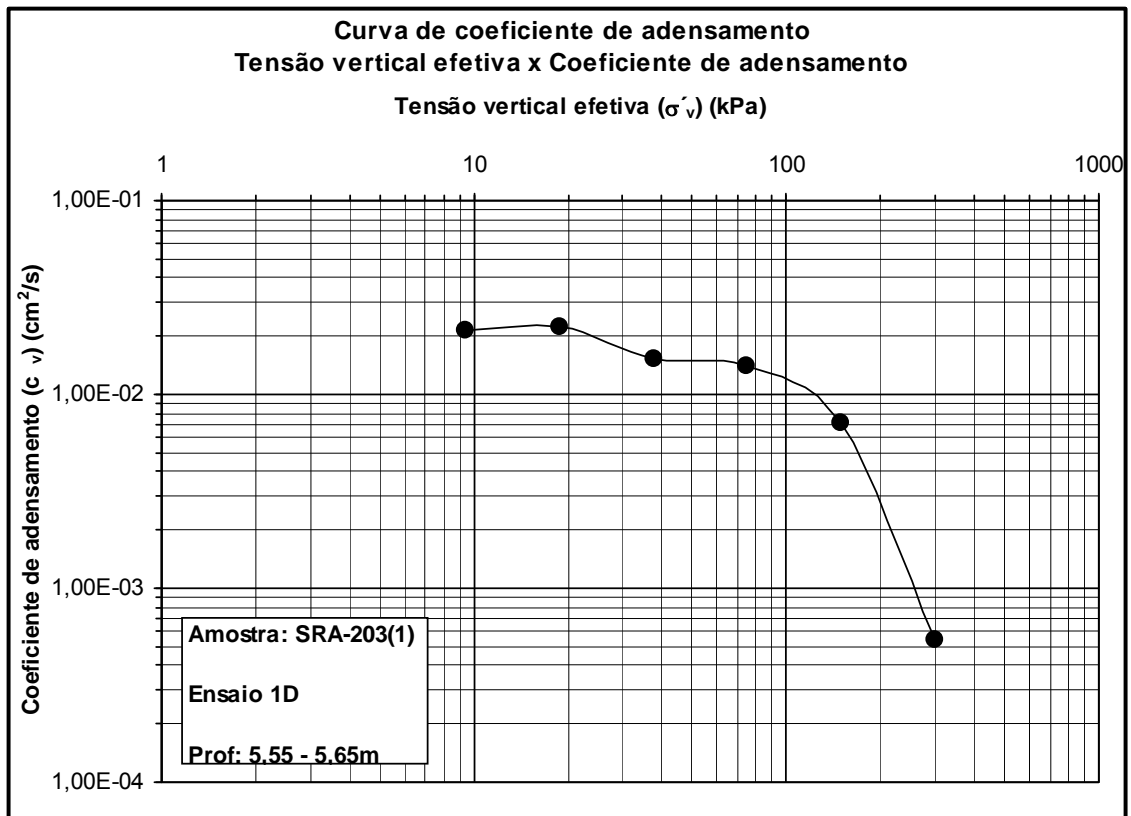


Figura 4.11: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 1D

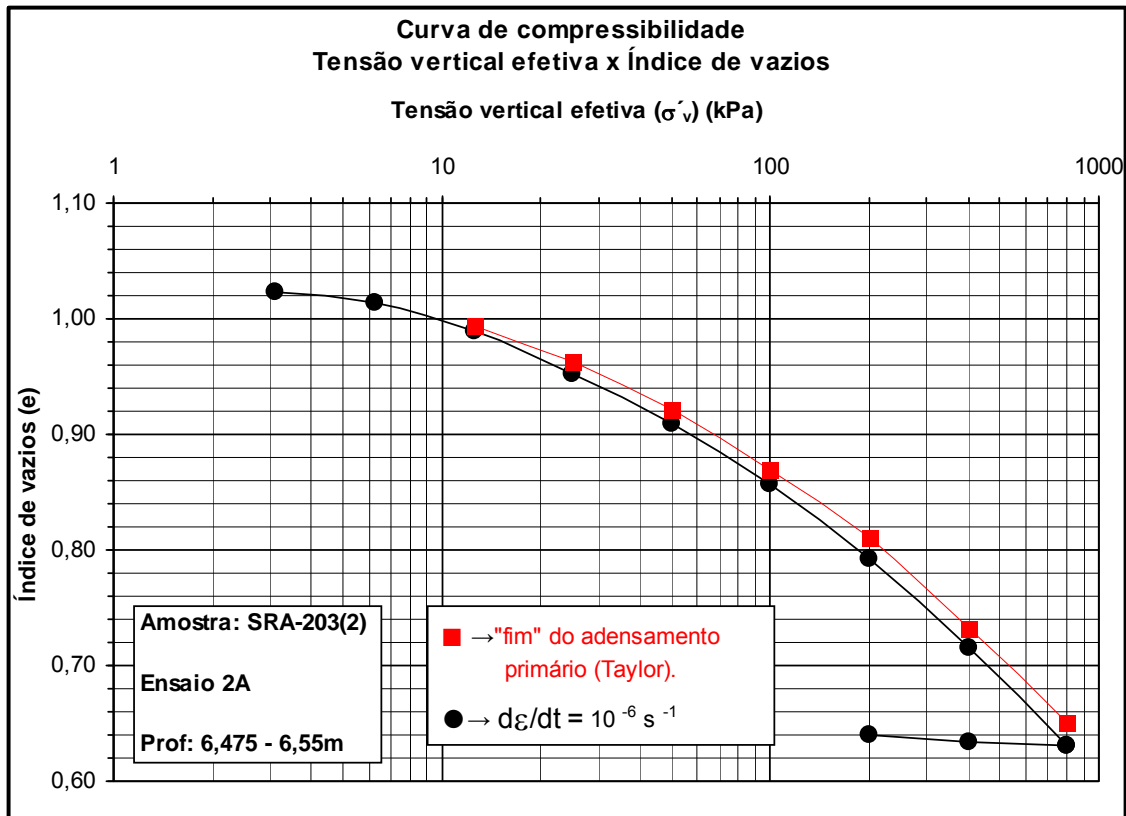


Figura 4.12: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2A

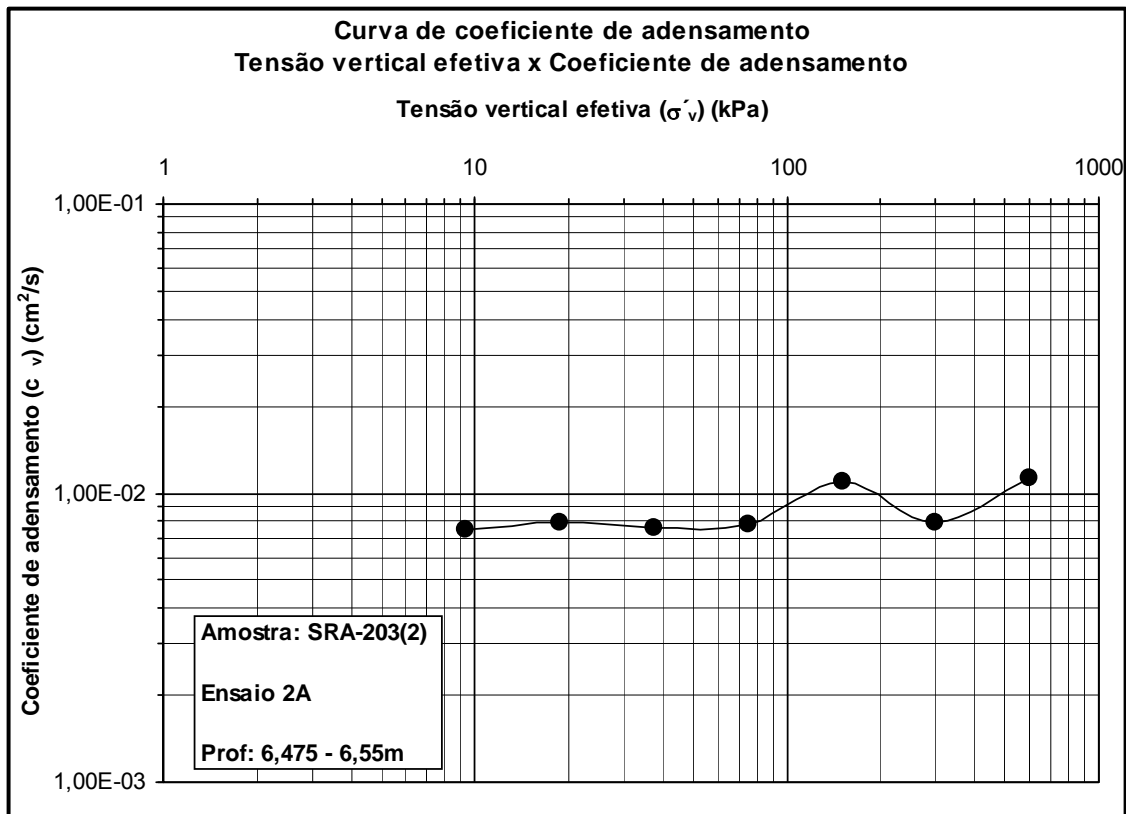


Figura 4.13: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2A

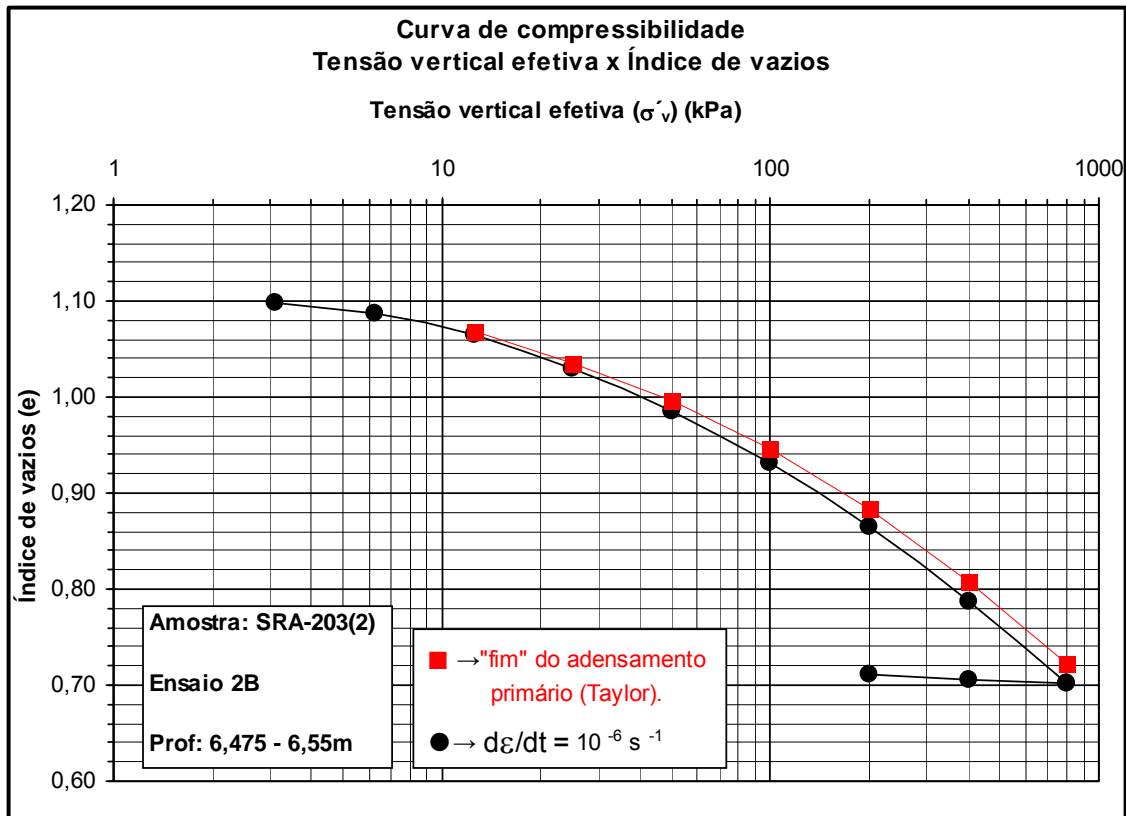


Figura 4.14: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2B

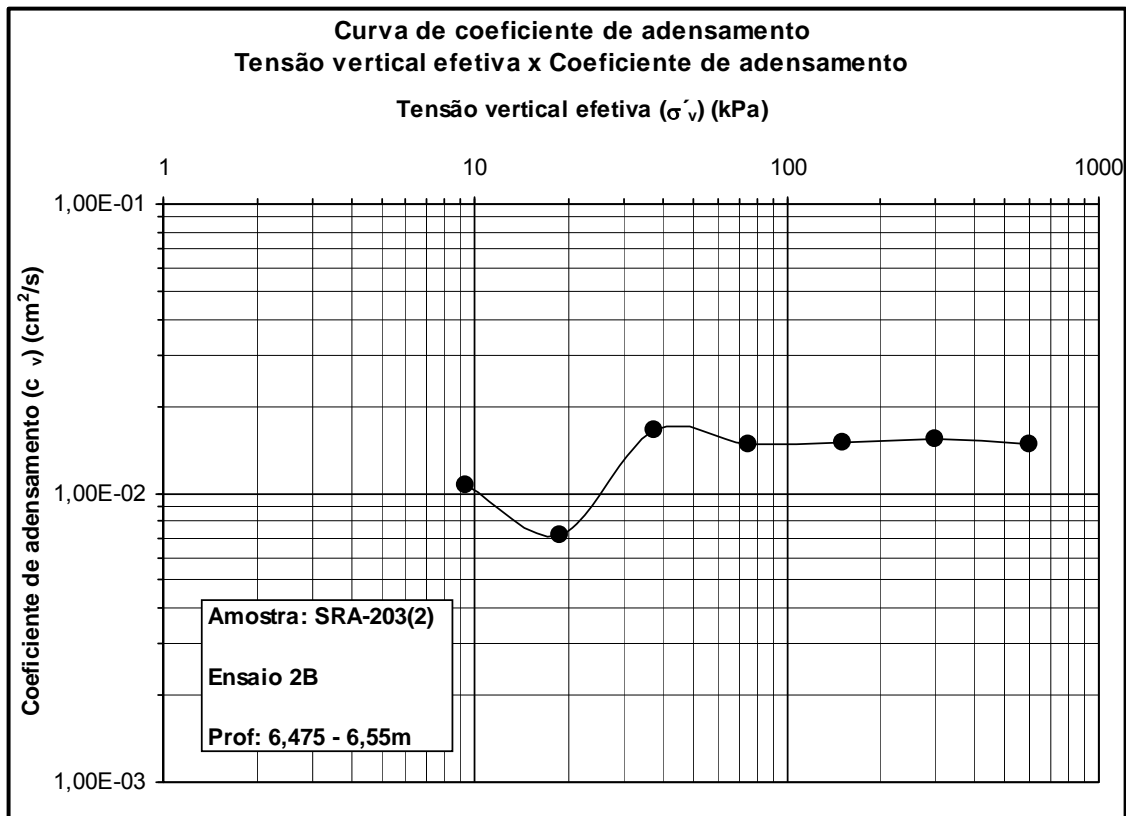


Figura 4.15: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2B

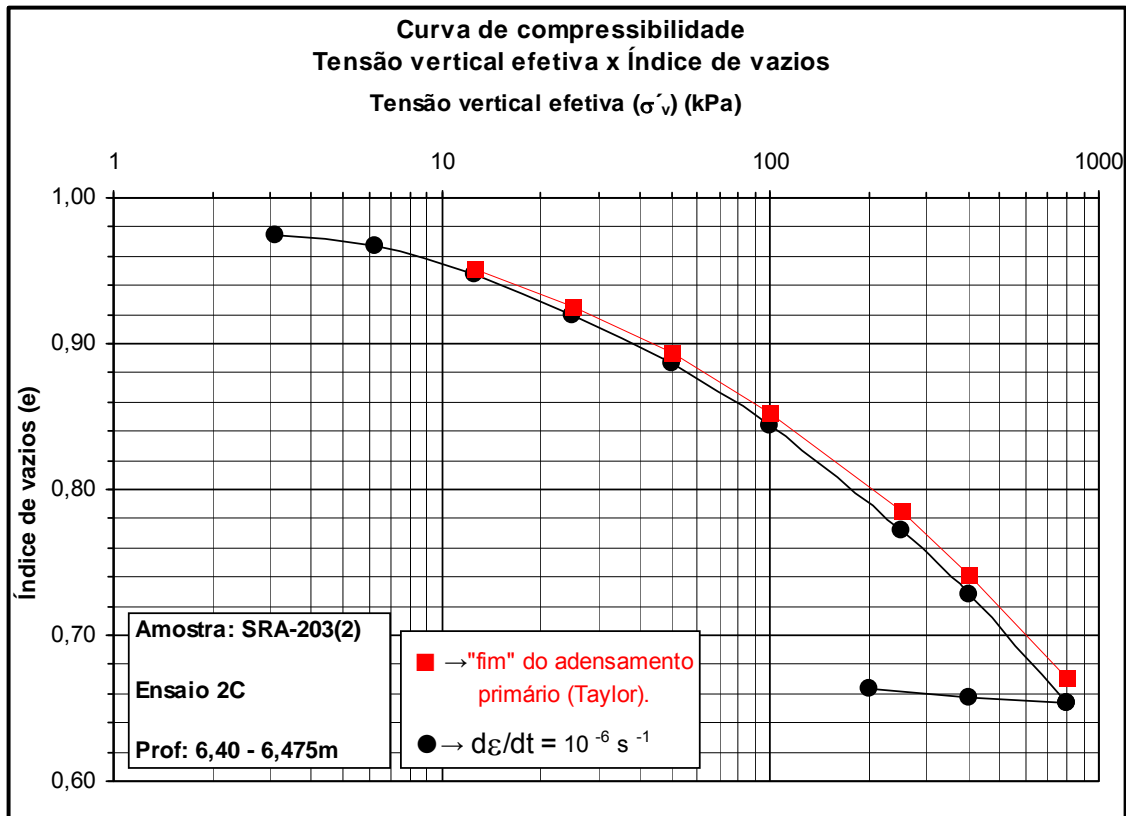


Figura 4.16: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2C

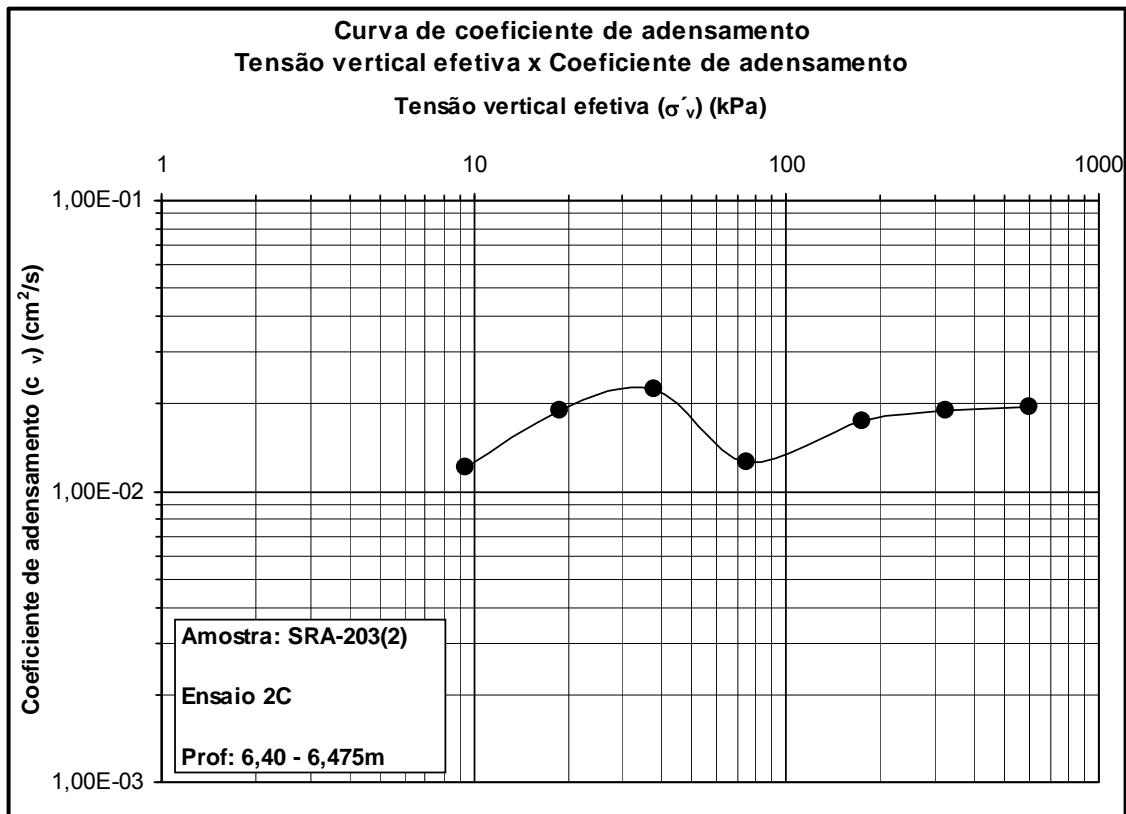


Figura 4.17: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2C

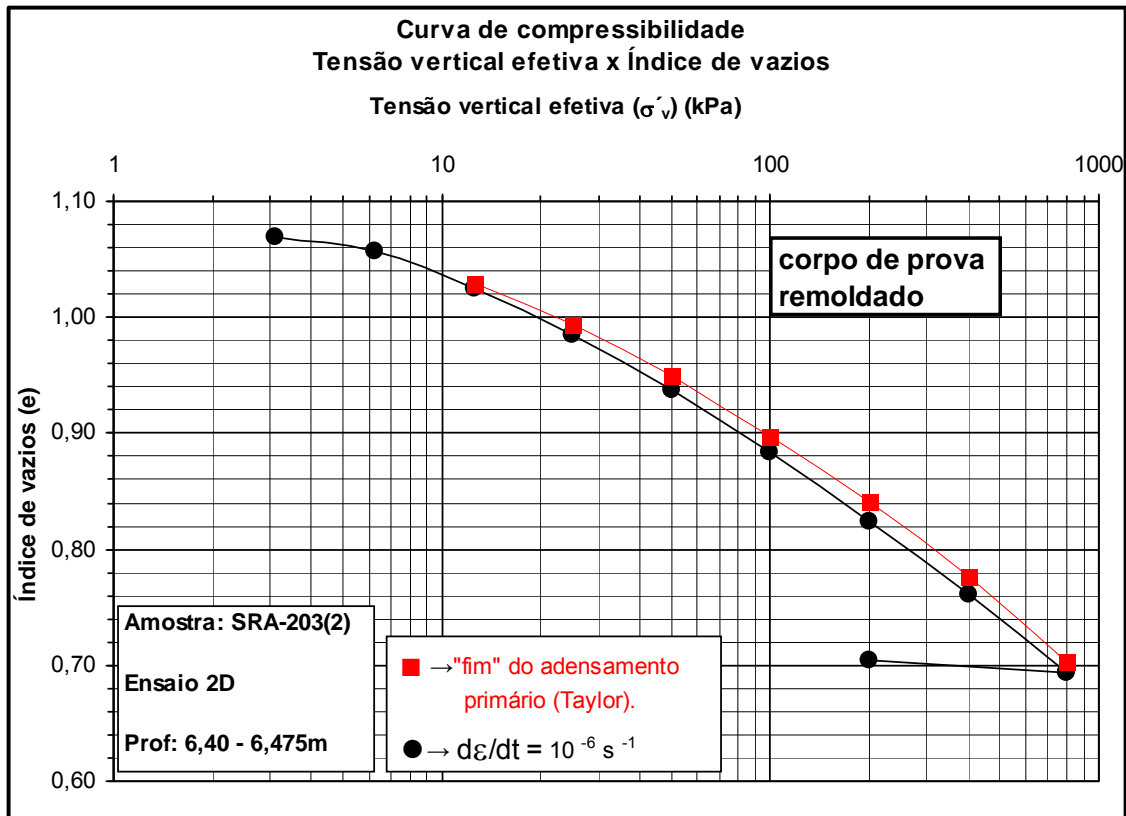


Figura 4.18: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 2D

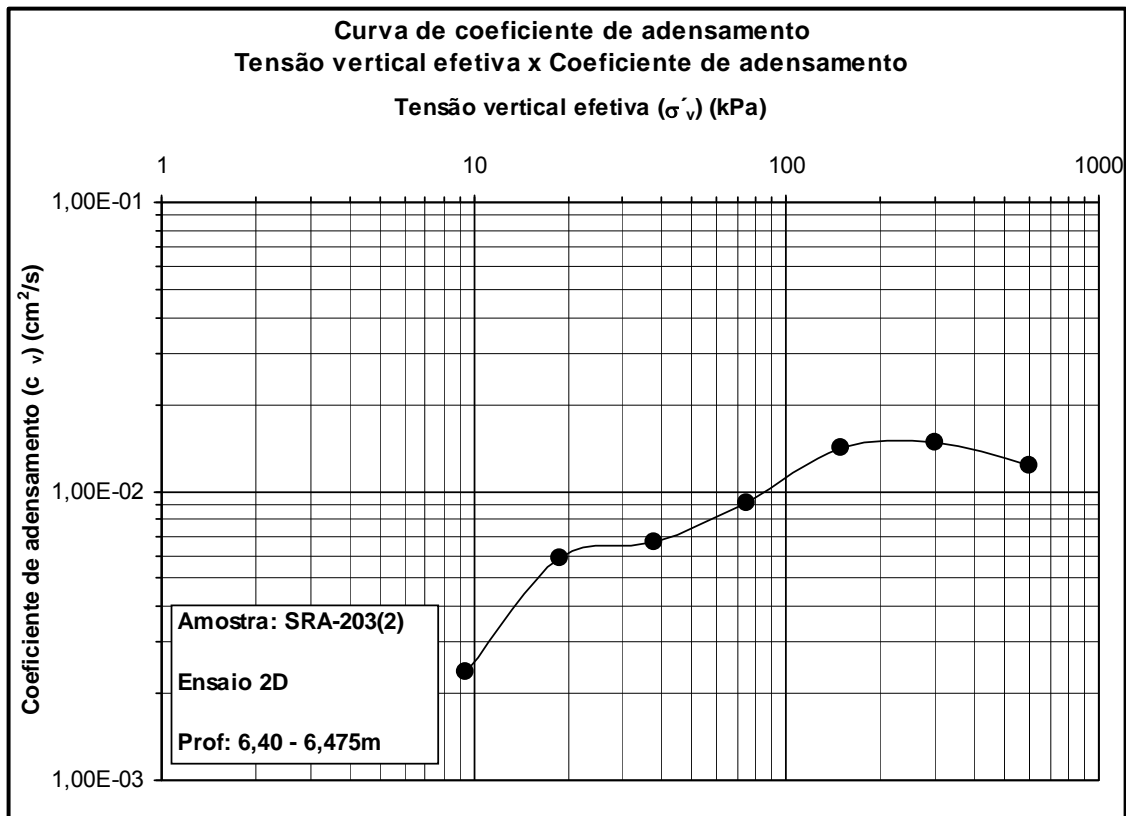


Figura 4.19: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 2D

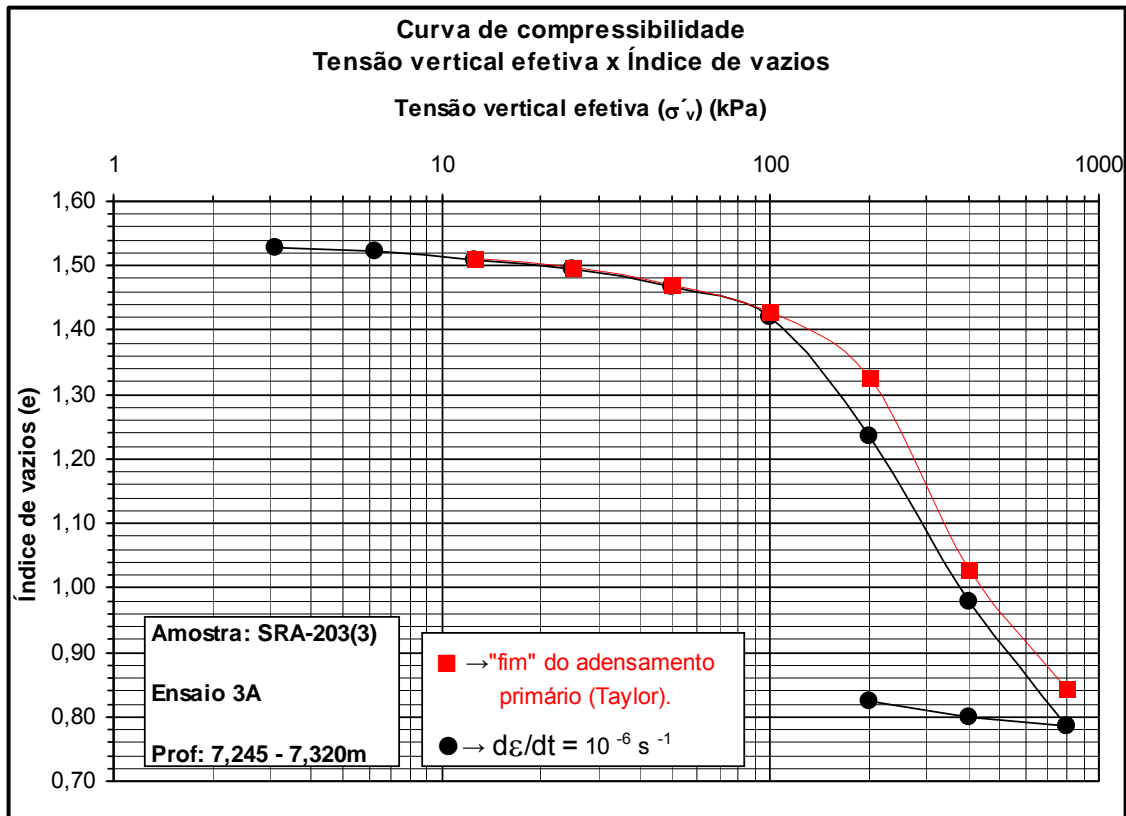


Figura 4.20: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3A

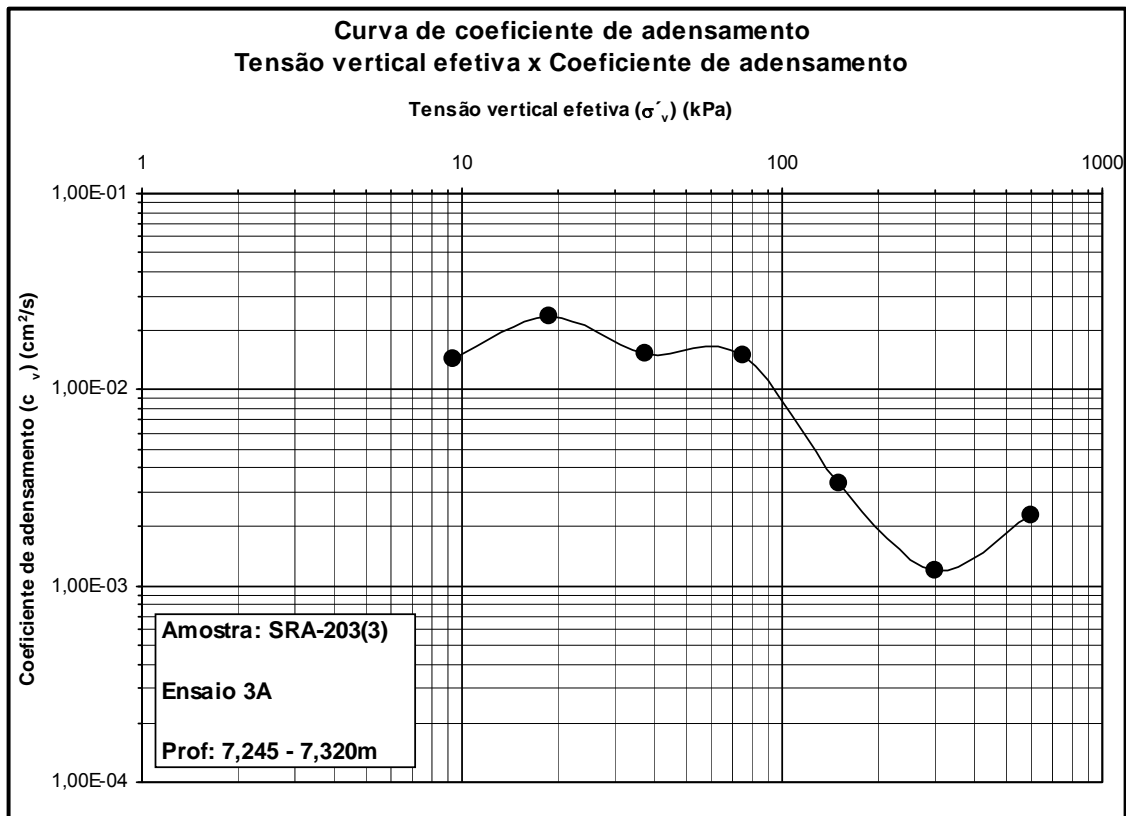


Figura 4.21: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3A

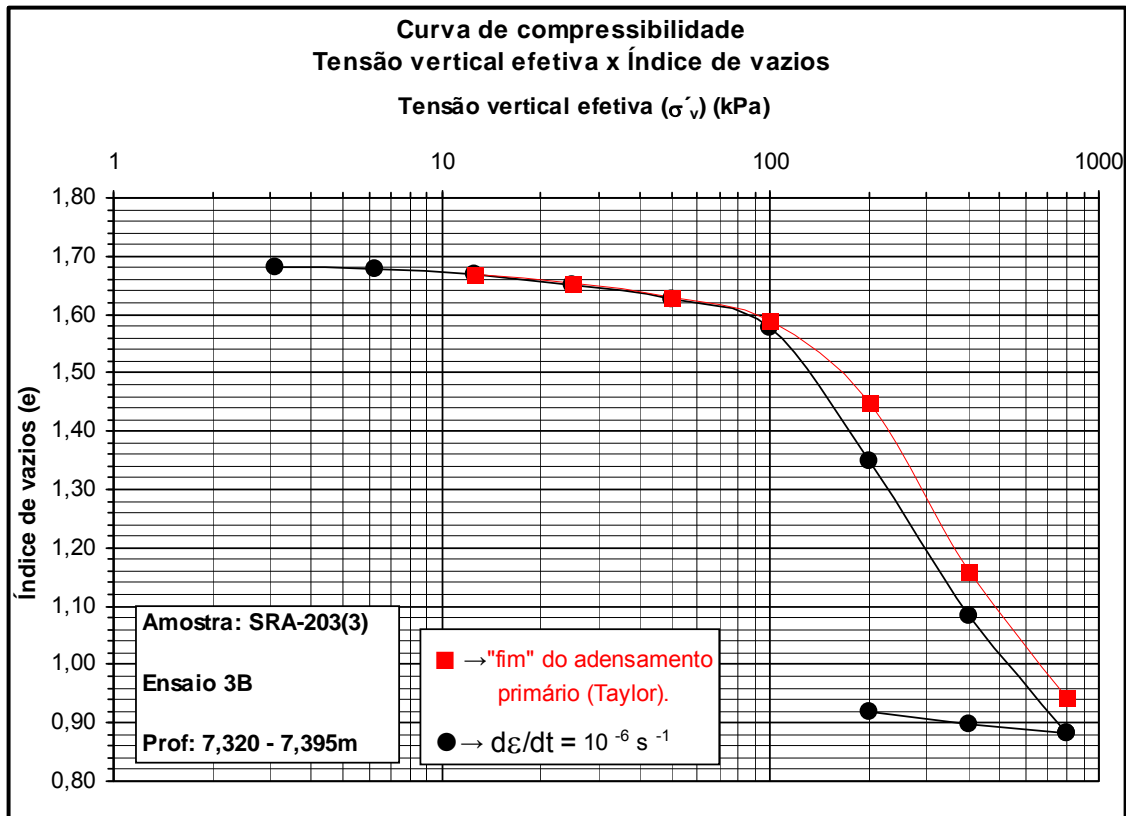


Figura 4.22: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3B

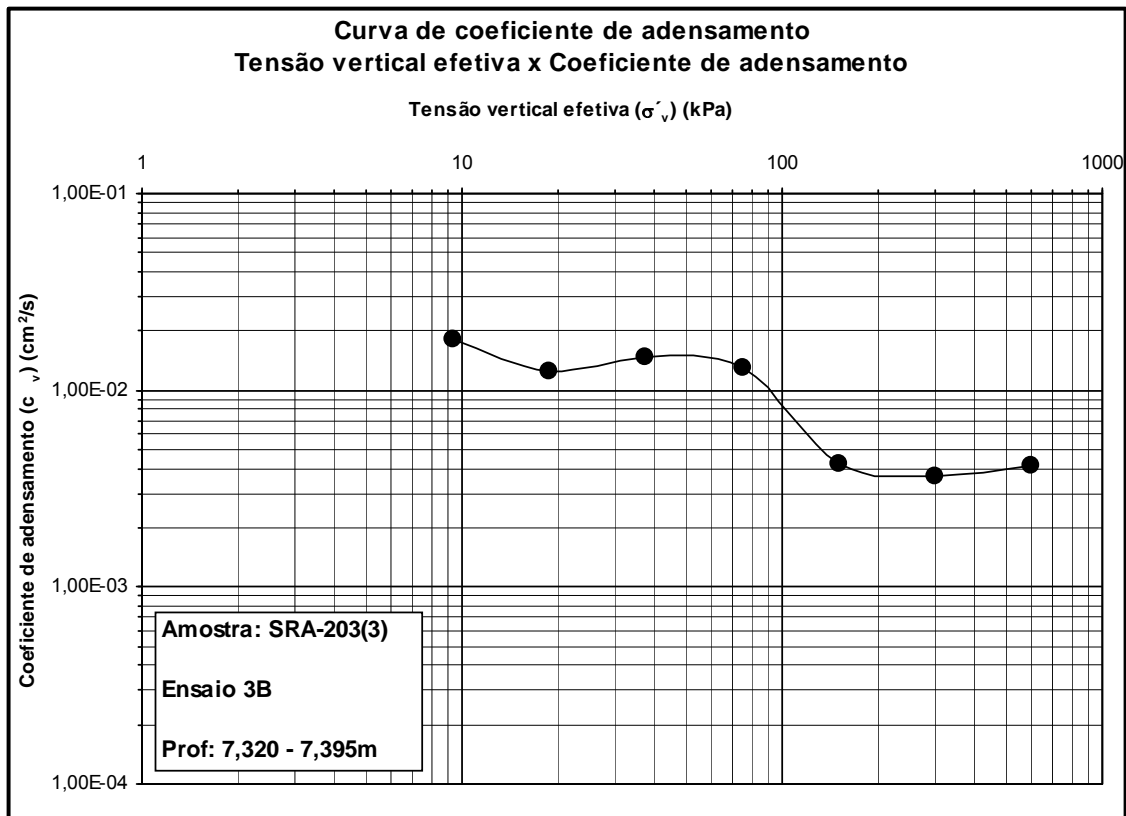


Figura 4.23: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3B

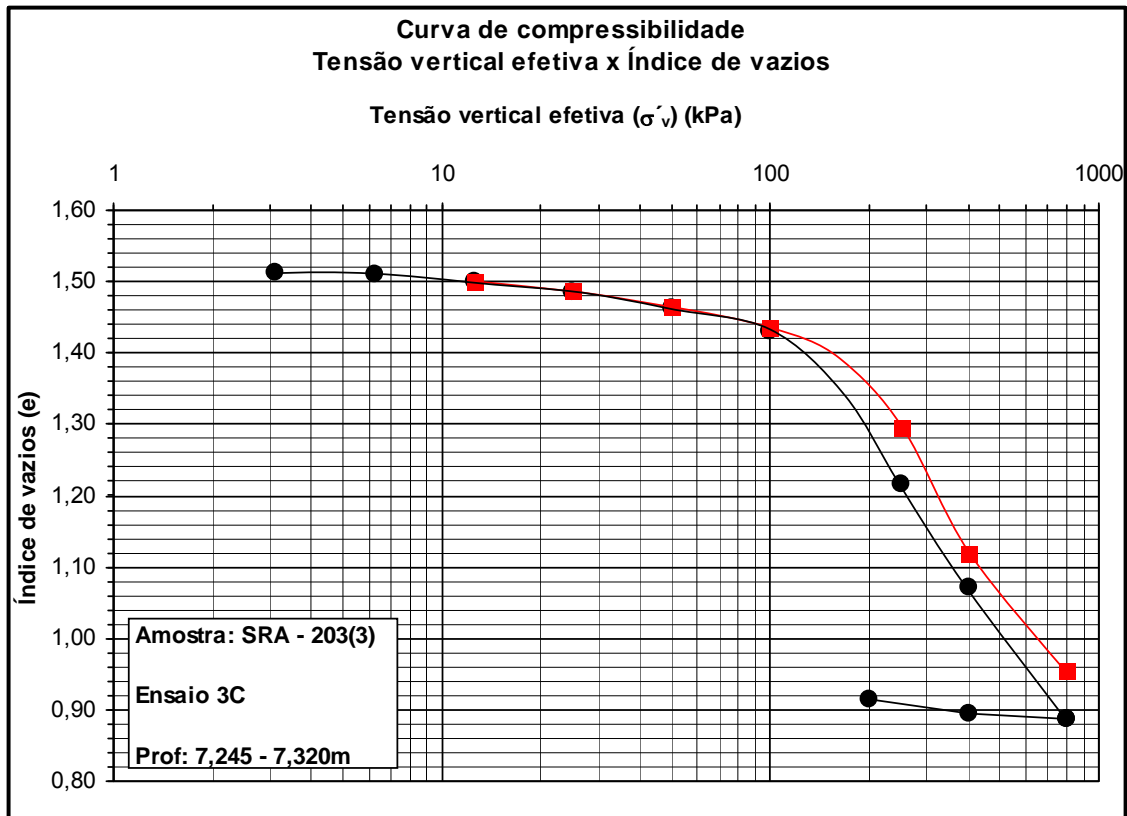


Figura 4.24: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3C

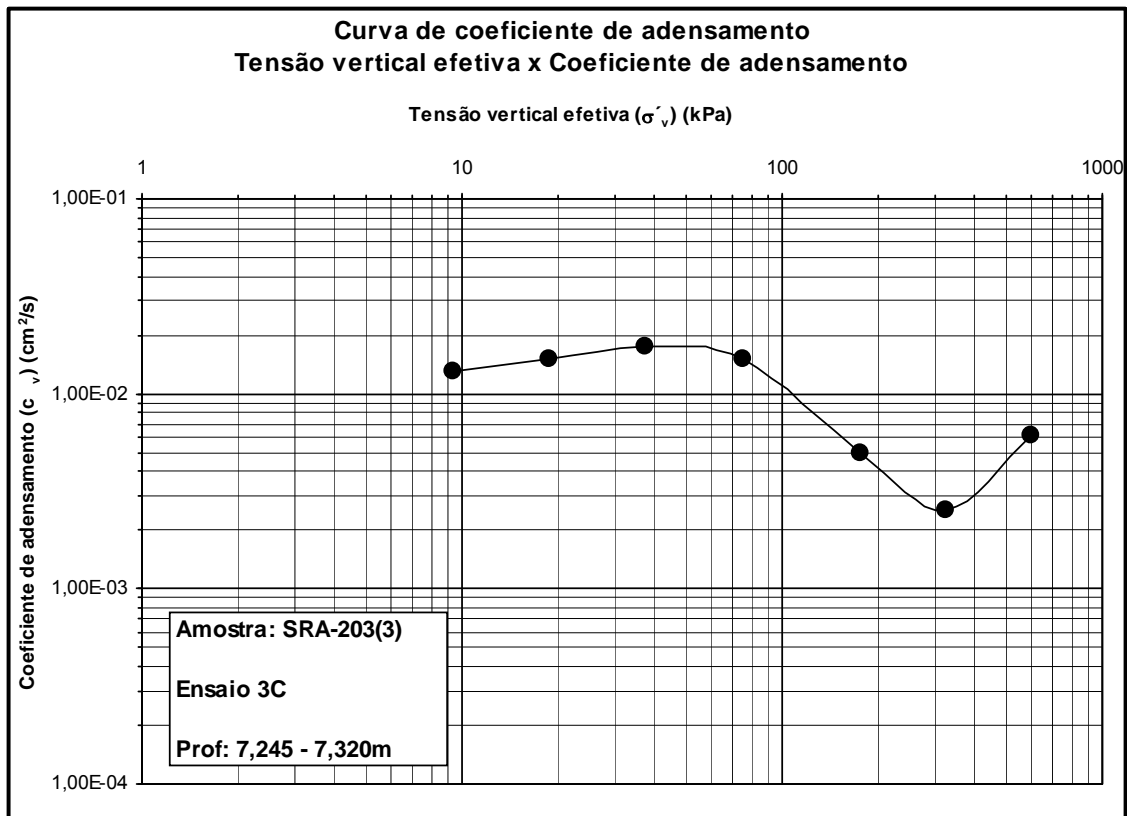


Figura 4.25: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3C

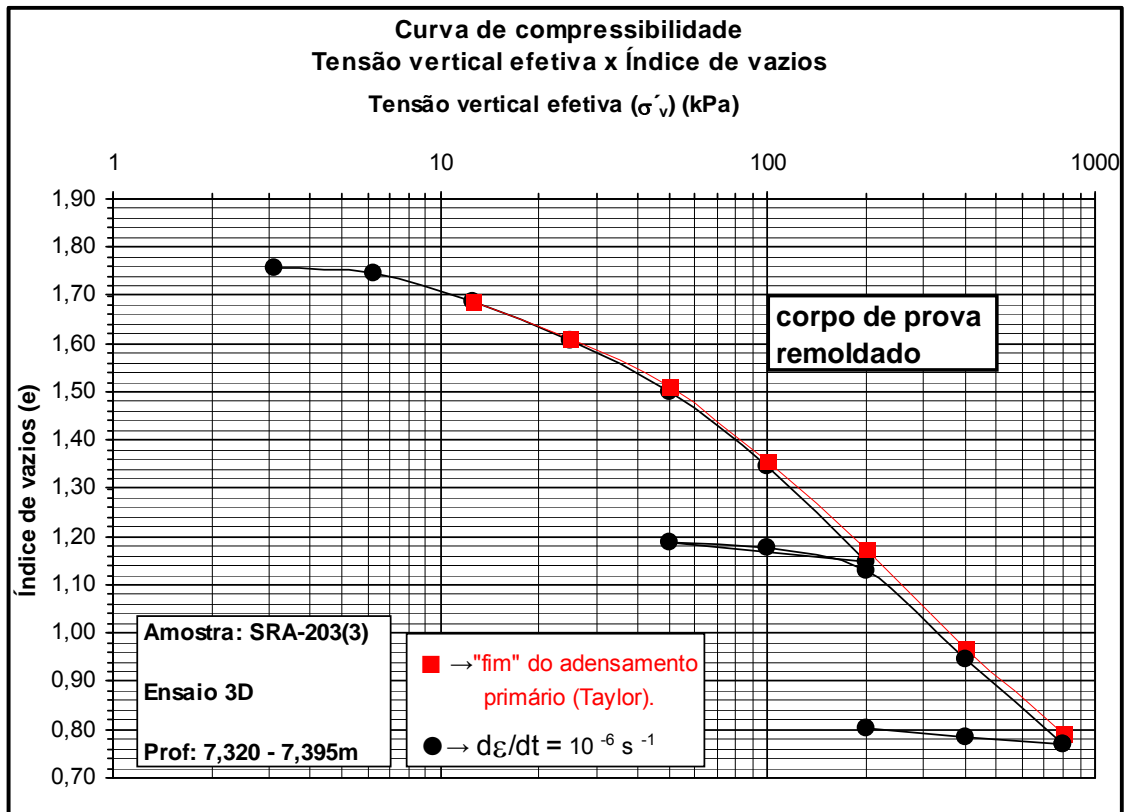


Figura 4.26: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 3D

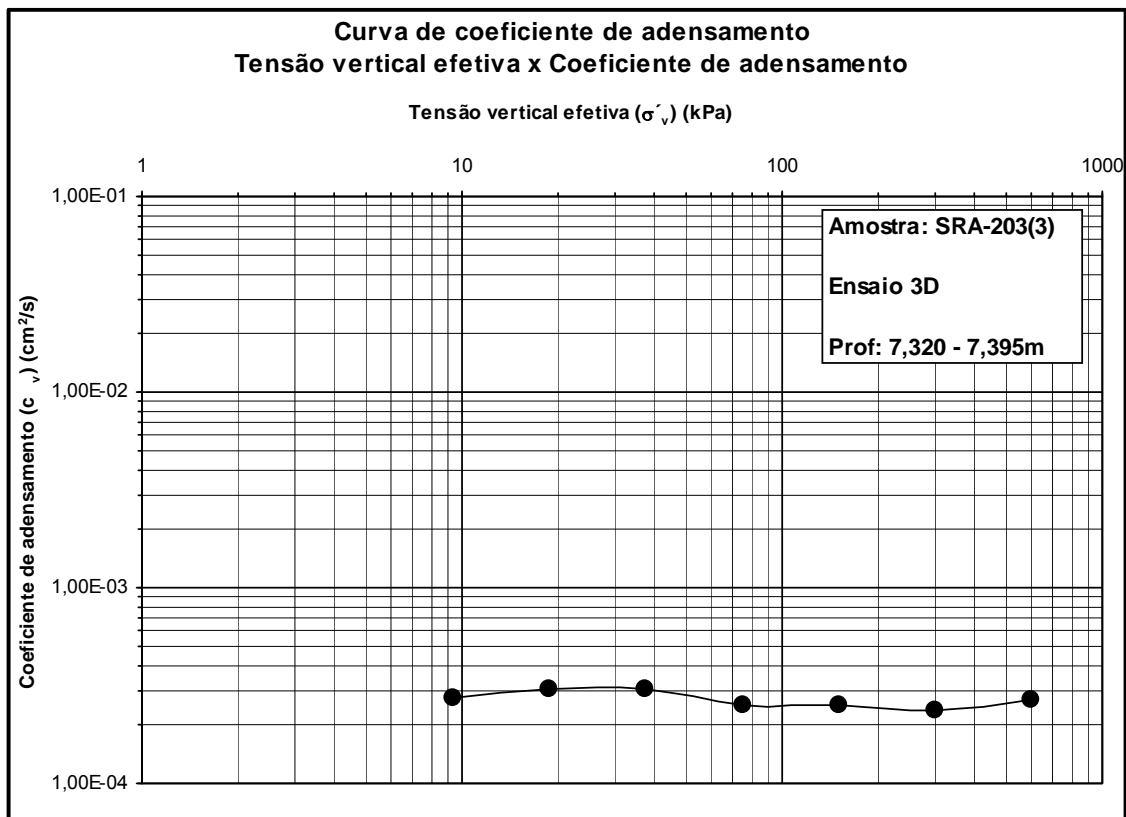


Figura 4.27: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 3D

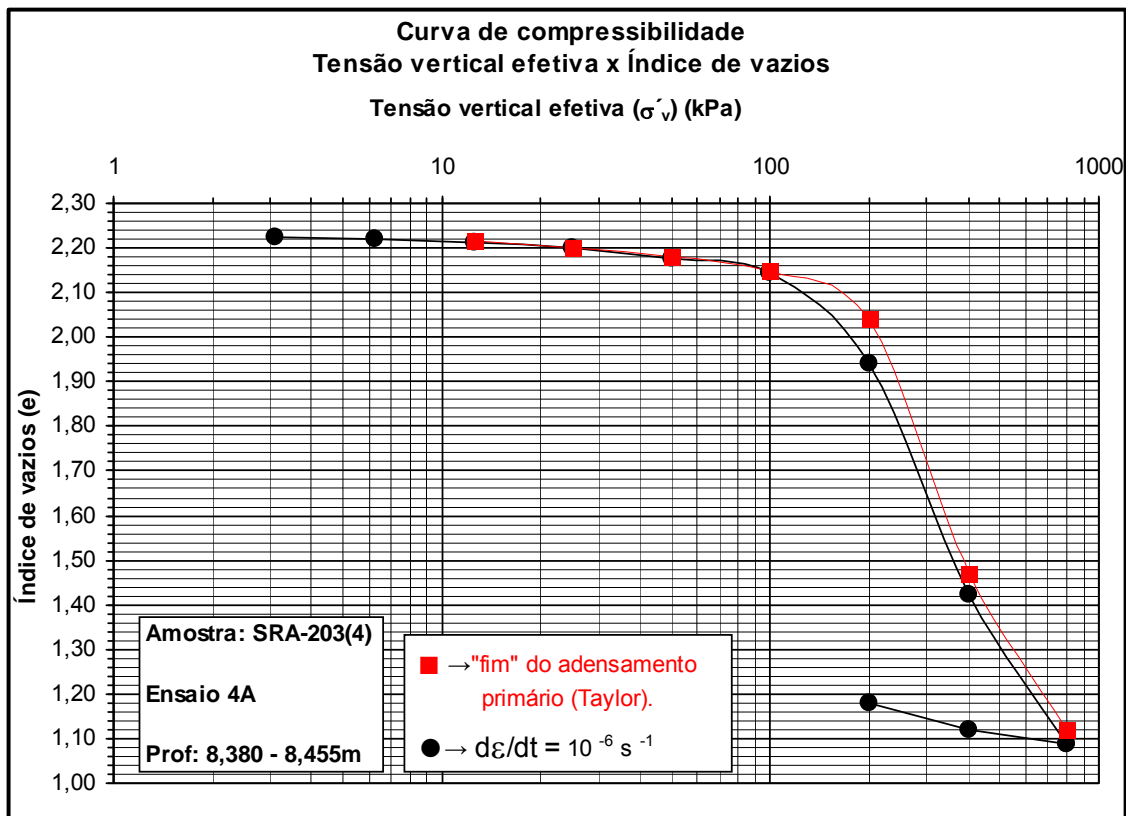


Figura 4.28: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4A

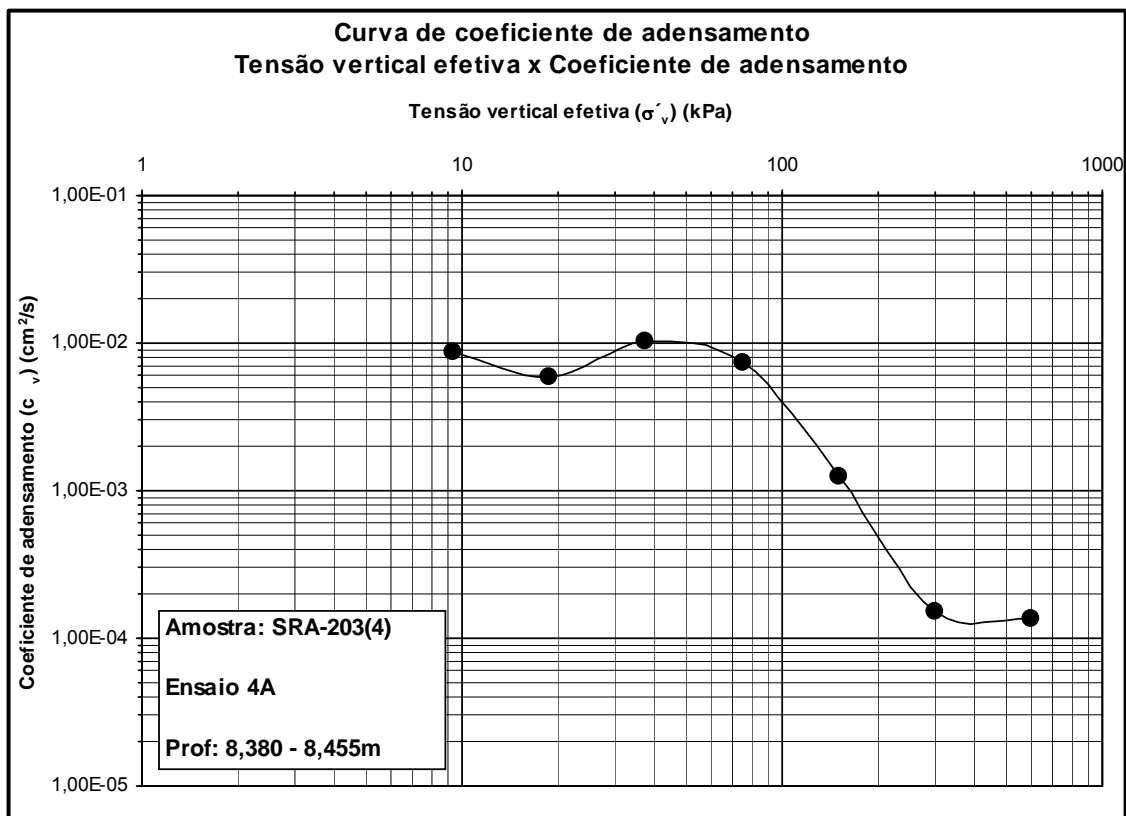


Figura 4.29: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4A

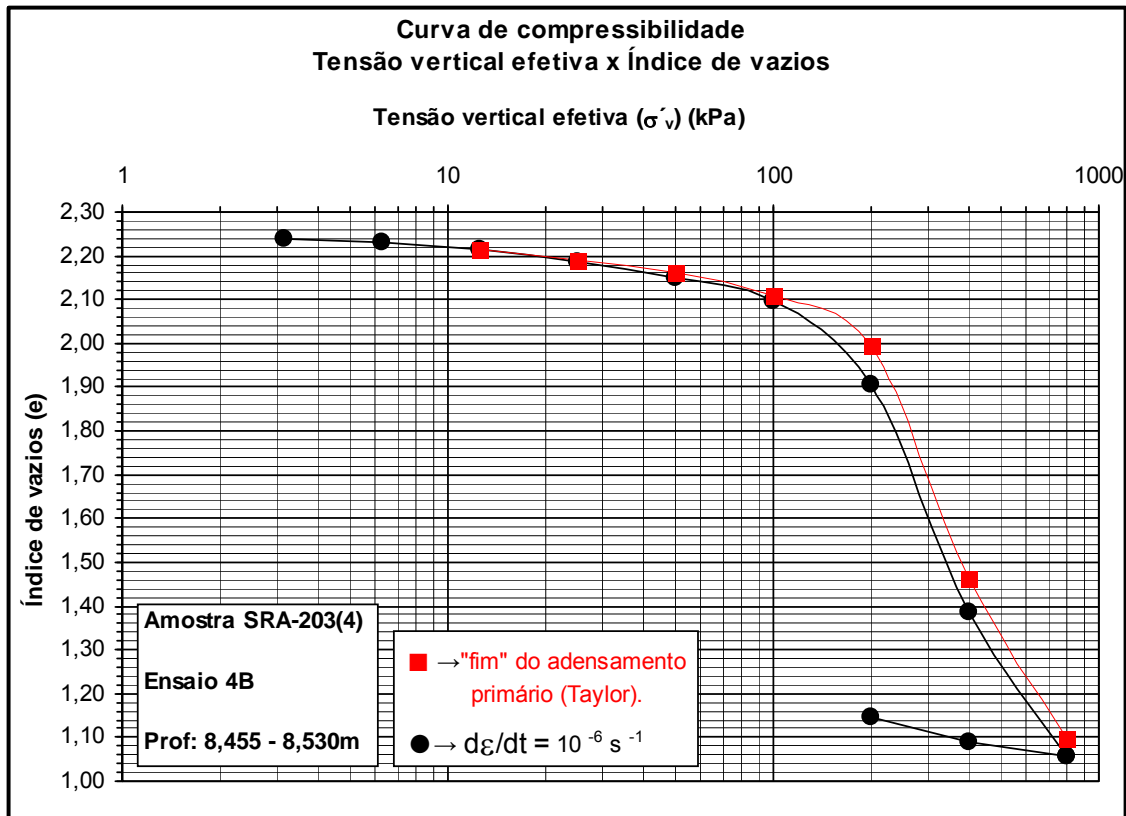


Figura 4.30: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4B

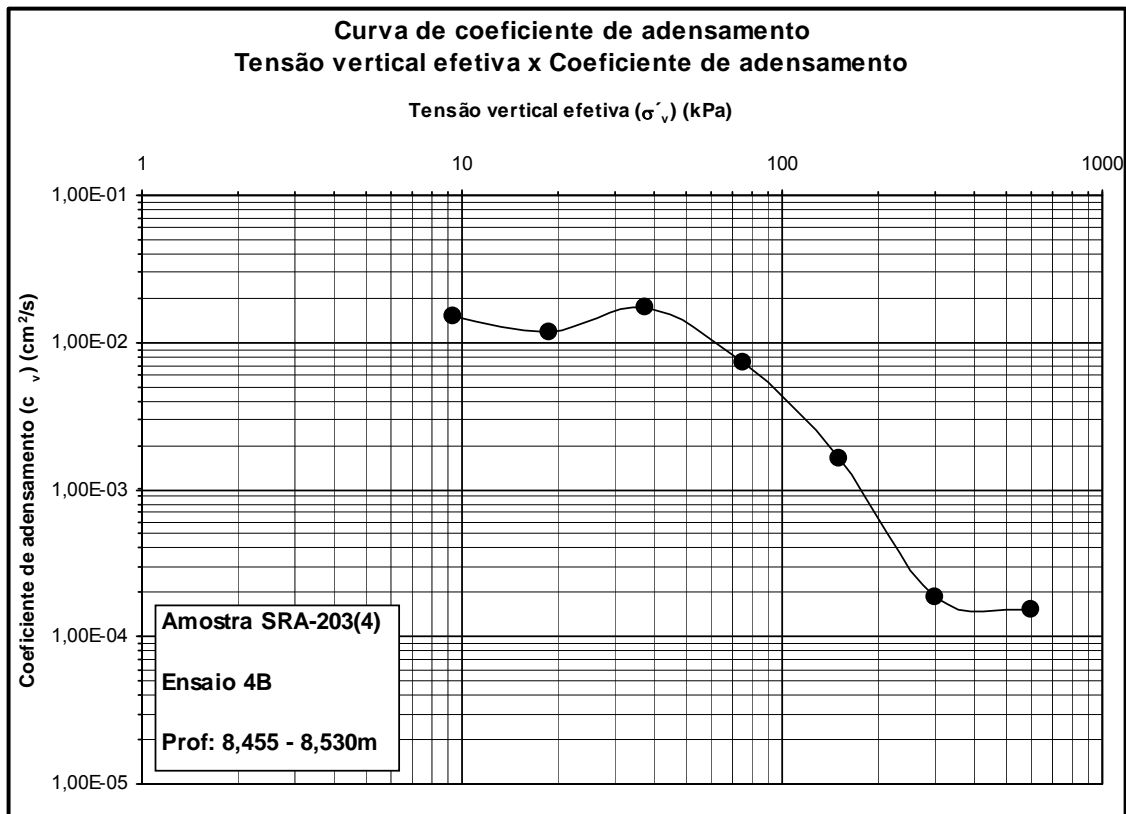


Figura 4.31: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4B

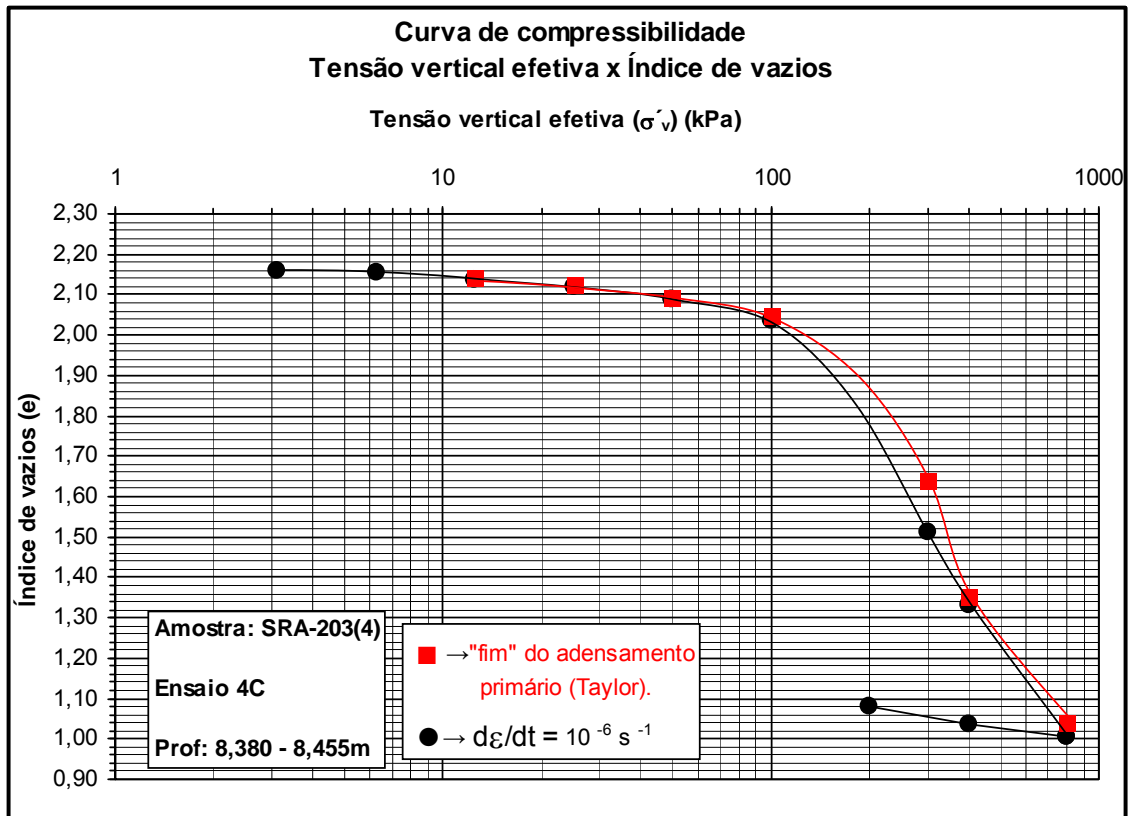


Figura 4.32: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4C

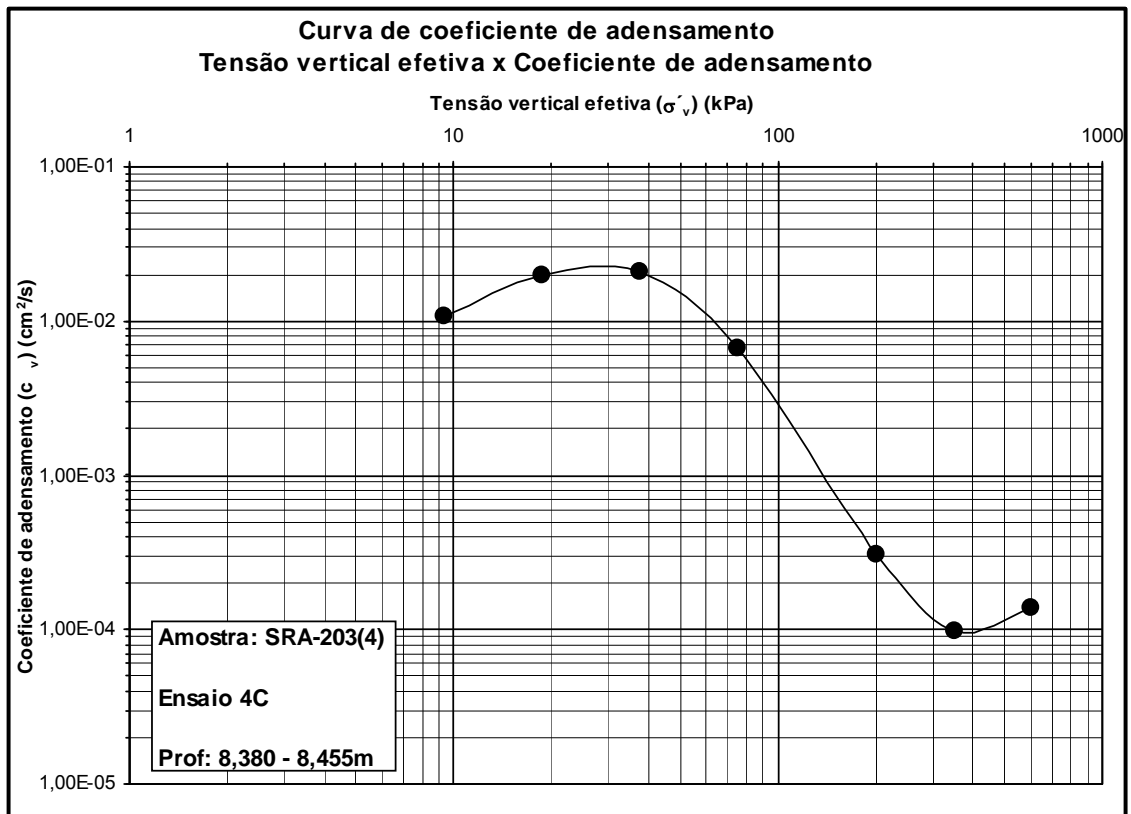


Figura 4.33: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4C

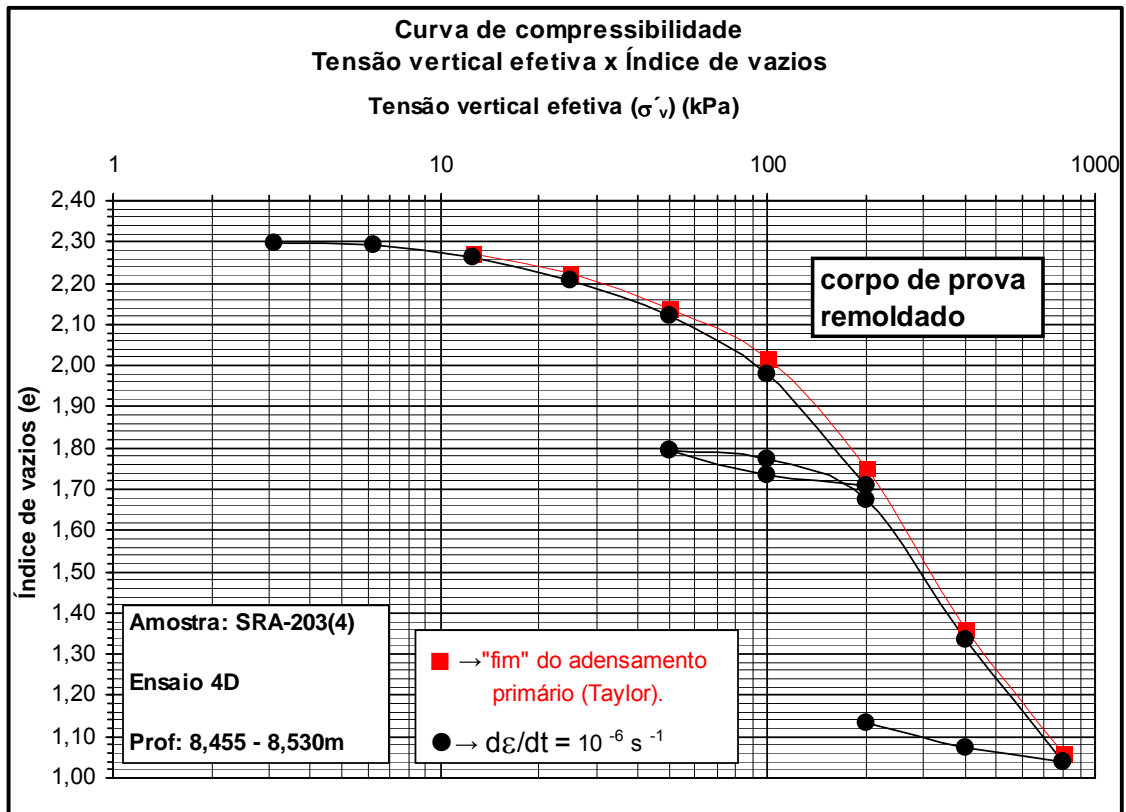


Figura 4.34: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 4D

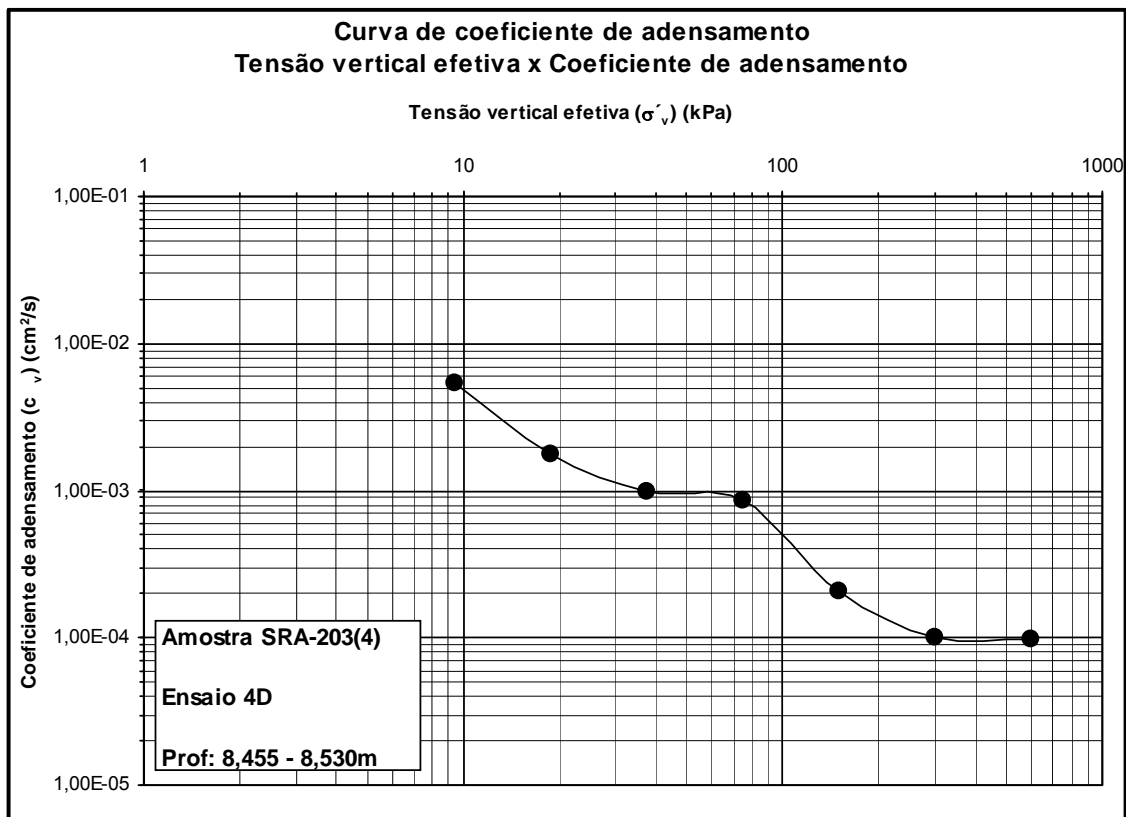


Figura 4.35: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 4D

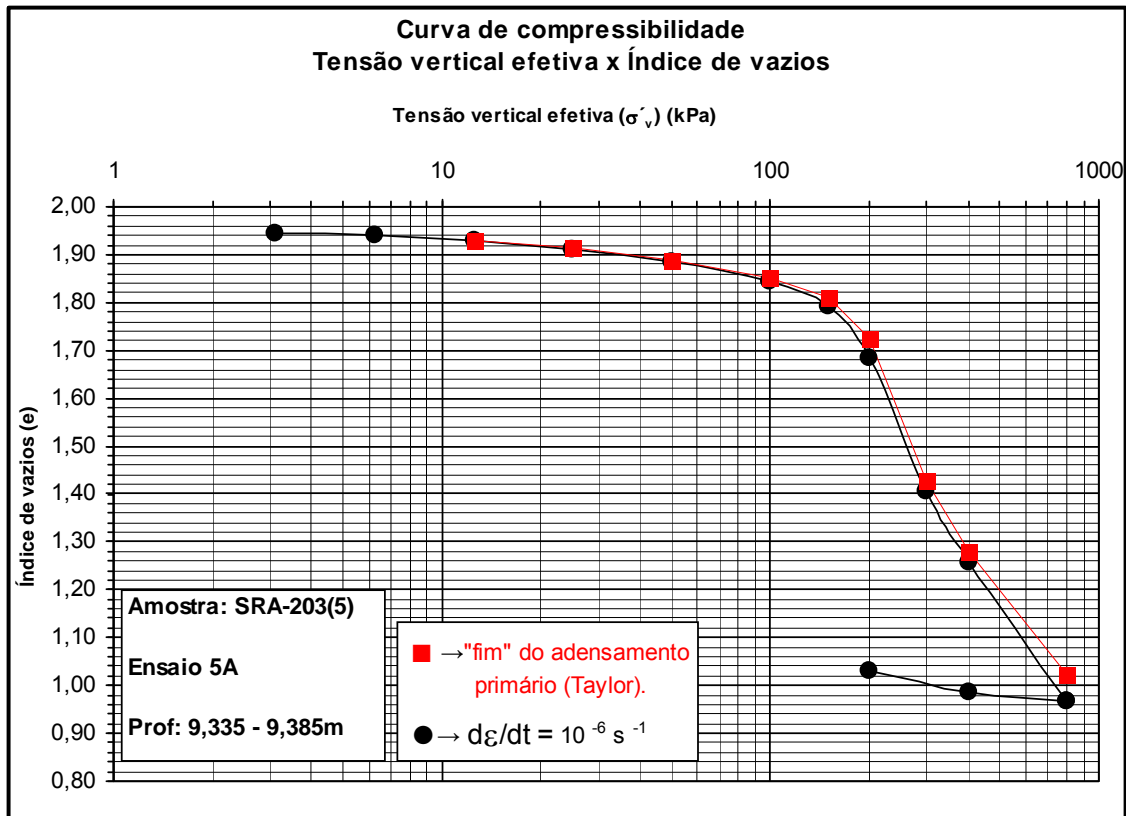


Figura 4.36: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5A

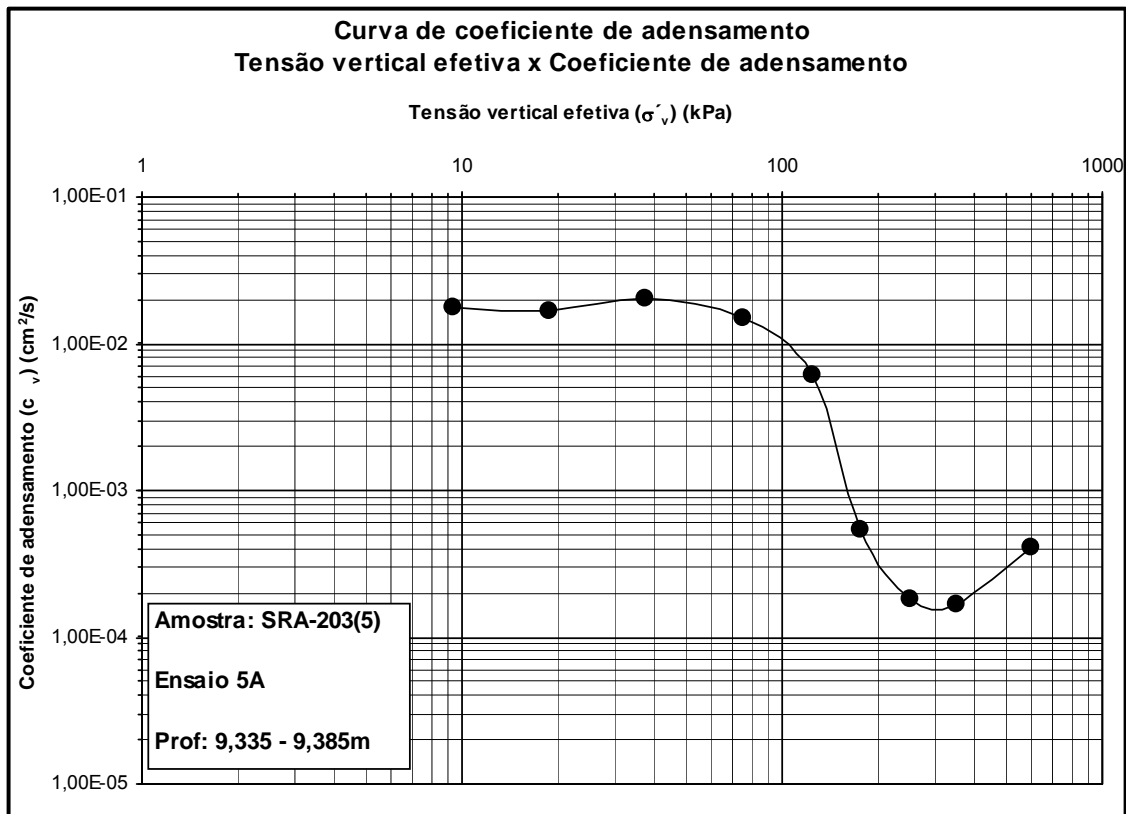


Figura 4.37: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5A

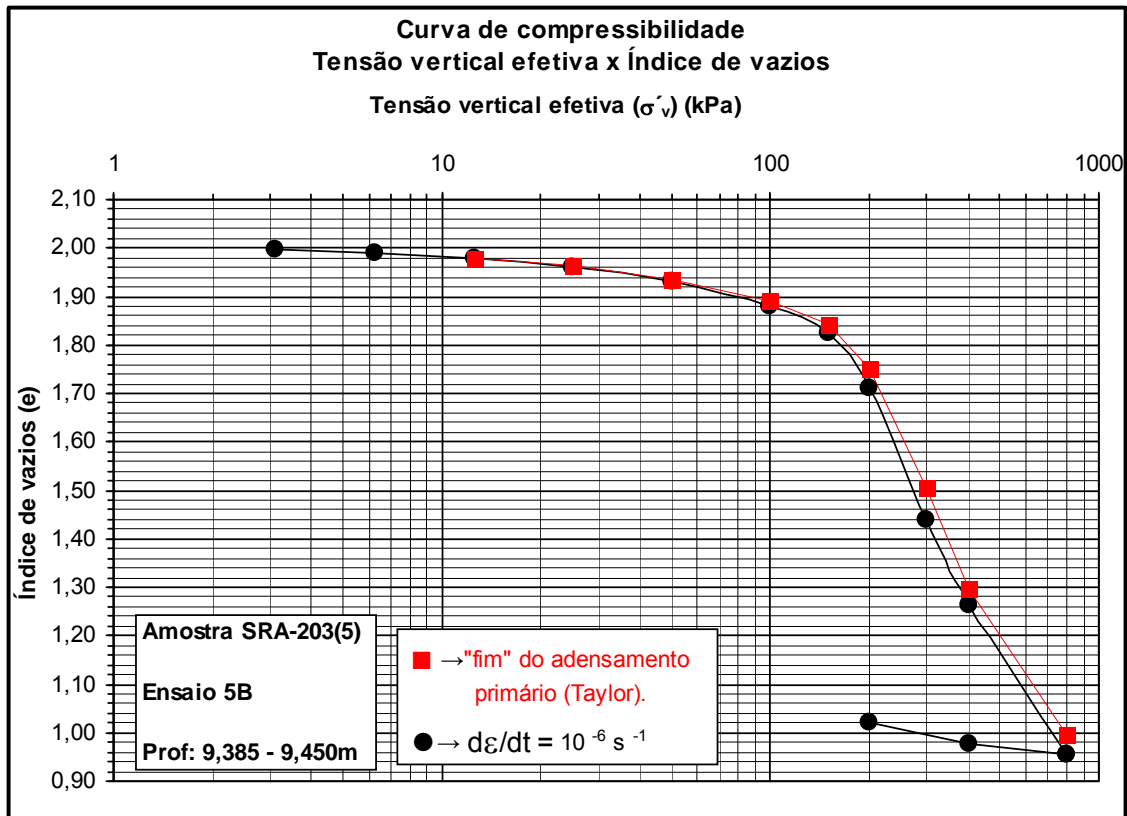


Figura 4.38: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5B

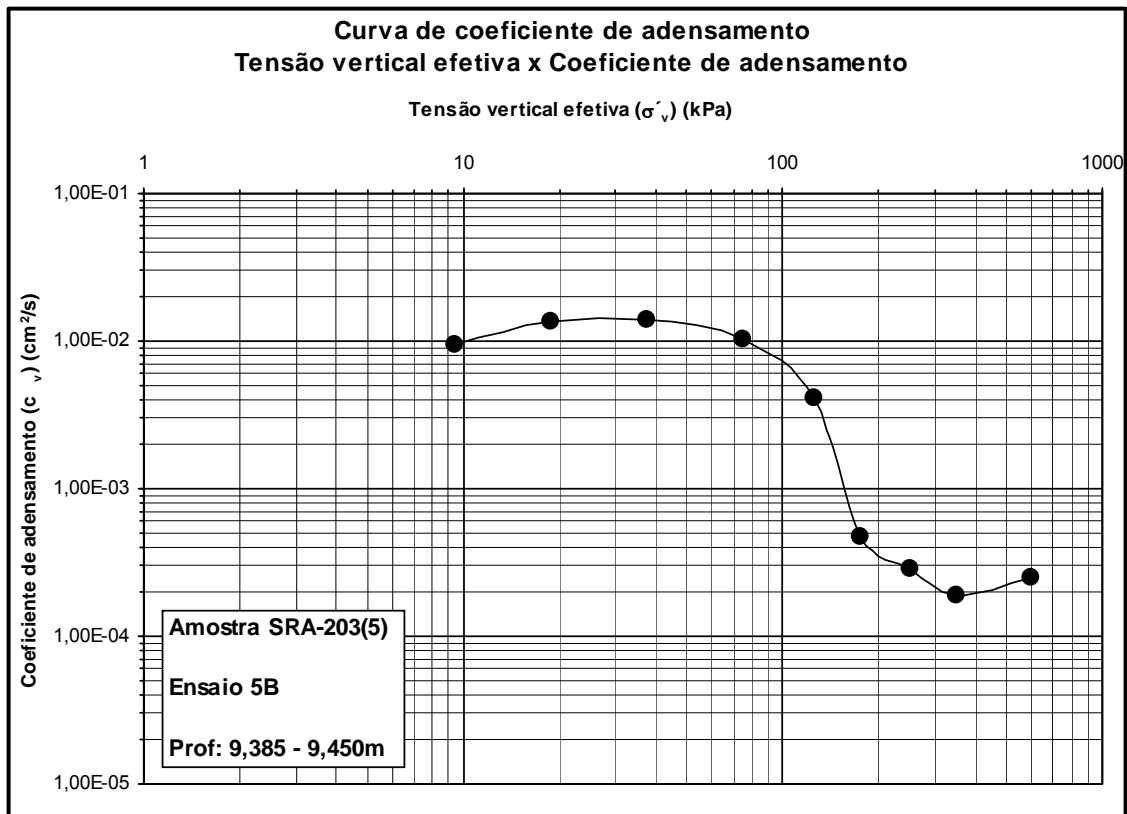


Figura 4.39: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5B

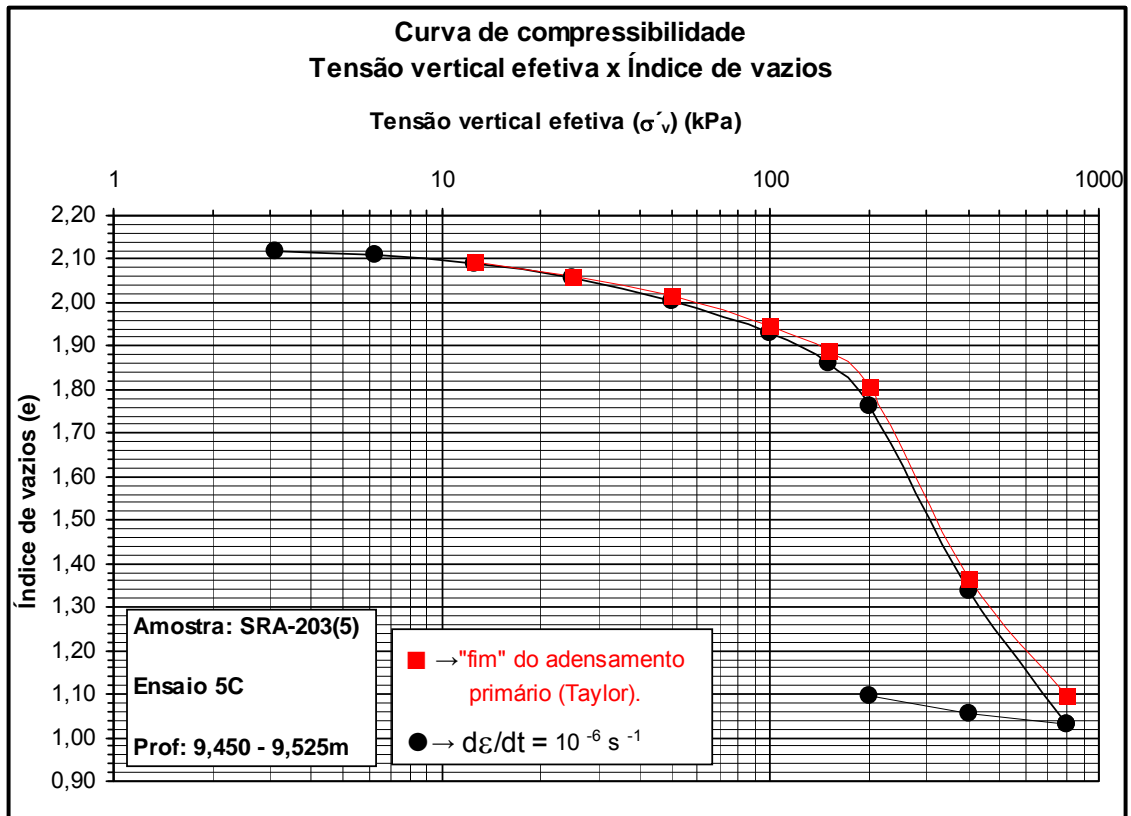


Figura 4.40: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5C

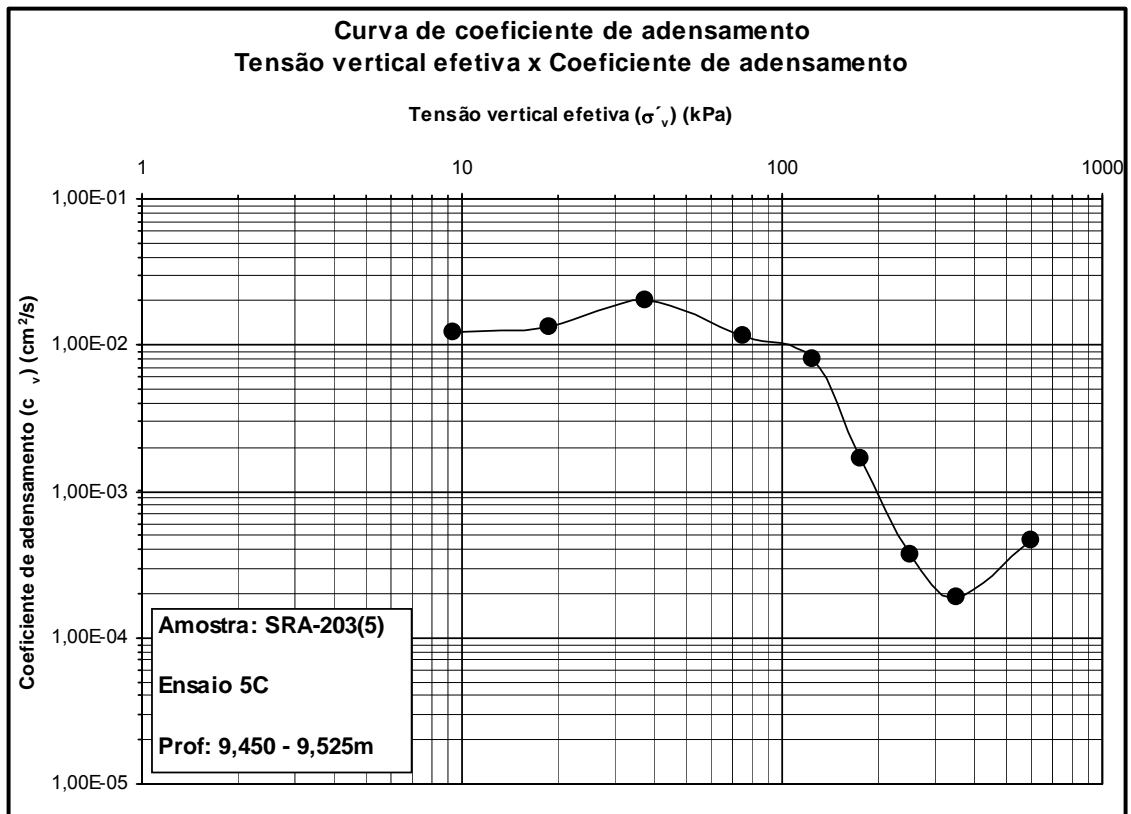


Figura 4.41: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5C

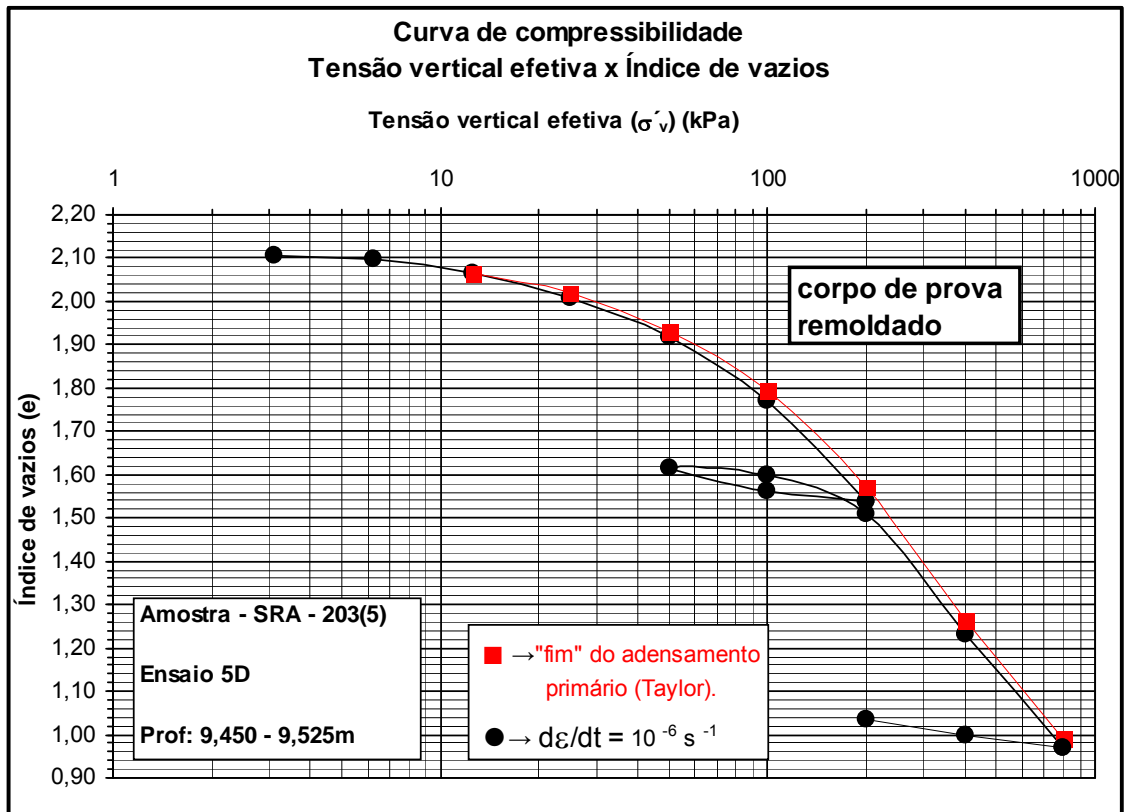


Figura 4.42: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 5D

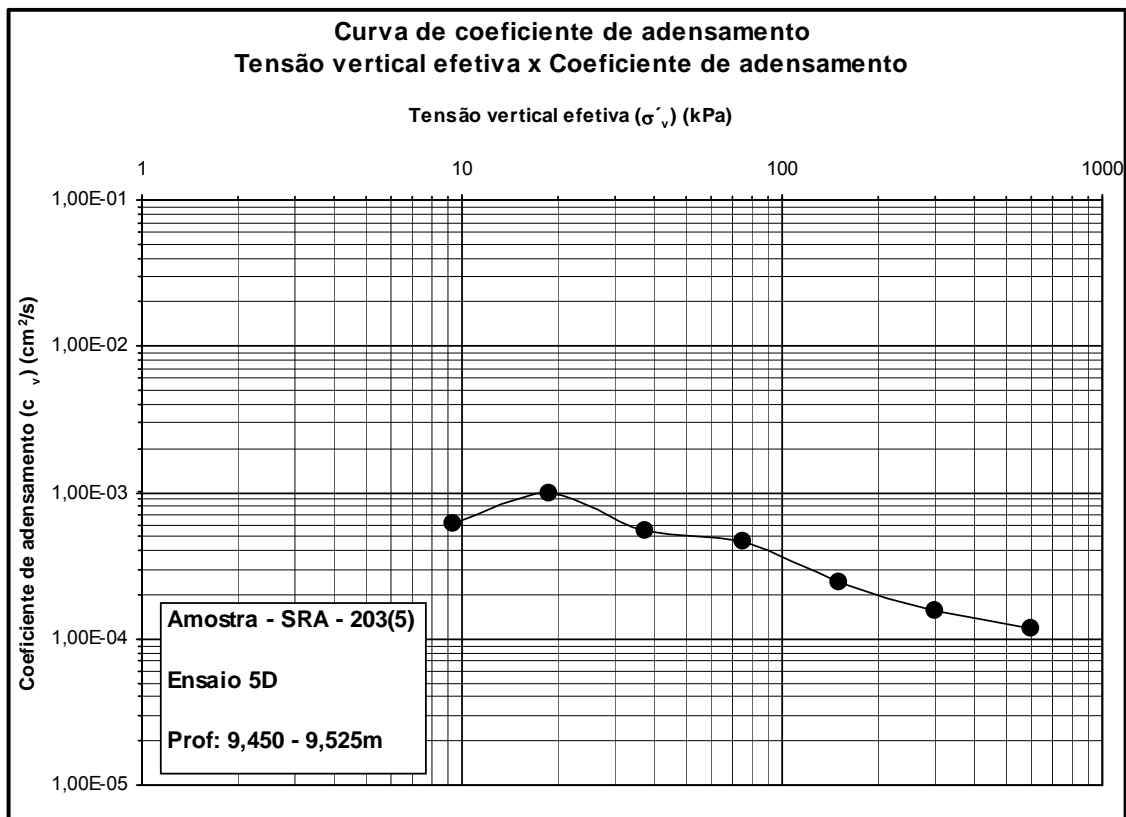


Figura 4.43: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 5D

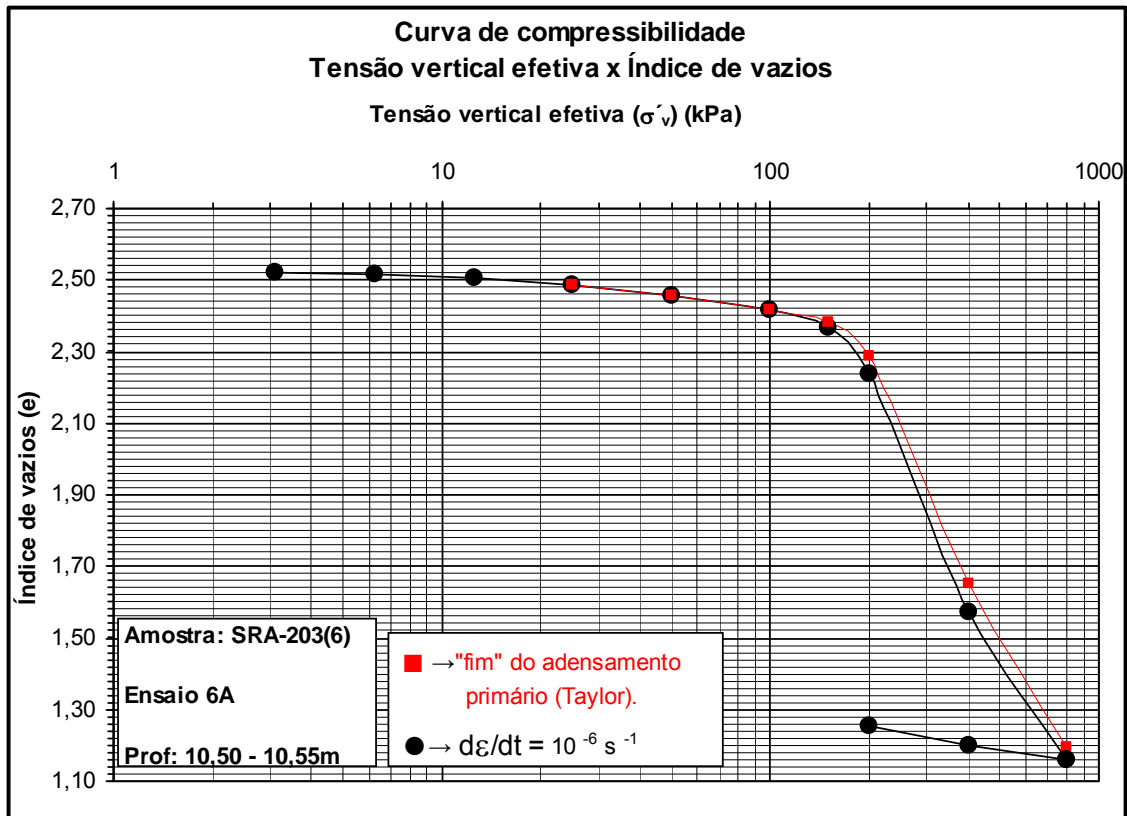


Figura 4.44: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6A

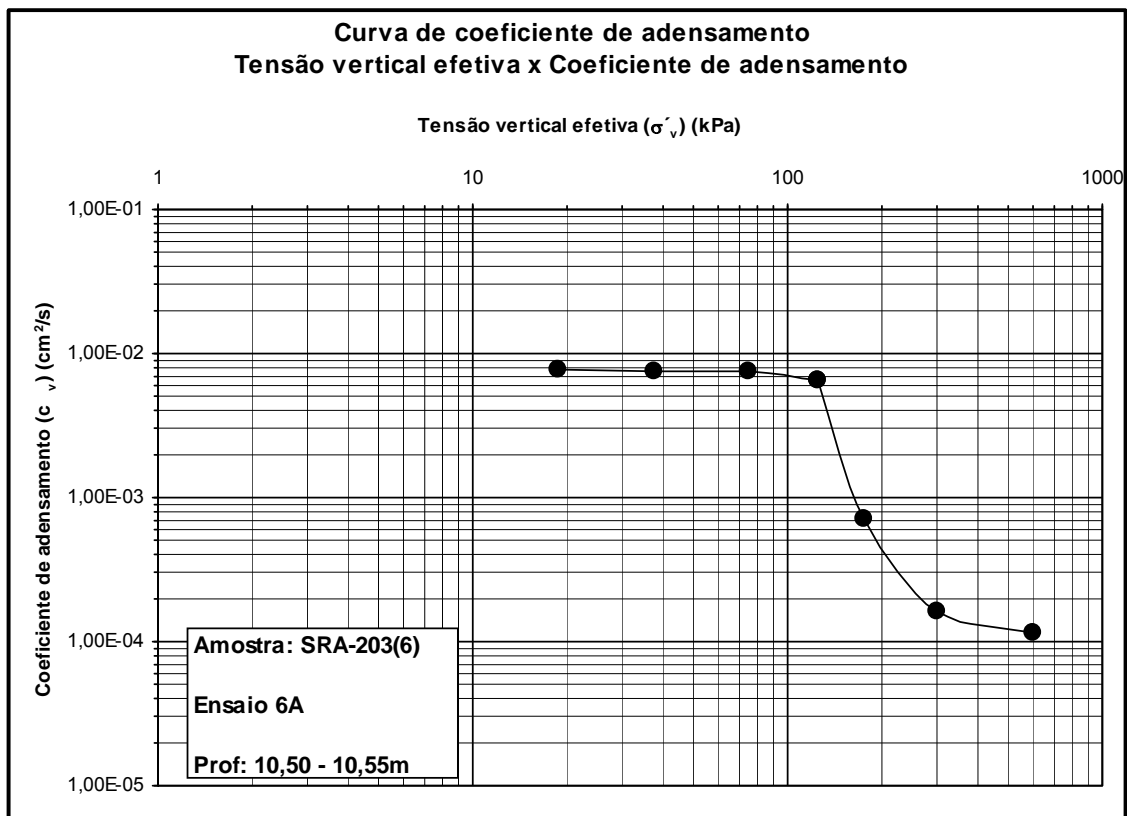


Figura 4.45: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6A

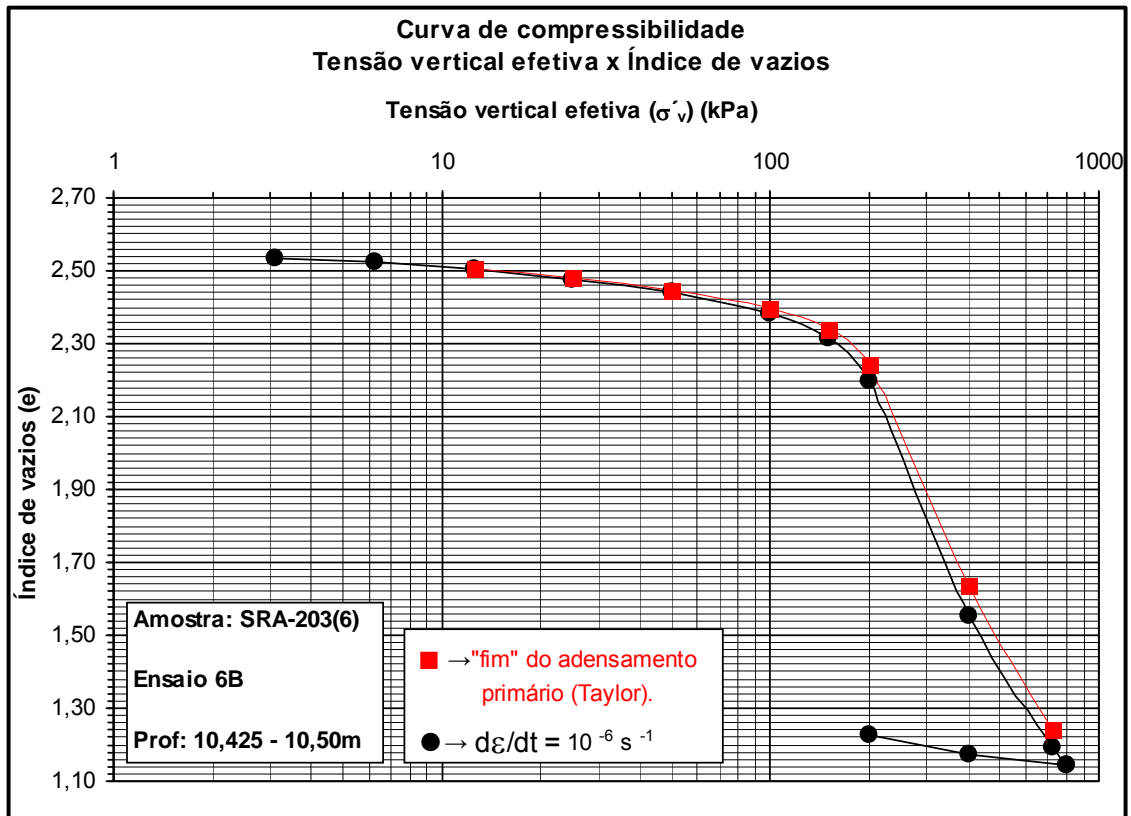


Figura 4.46: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6B

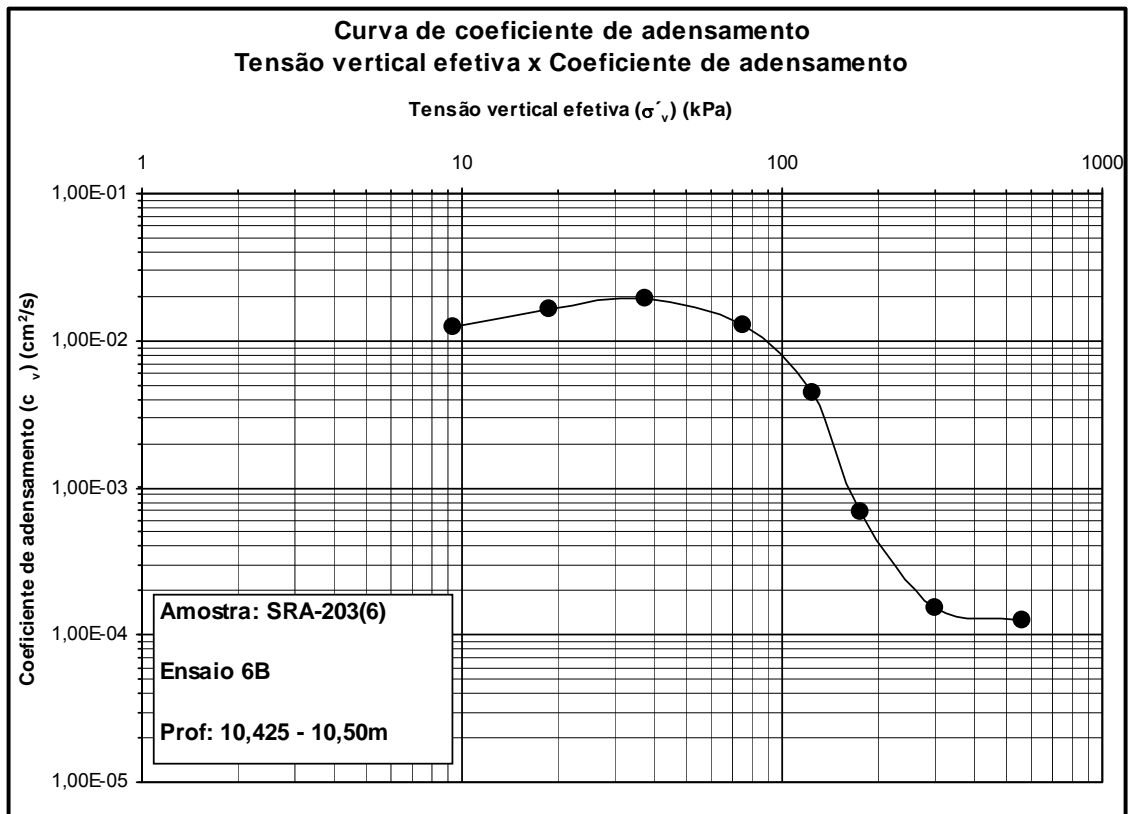


Figura 4.47: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6B

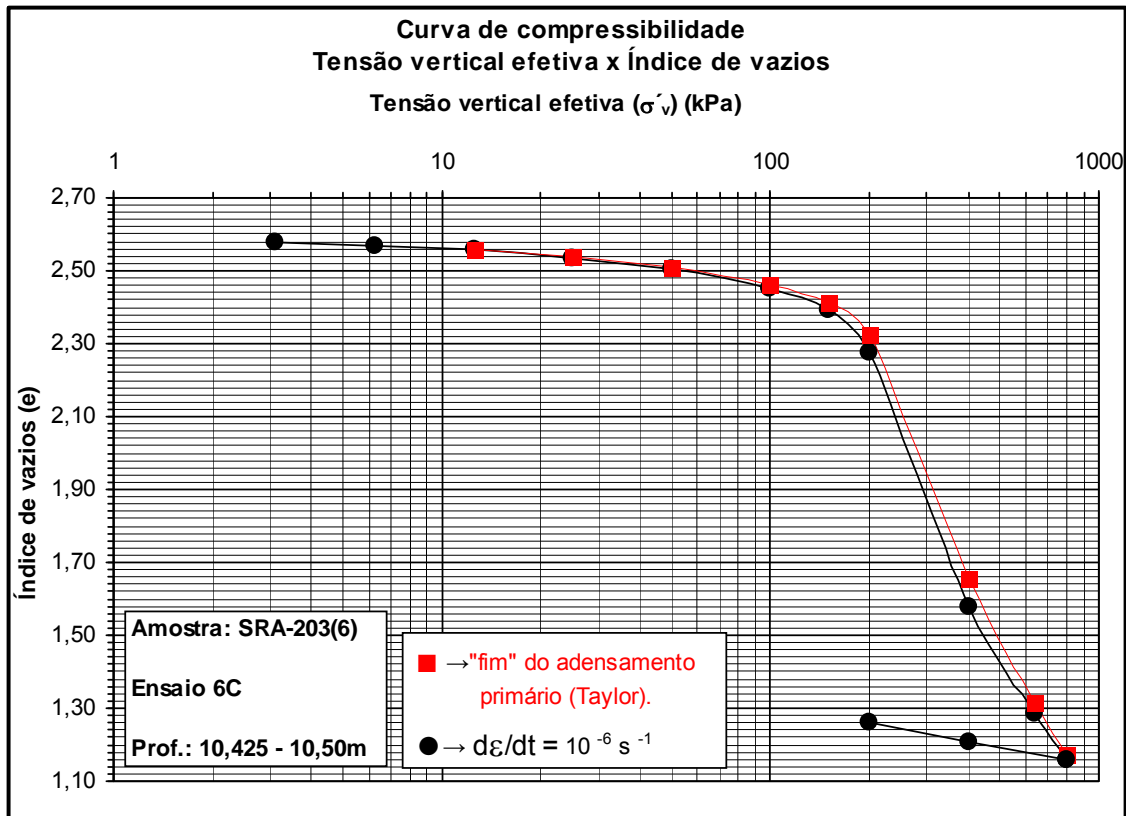


Figura 4.48: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6C

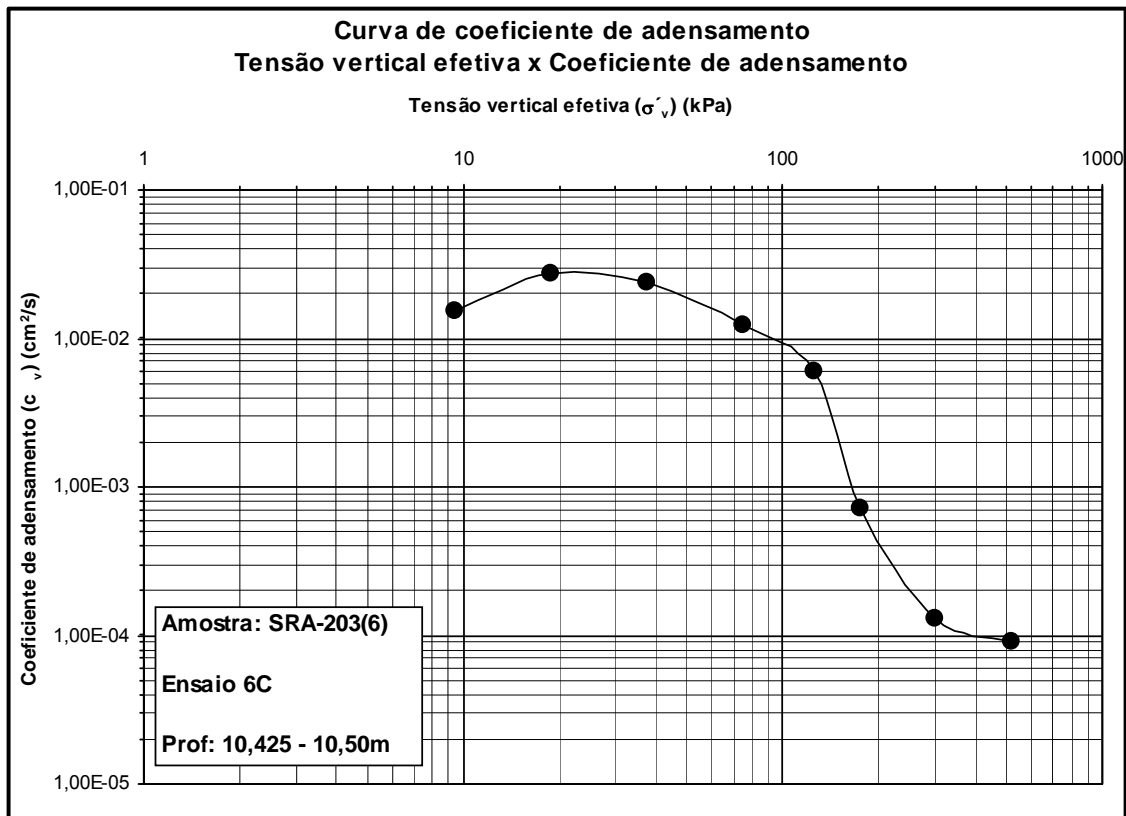


Figura 4.49: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6C

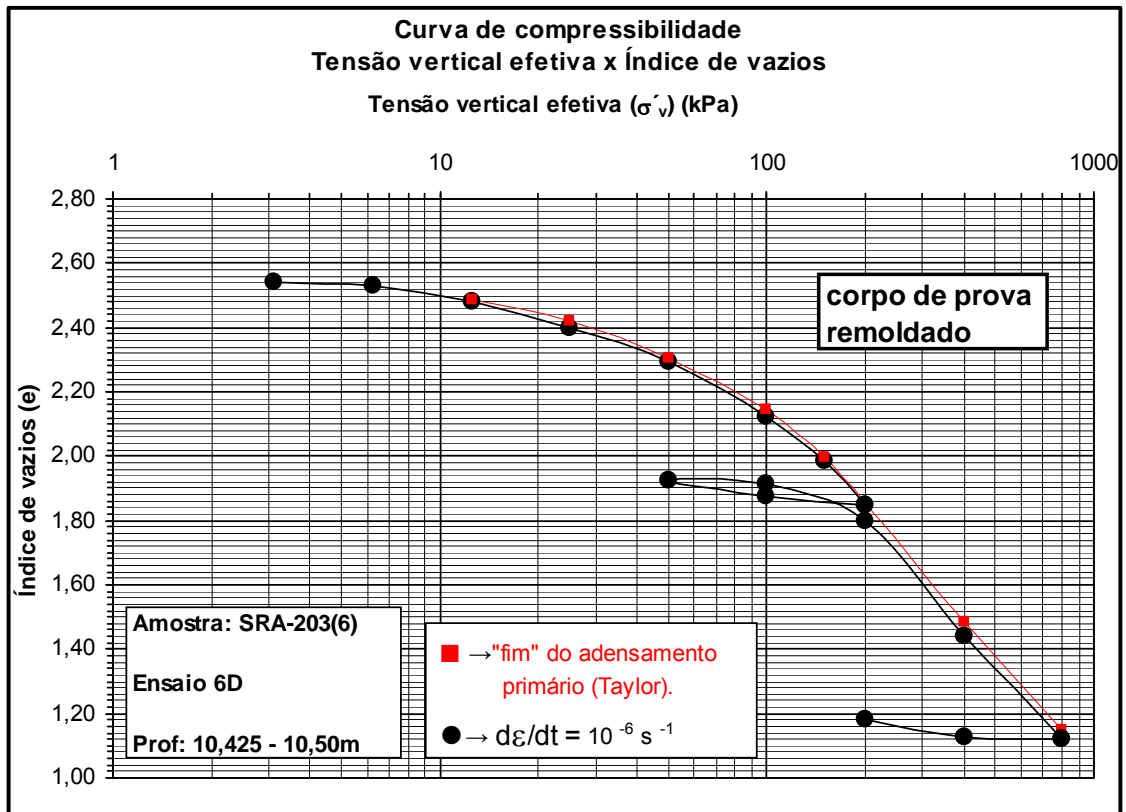


Figura 4.50: Curvas de compressibilidade ($e \times \sigma'_v$) do ensaio 6D

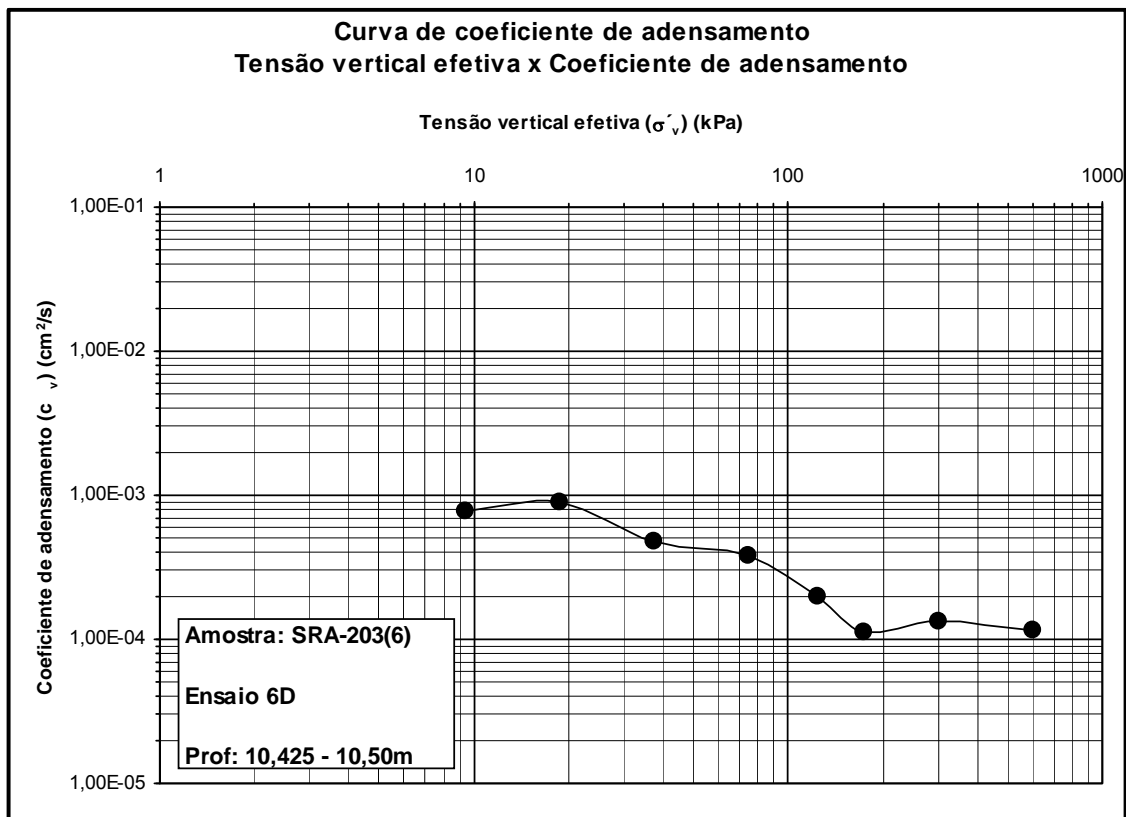


Figura 4.51: Curva de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) do ensaio 6D

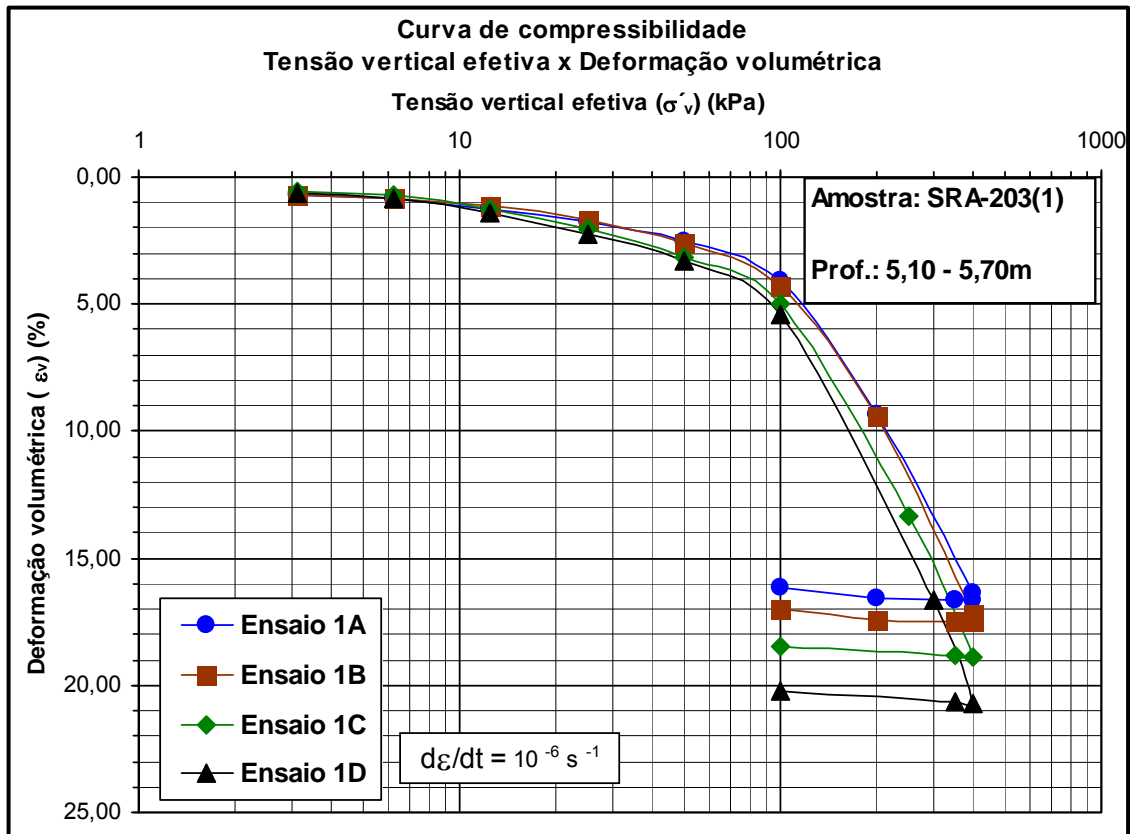


Figura 4.52: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(1)

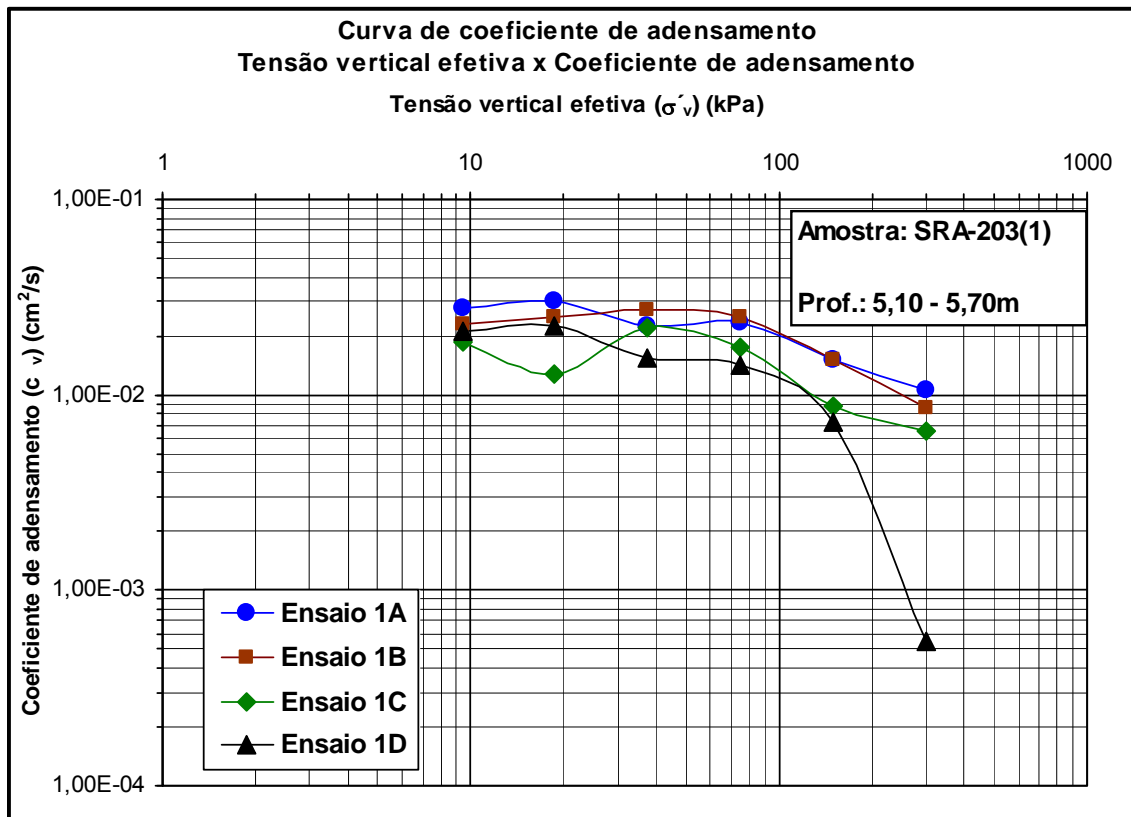


Figura 4.53: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(1)

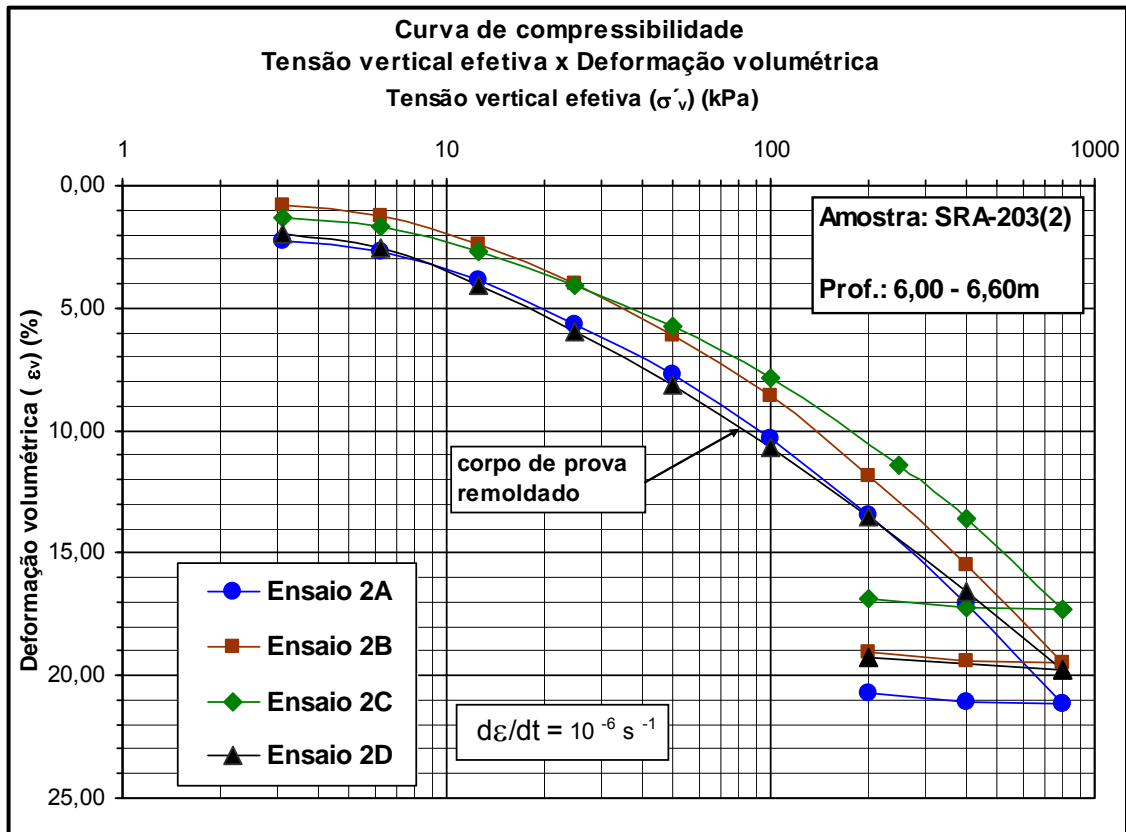


Figura 4.54: Curvas de compressibilidade ($\varepsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(2)

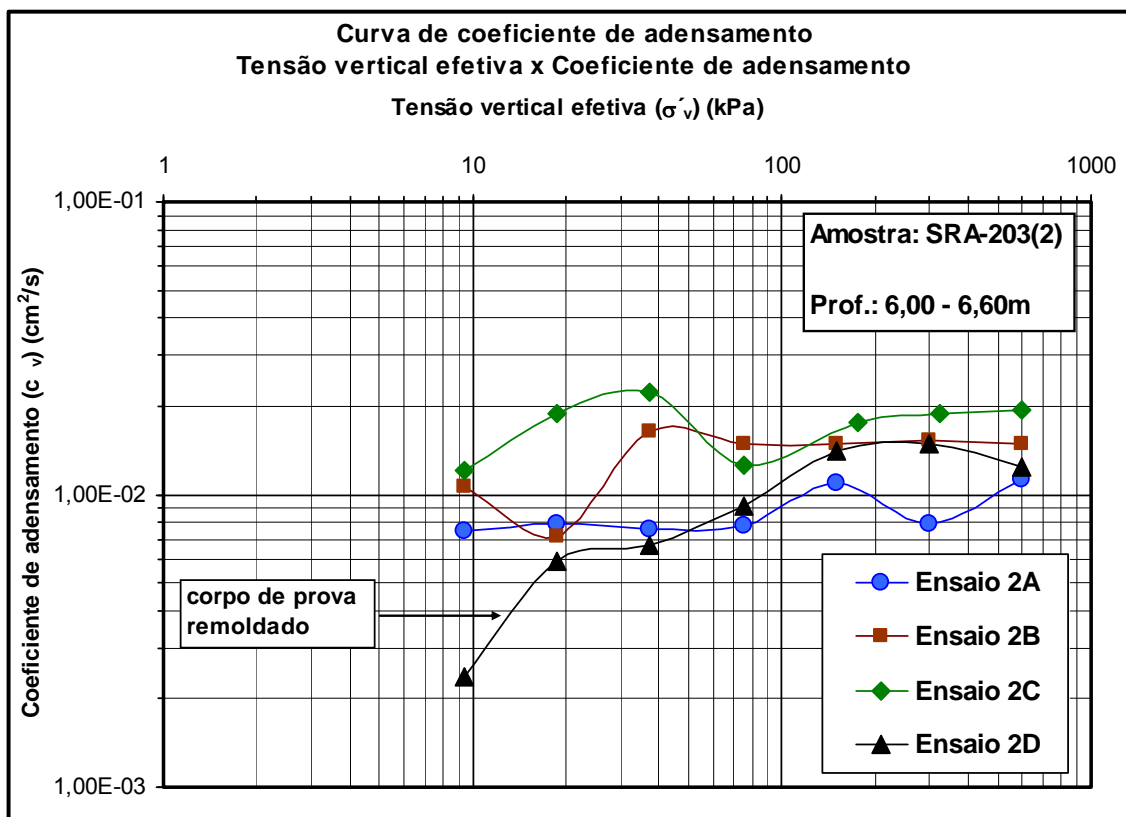


Figura 4.55: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(2)

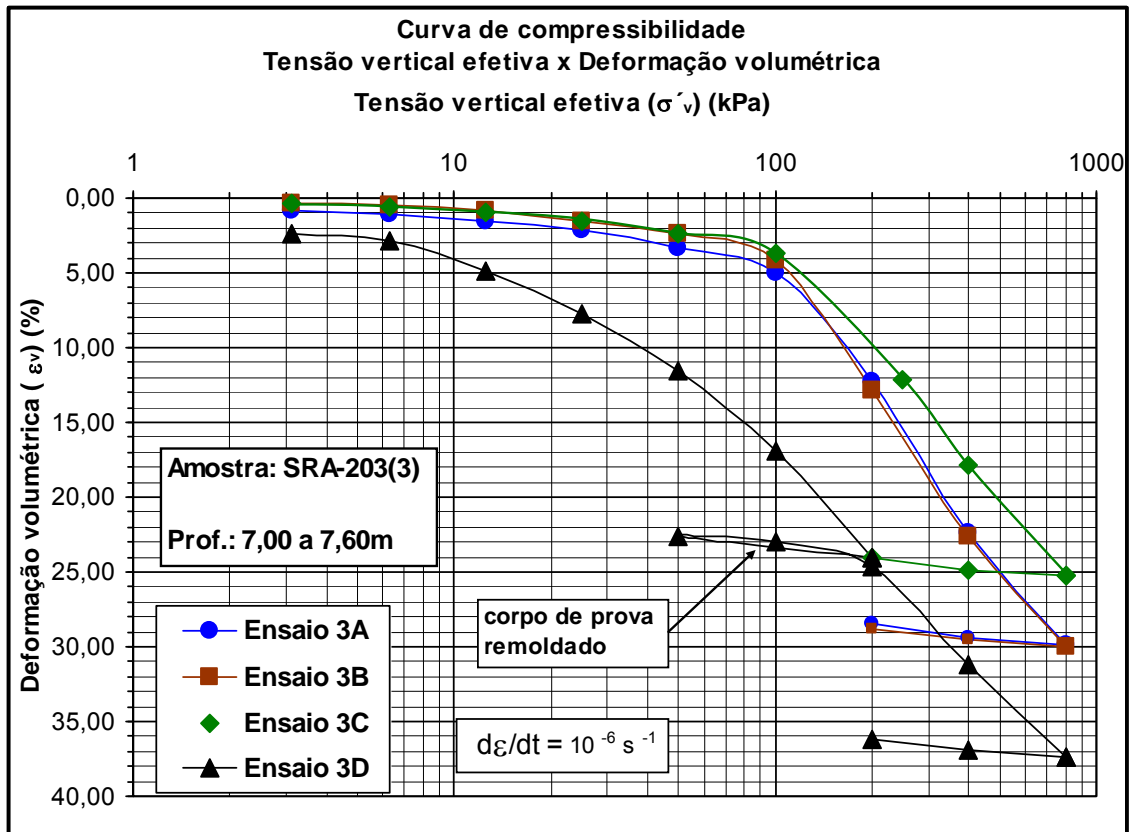


Figura 4.56: Curvas de compressibilidade ($\varepsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(3)

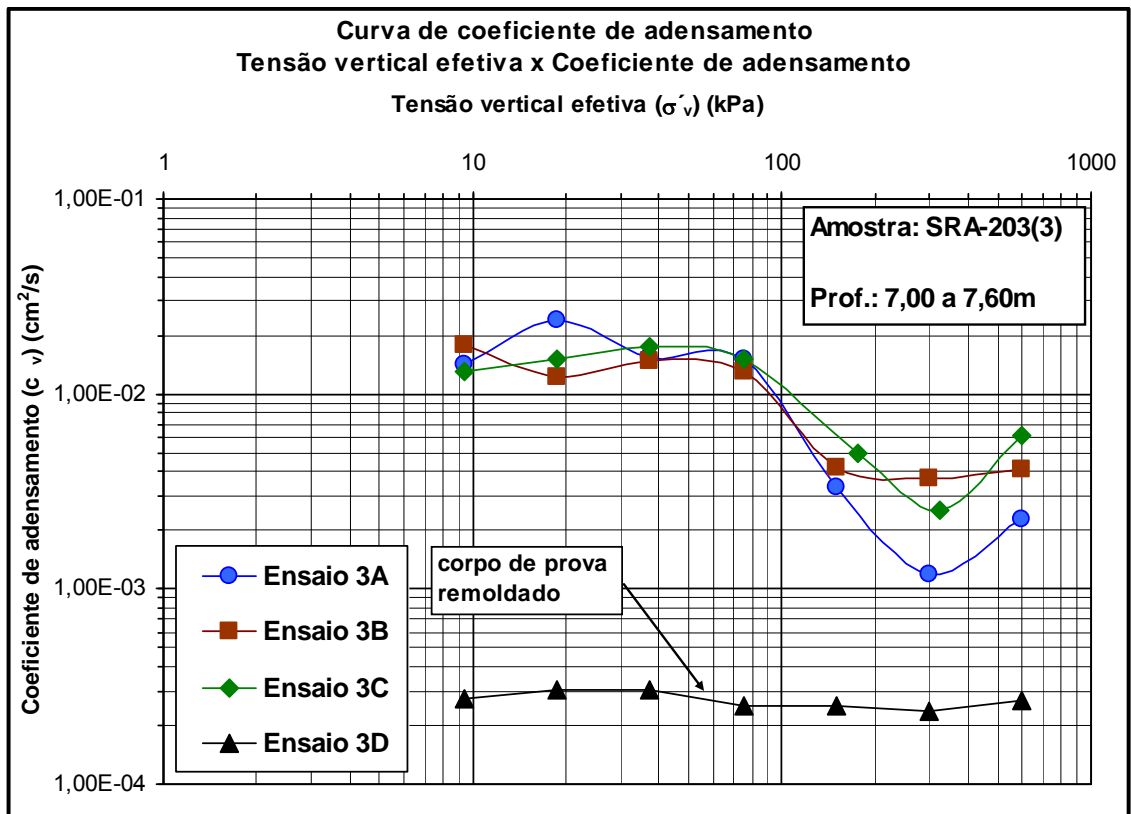


Figura 4.57: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(3)

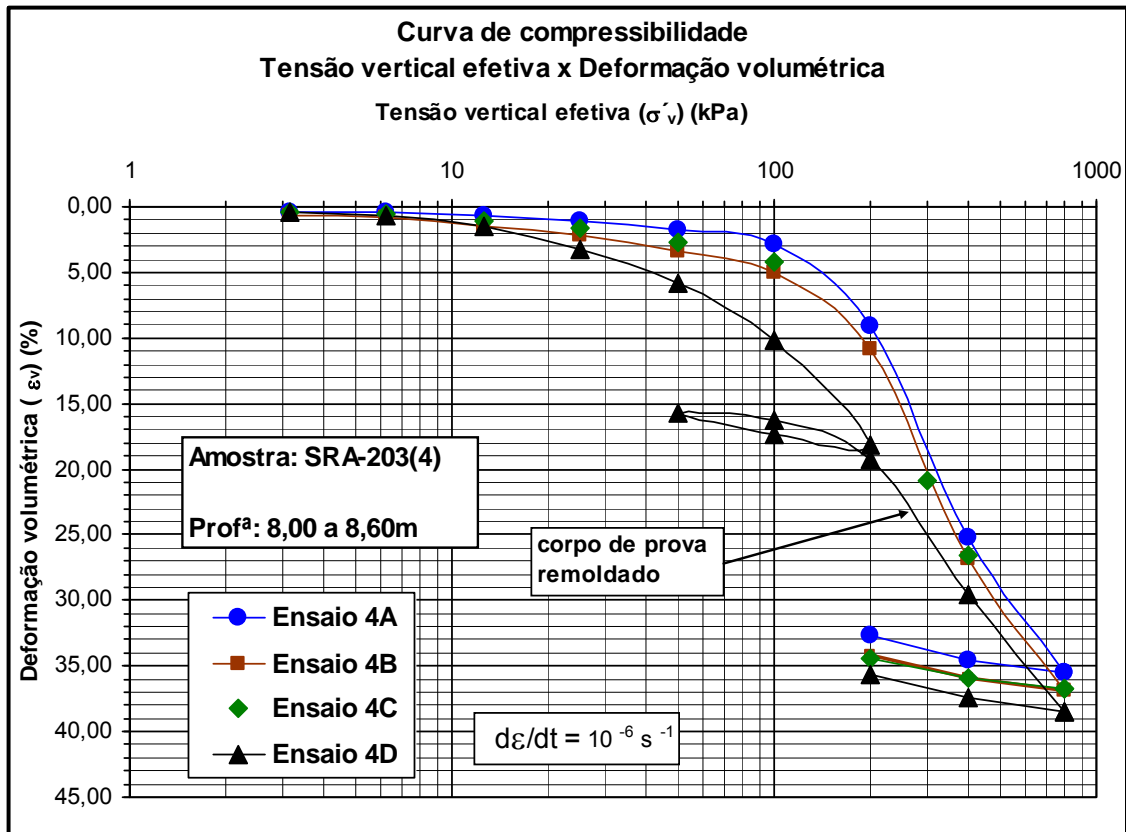


Figura 4.58: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(4)

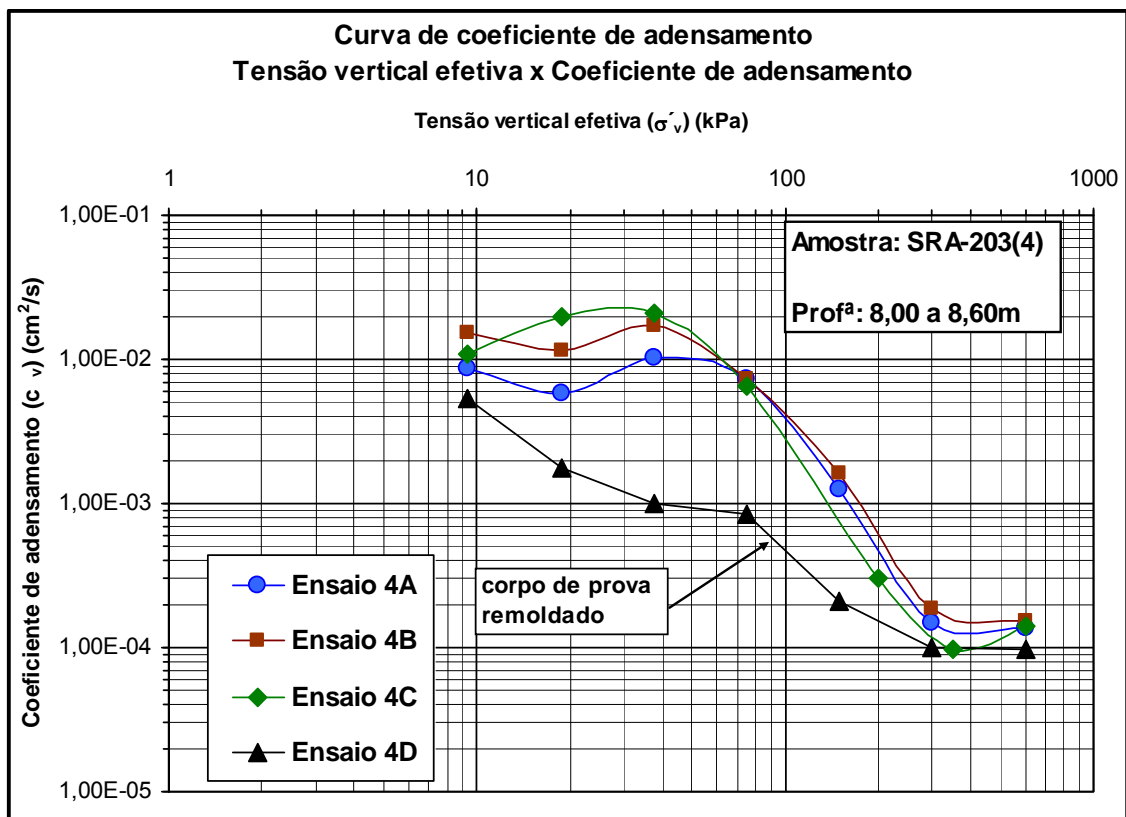


Figura 4.59: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(4)

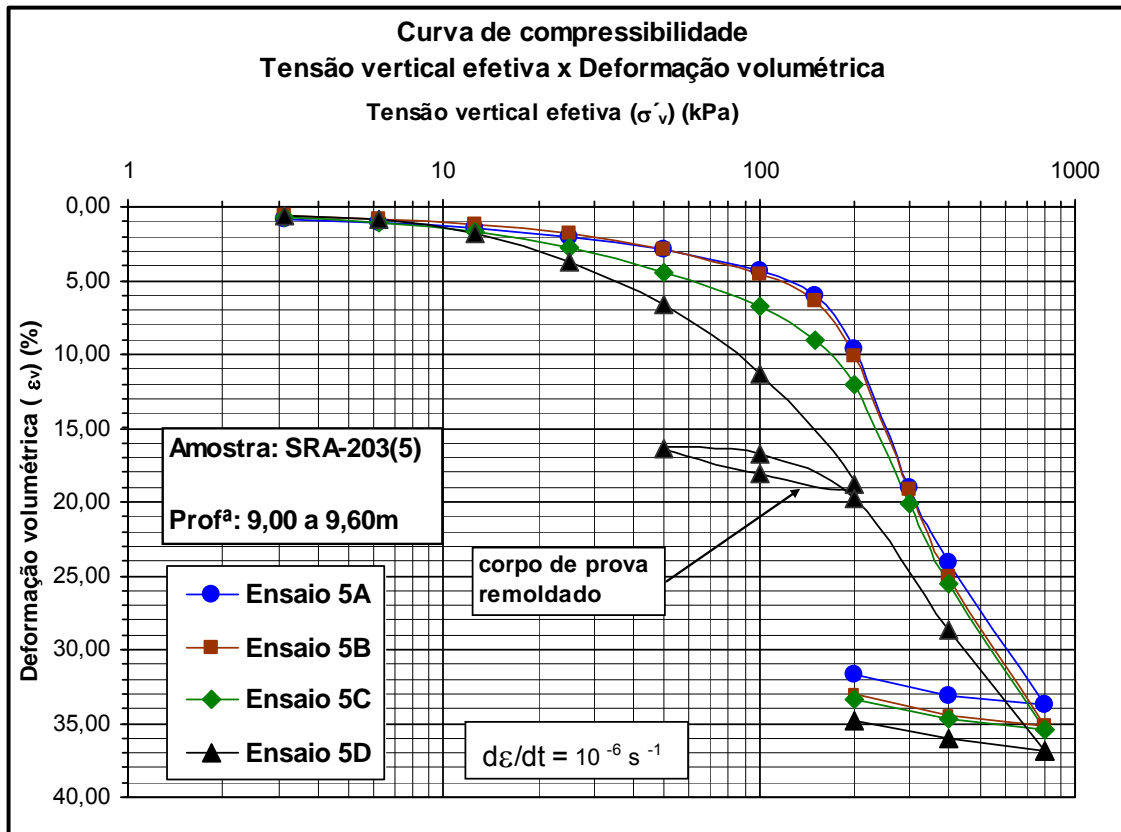


Figura 4.60: Curvas de compressibilidade ($\varepsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(5)

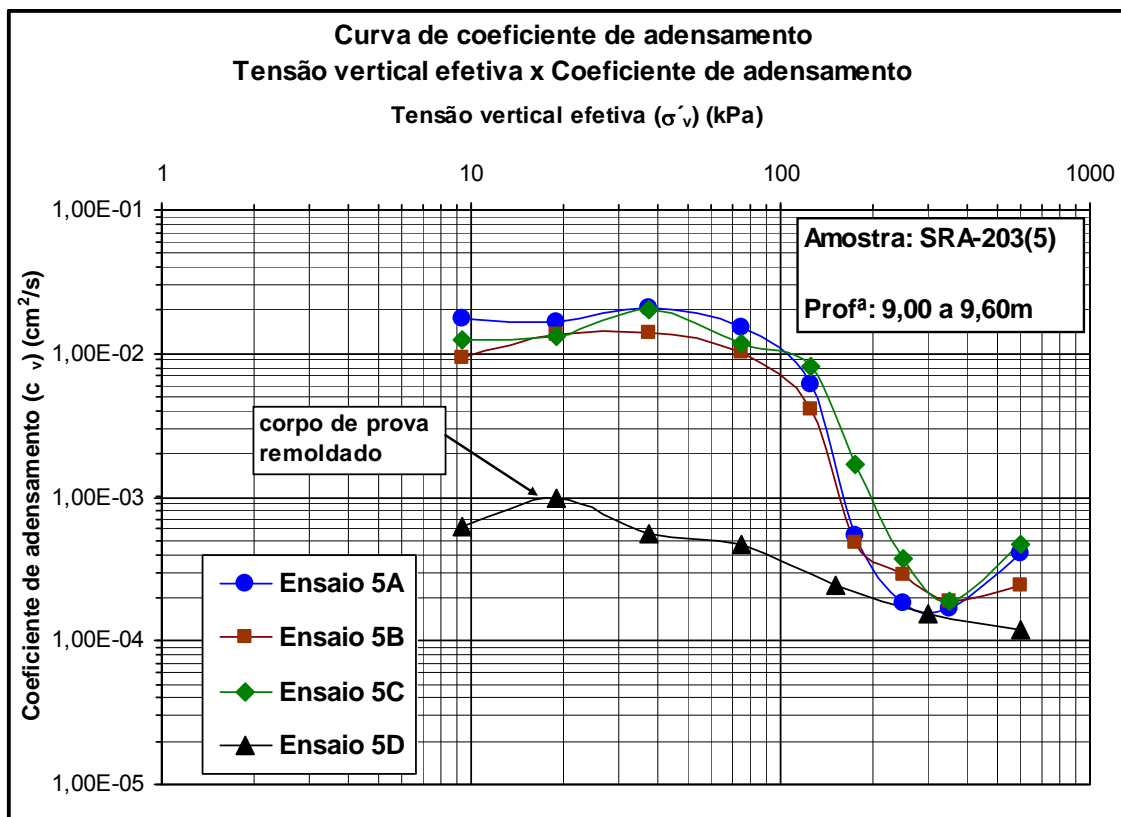


Figura 4.61: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(5)

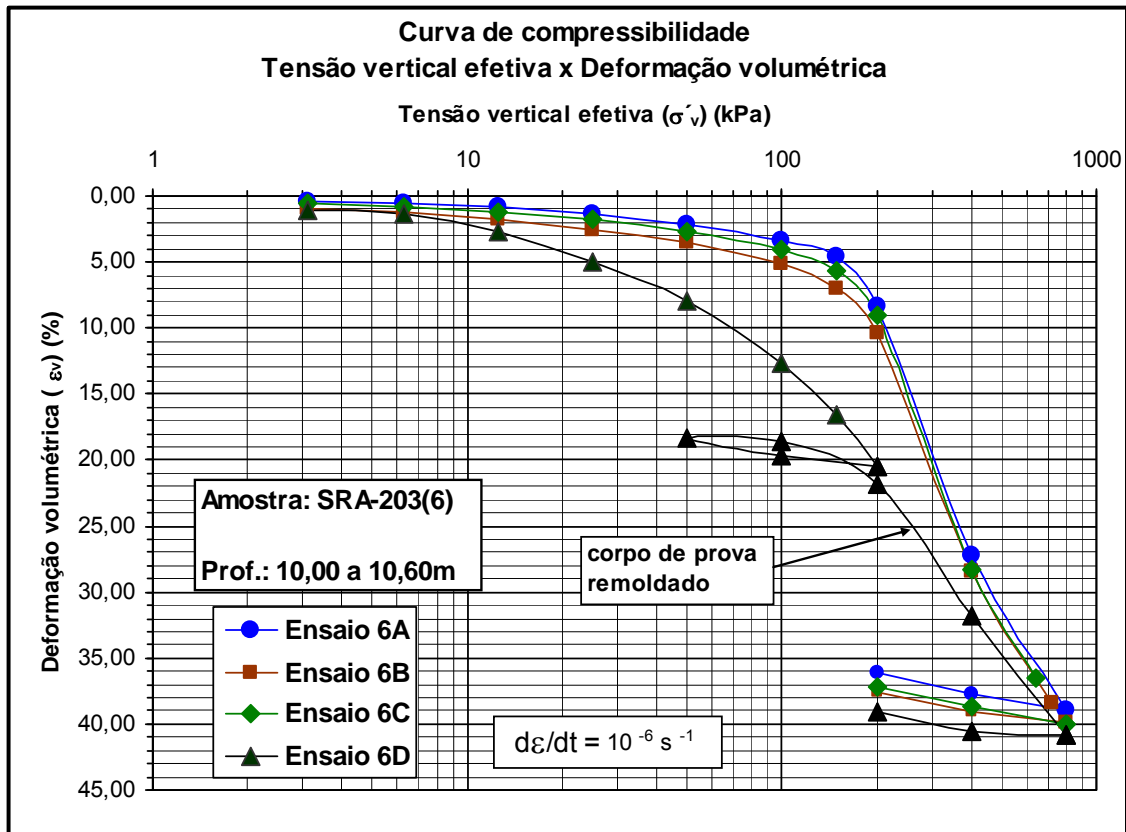


Figura 4.62: Curvas de compressibilidade ($\epsilon_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(6)

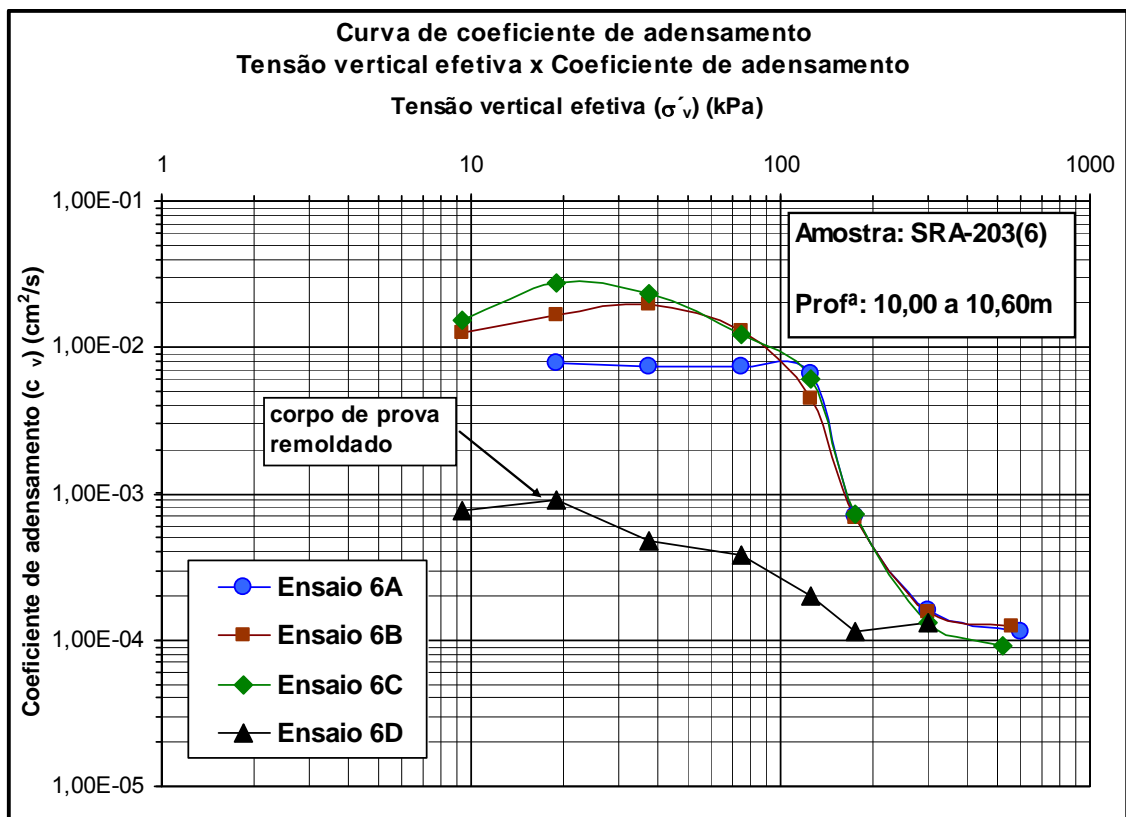


Figura 4.63: Curvas de coeficiente de adensamento ($c_v \times \sigma'_v$) dos ensaios da amostra SRA203(6)

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1A - Estágio 100 - 200 kPa (OCR =1)

Tempo x Deformação

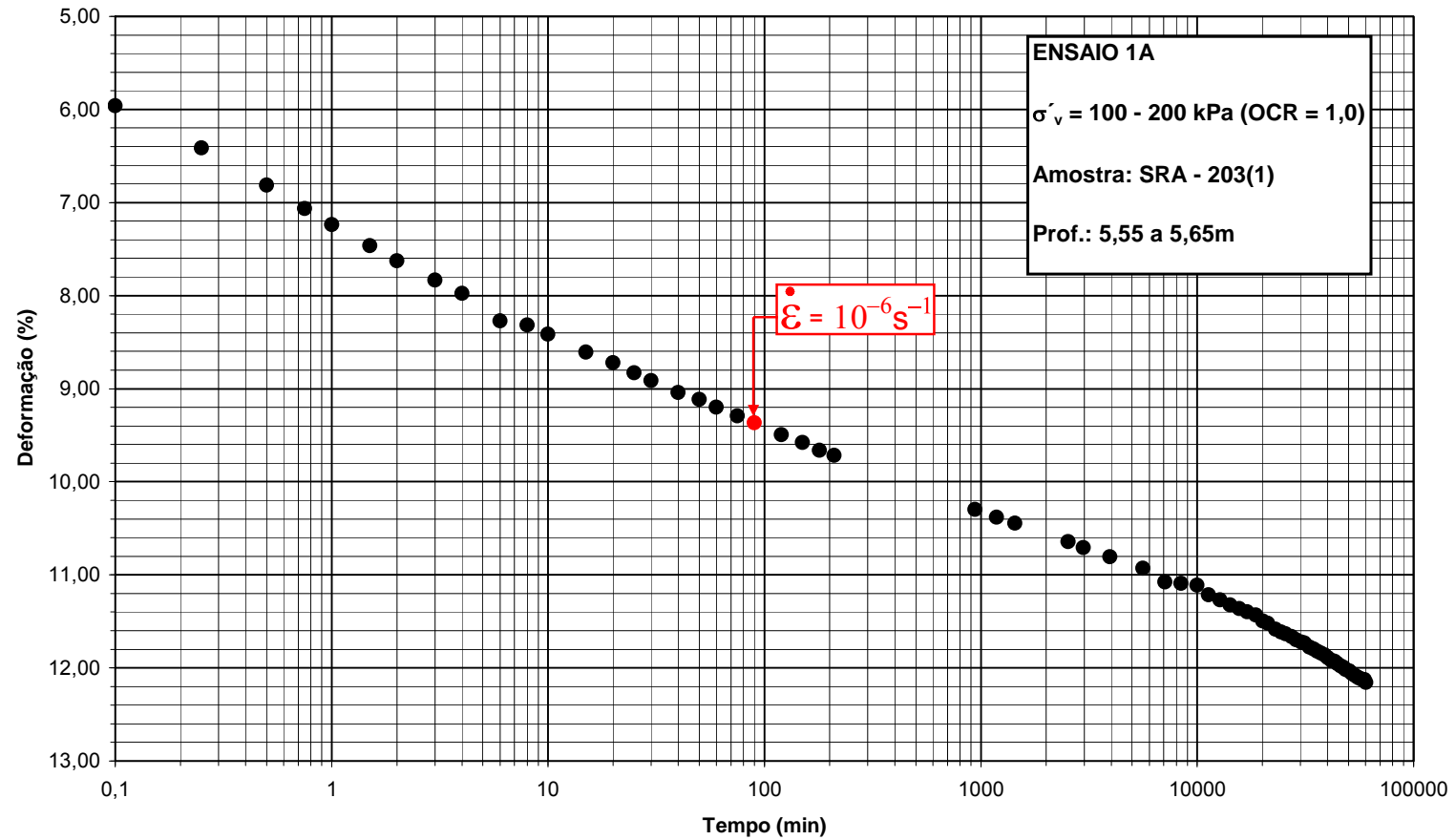


Figura 4.64: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1B - Relaxação a partir de 200 kPa

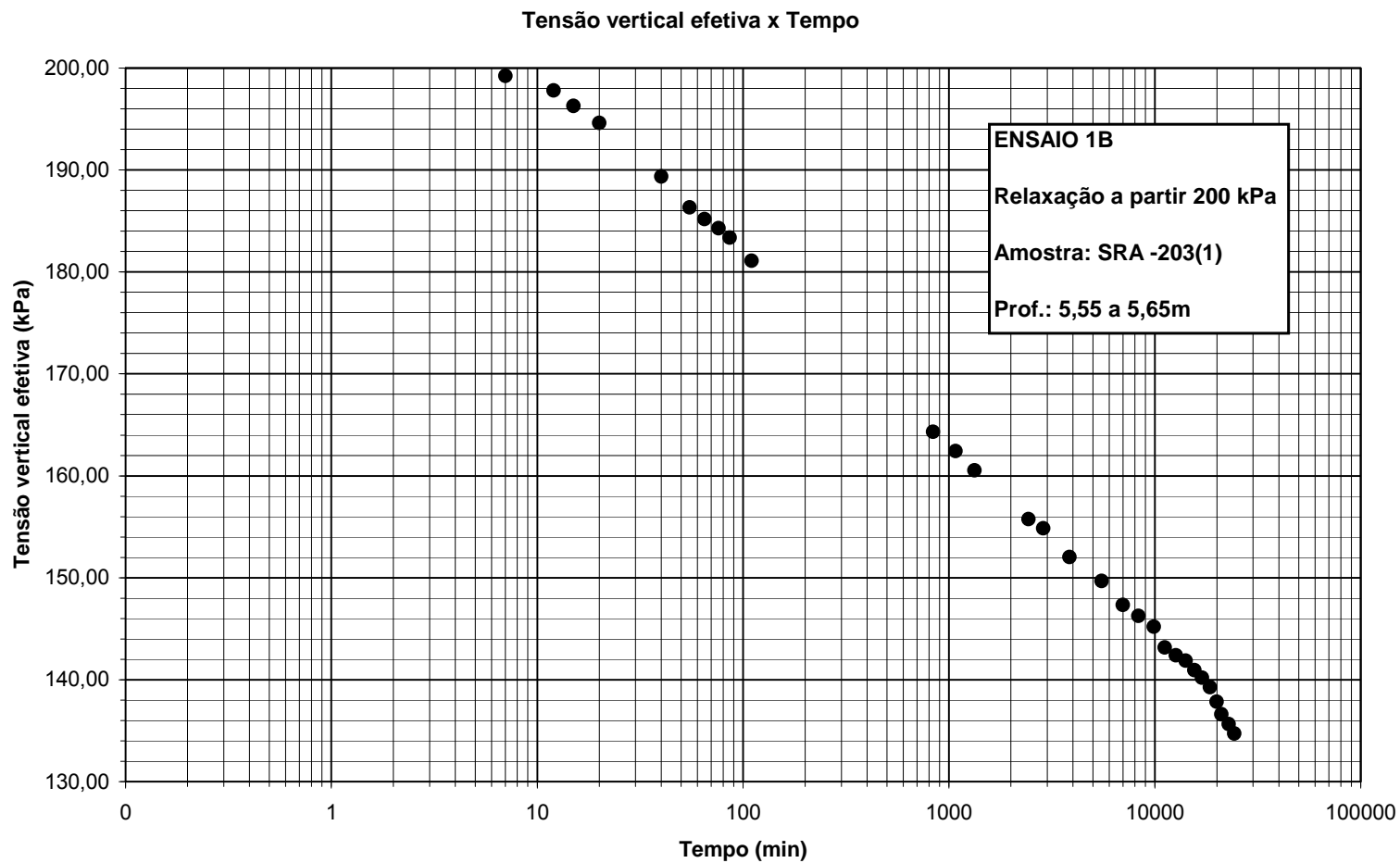


Figura 4.65: Curva de relaxação do ensaio 1B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1C
Carregamento: 100 - 250 kPa - Descarregamento: 200 - 250 kPa (OCR = 1,25)

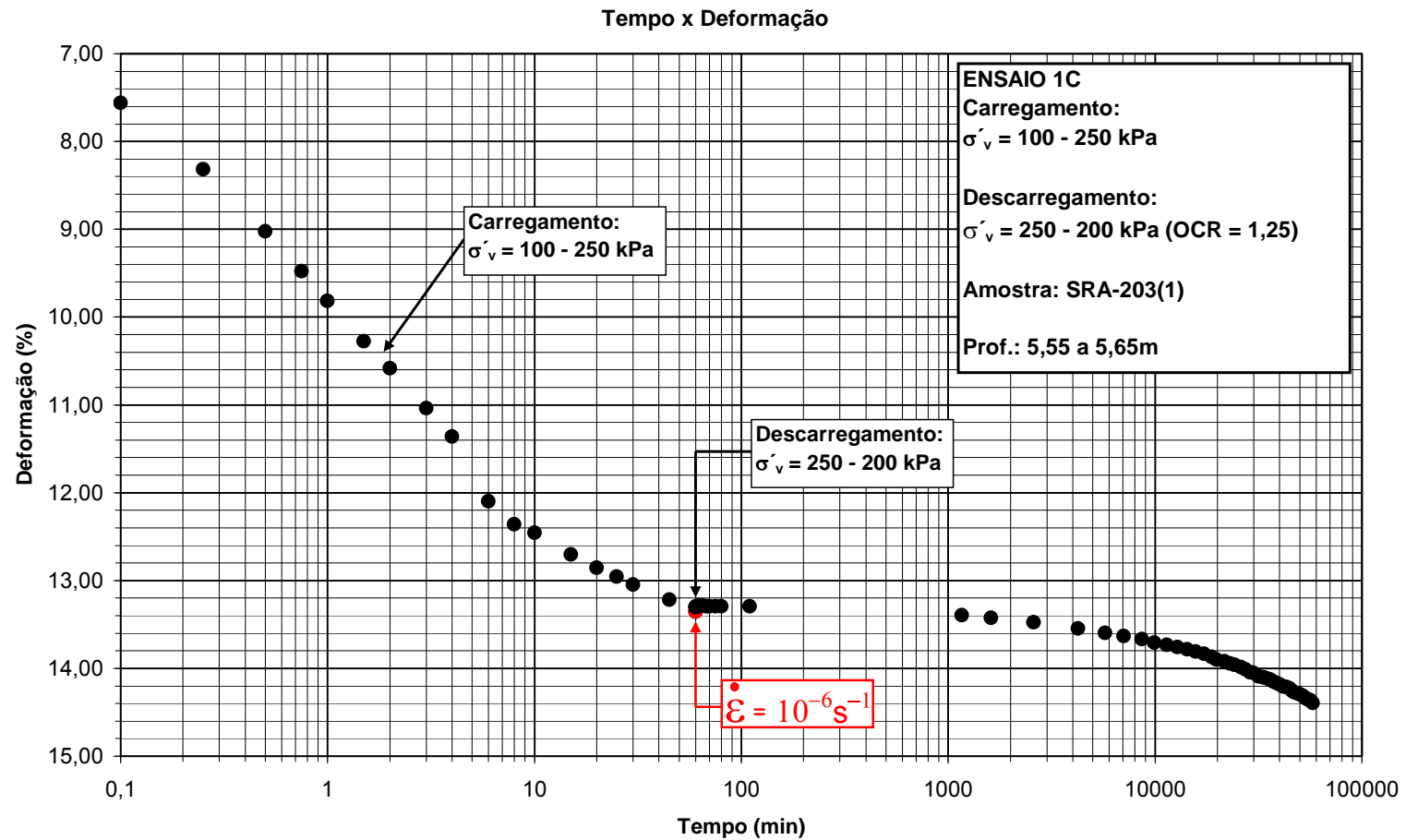


Figura 4.66: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1C

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT- ATERRO PILOTO - SRA-203

Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1C

Descarregamento: 250 - 200 kPa (OCR = 1,25)

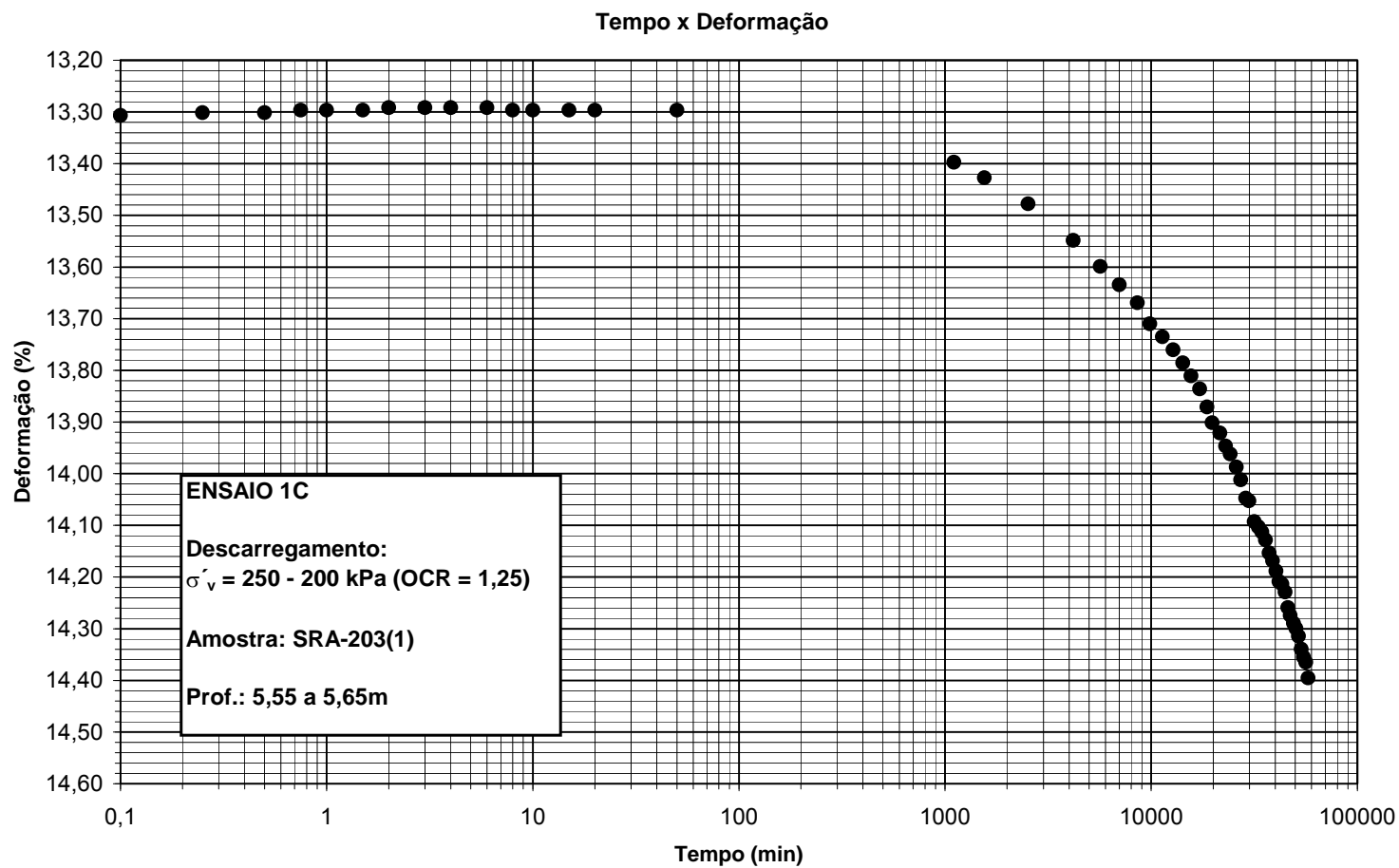


Figura 4.67: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1C a partir do descarregamento

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1D
Carregamento: 100 - 300 kPa - Descarregamento: 300 - 200 kPa (OCR = 1,5)

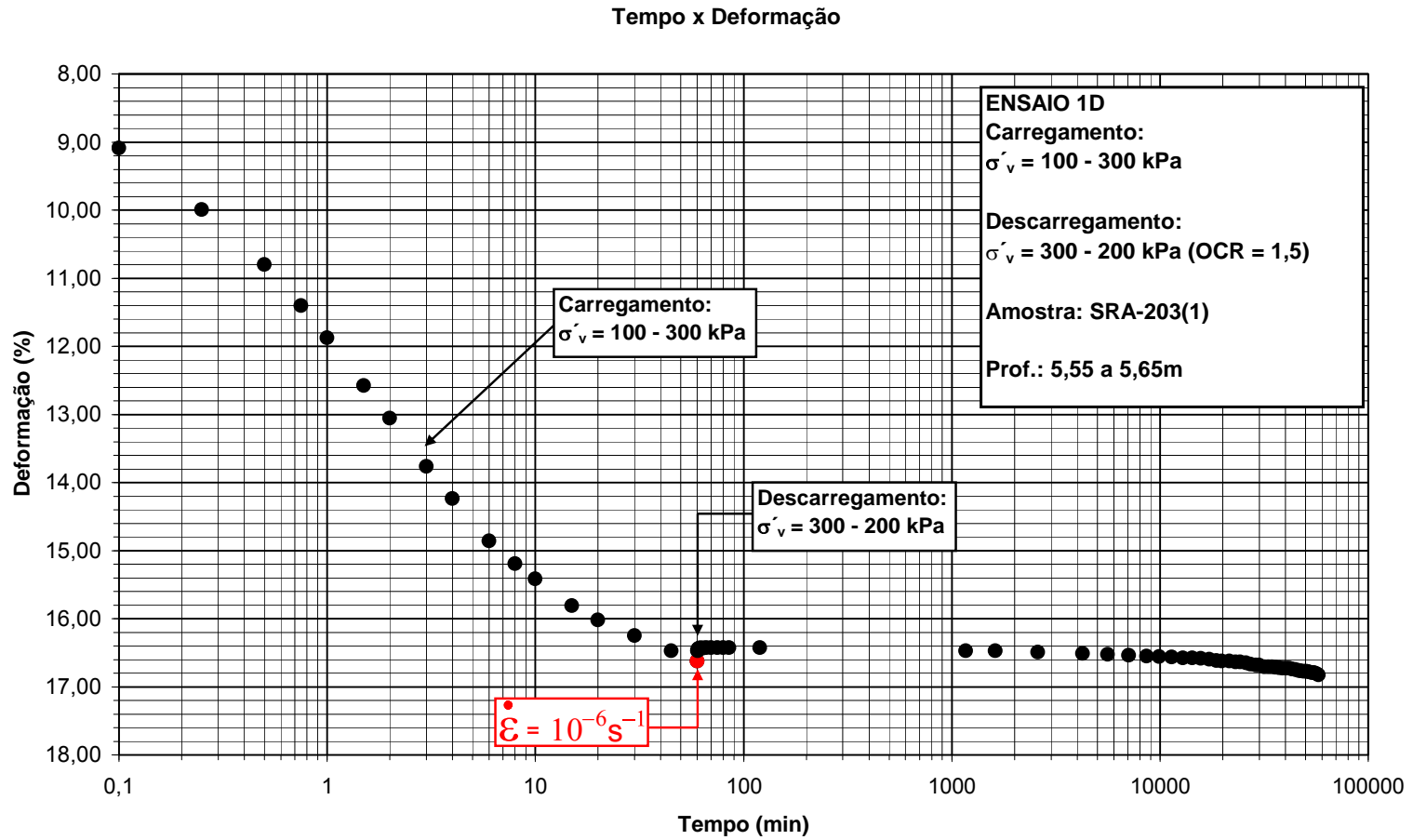


Figura 4.68: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1D

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 1D
Descarregamento: 300 - 200 kPa (OCR =1,5)

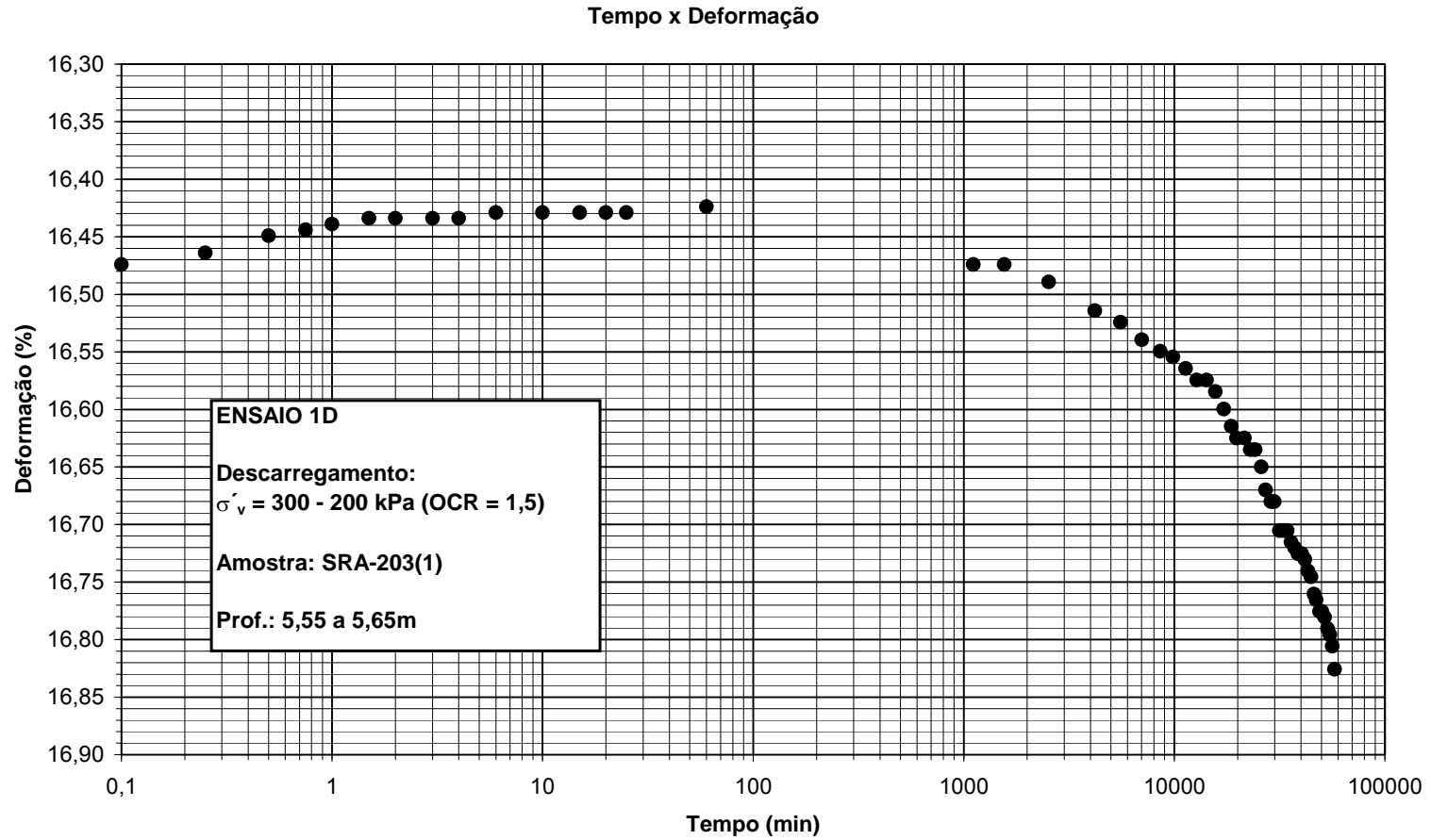


Figura 4.69: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 1D a partir do descarregamento

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 3A - Estágio 100 - 200 kPa (OCR =1)

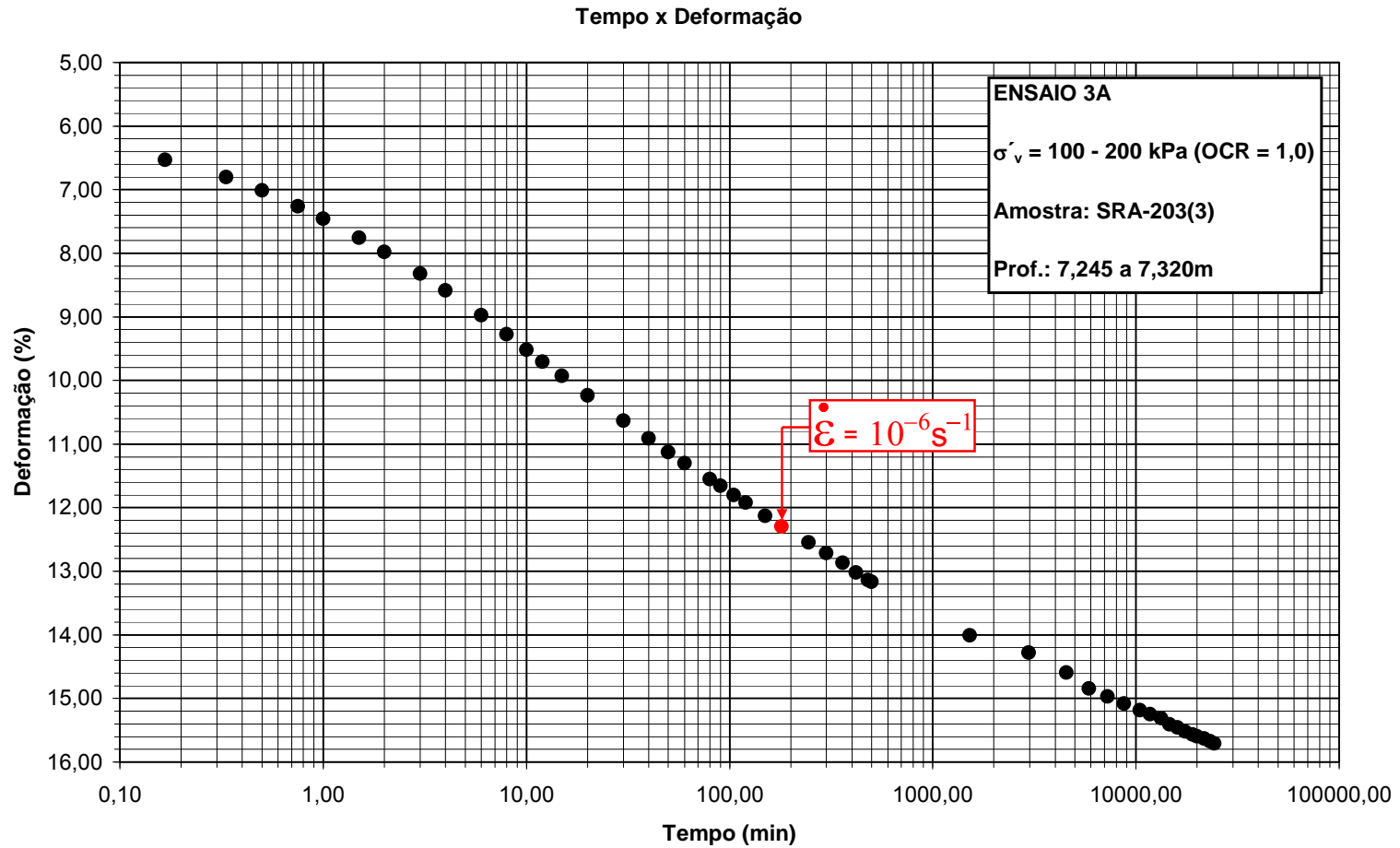


Figura 4.70: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 3B - Relaxação a partir de 200 kPa

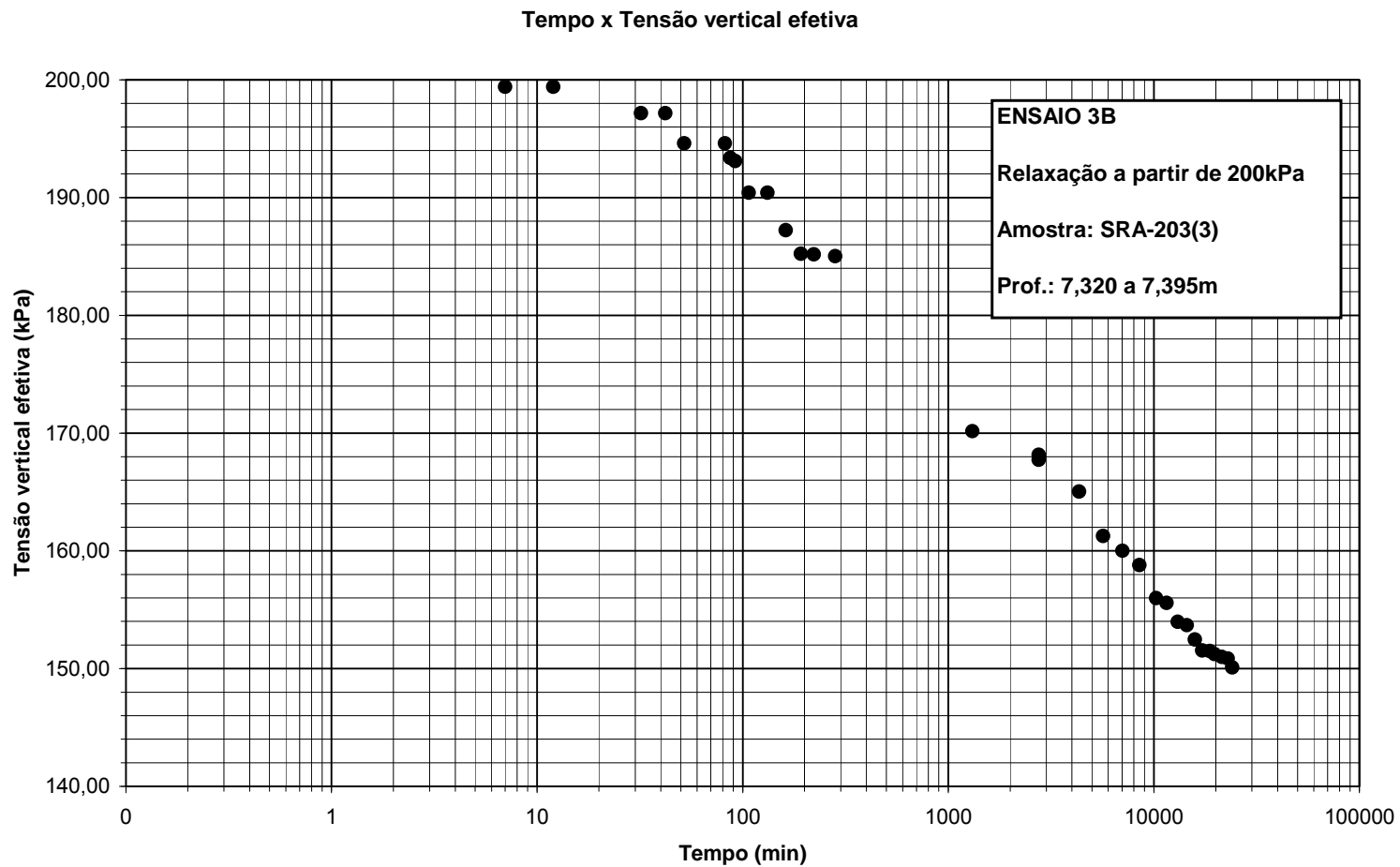


Figura 4.71: Curva de relaxação do ensaio 3B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 3C
Carregamento: 100 - 250 kPa e Descarregamento: 250 - 200 kPa (OCR =1,25)

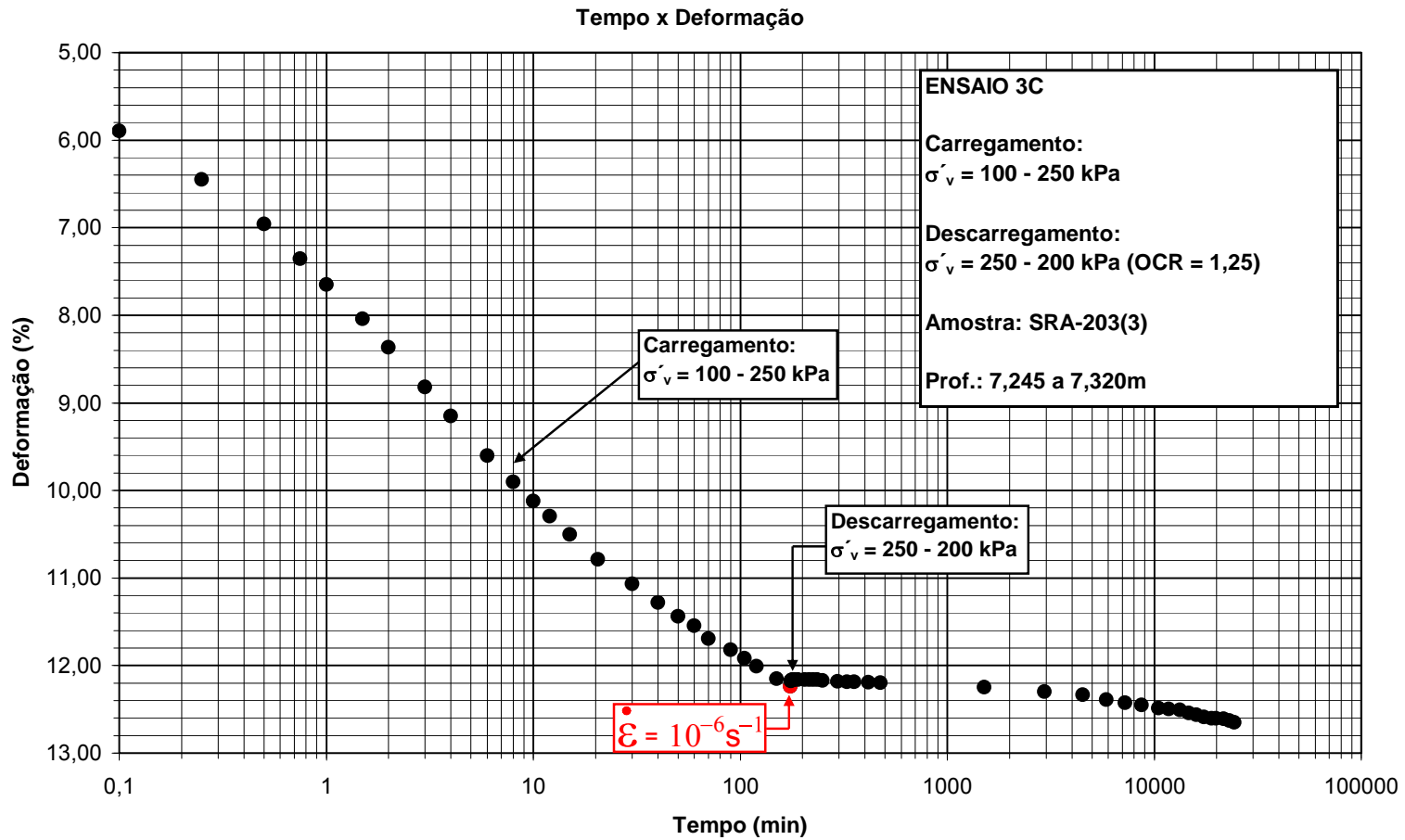


Figura 4.72: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3C

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 3C
Descarregamento: 250 - 200 (OCR =1,25)
Tempo x Deformação

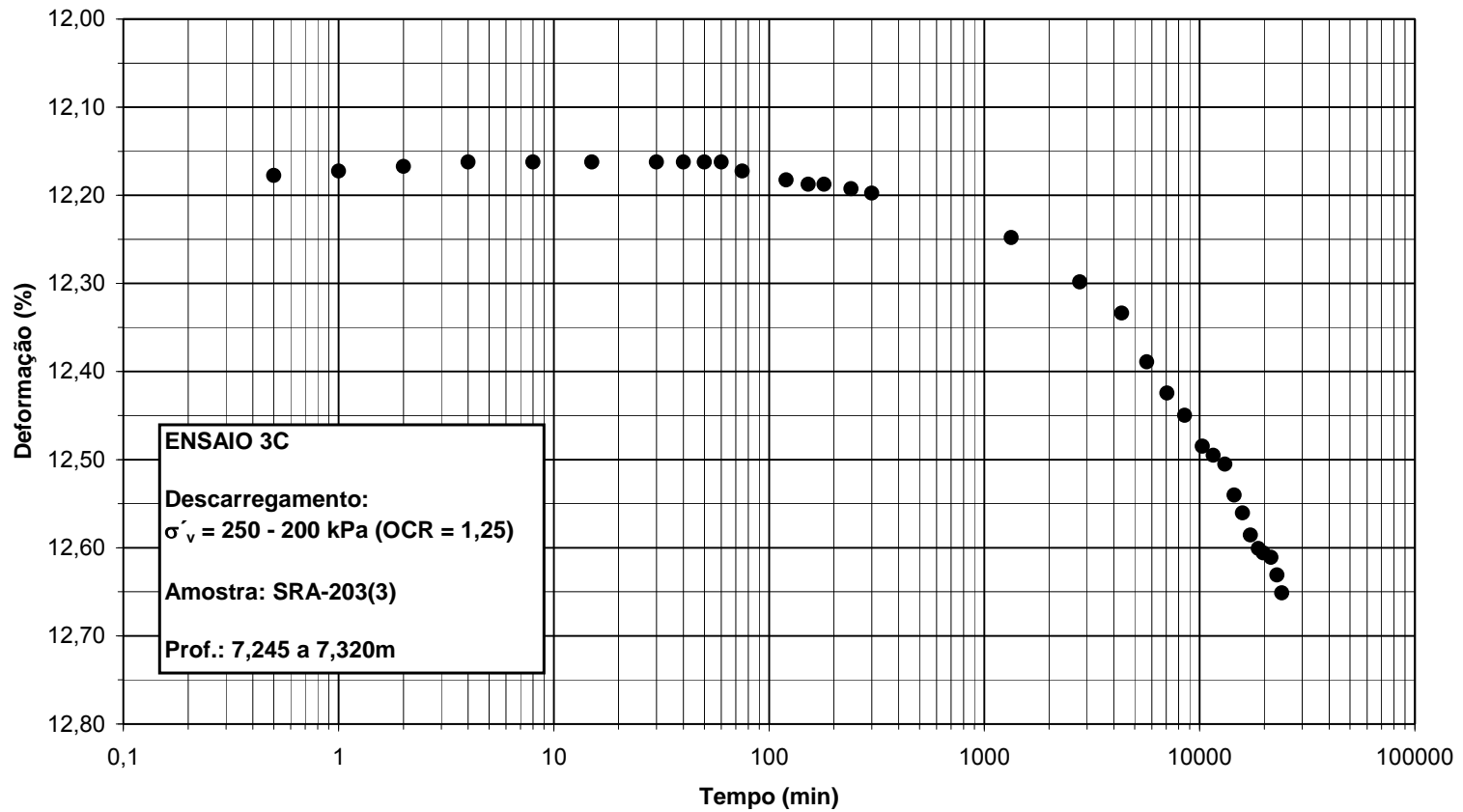


Figura 4.73: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 3C a partir do descarregamento

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 4A - Estágio 200 - 400 kPa

Tempo x Deformação

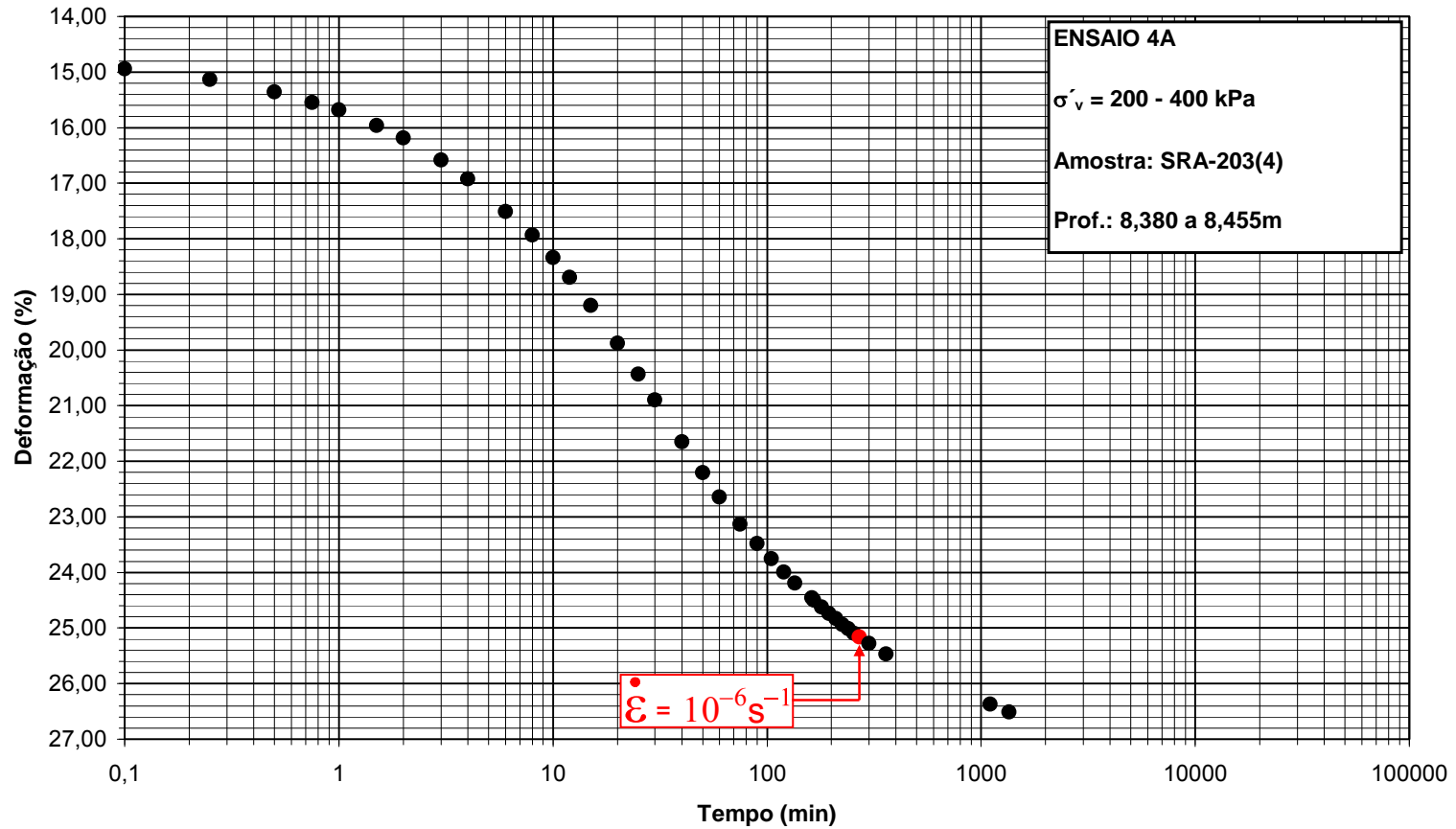


Figura 4.74: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 4B - Relaxação a partir de 200 kPa

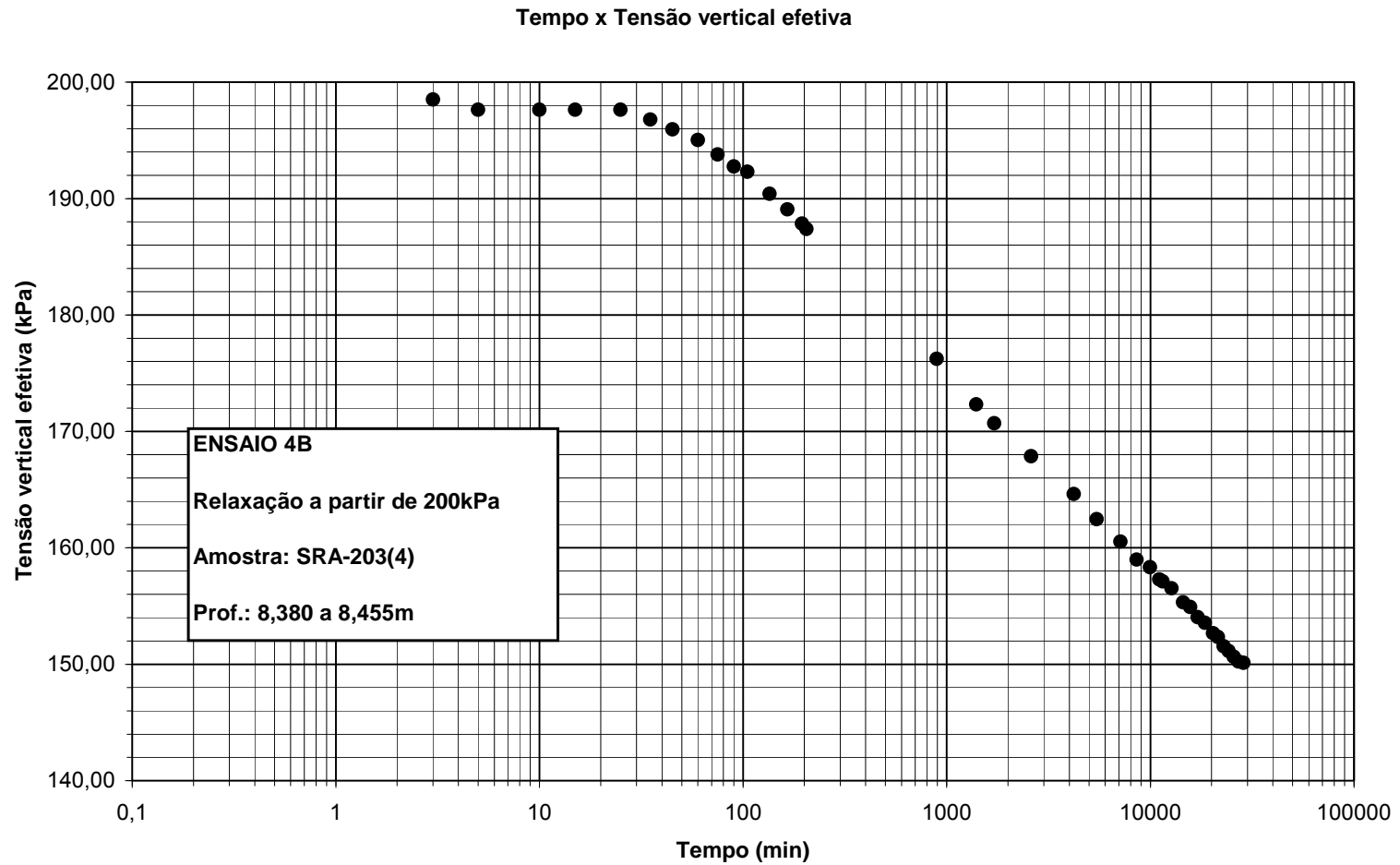


Figura 4.75: Curva de relaxação do ensaio 4B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 4C
Carregamento: 100 - 300 kPa - Descarregamento: 300 - 200 kPa (OCR = 1,5)

Tempo x Deformação

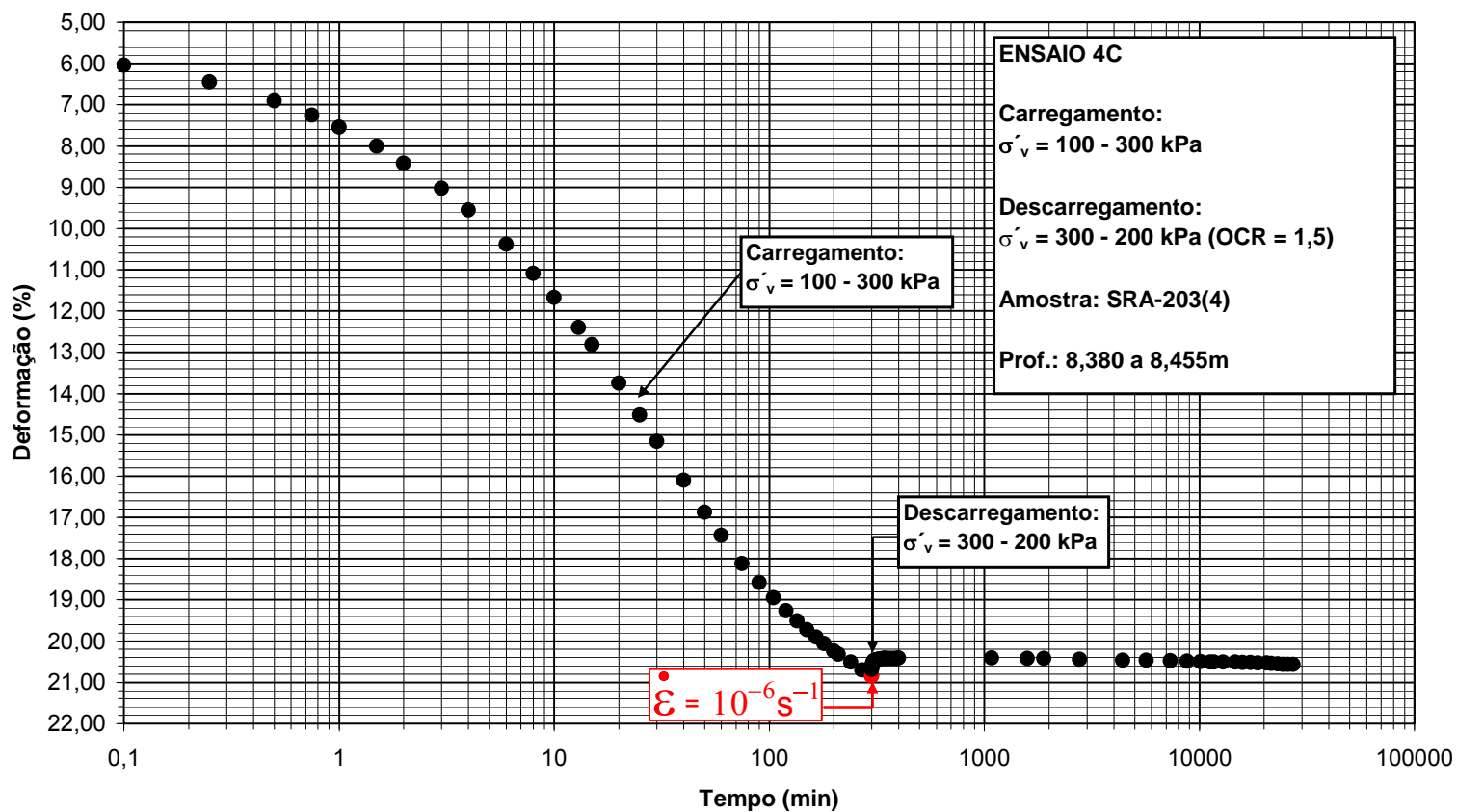


Figura 4.76: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4C

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 4C
Descarregamento: 300 - 200 kPa (OCR = 1,5)

Tempo x Deformação

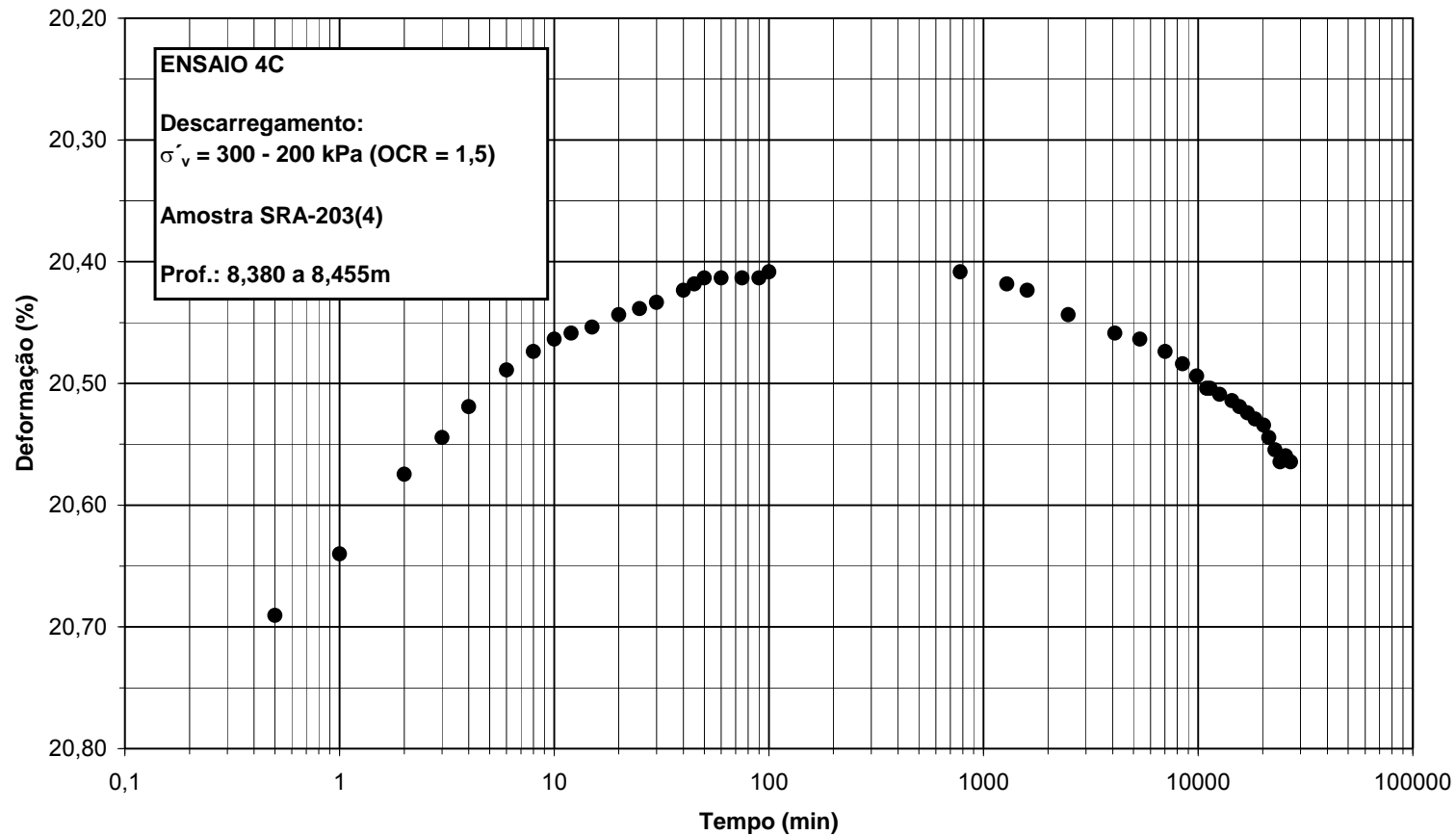


Figura 4.77: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 4C a partir do descarregamento

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 5A - Estágio 150 - 200 kPa (OCR =1)

Tempo x Deformação

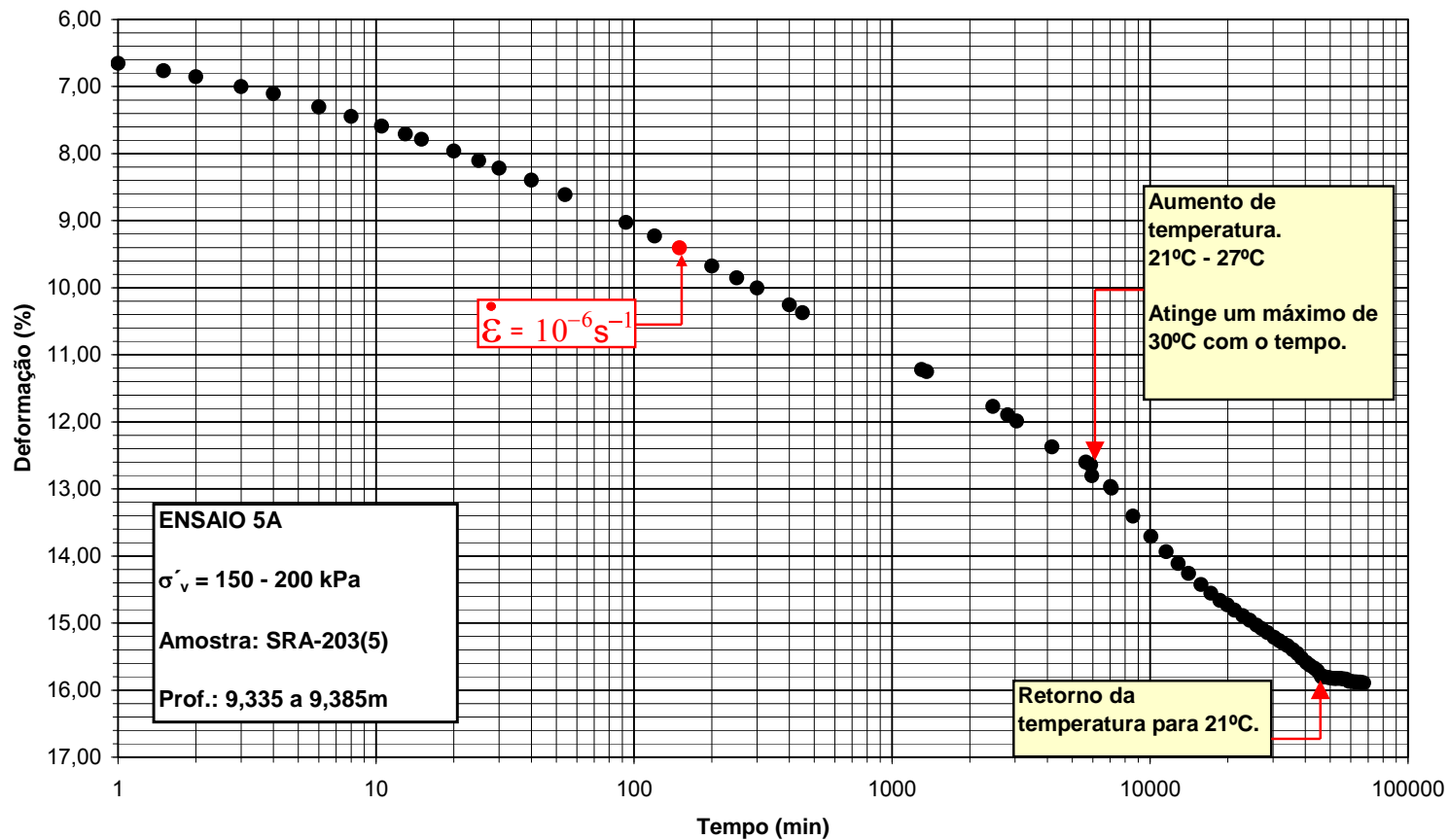


Figura 4.78: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 5B - Relaxação a partir de 300 kPa

Tempo x Tensão vertical efetiva (σ'_v)

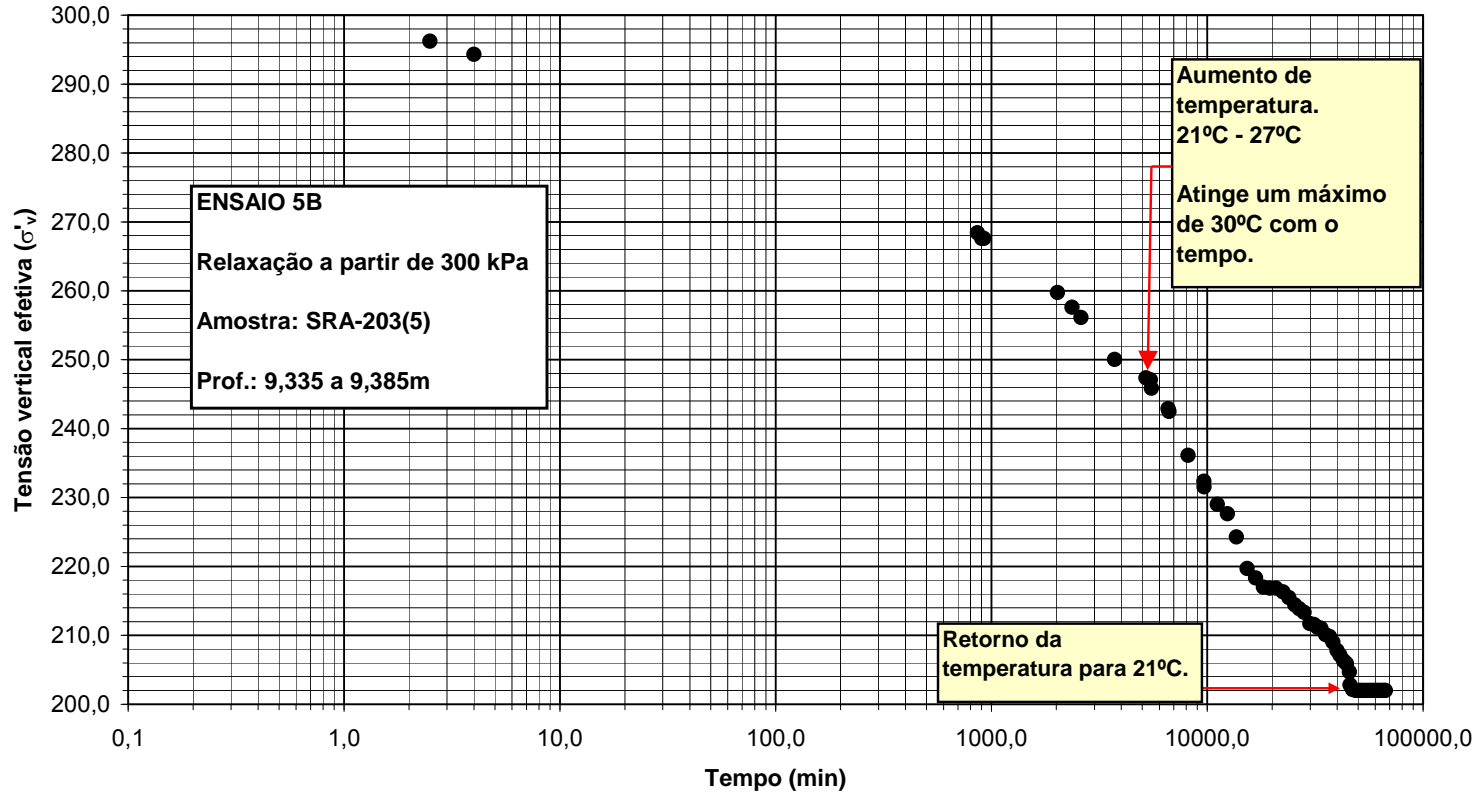


Figura 4.79: Curva de relaxação do ensaio 5B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 5C
Carregamento 200 - 300 kPa e Descarregamento 300 - 200 kPa (OCR =1,5)

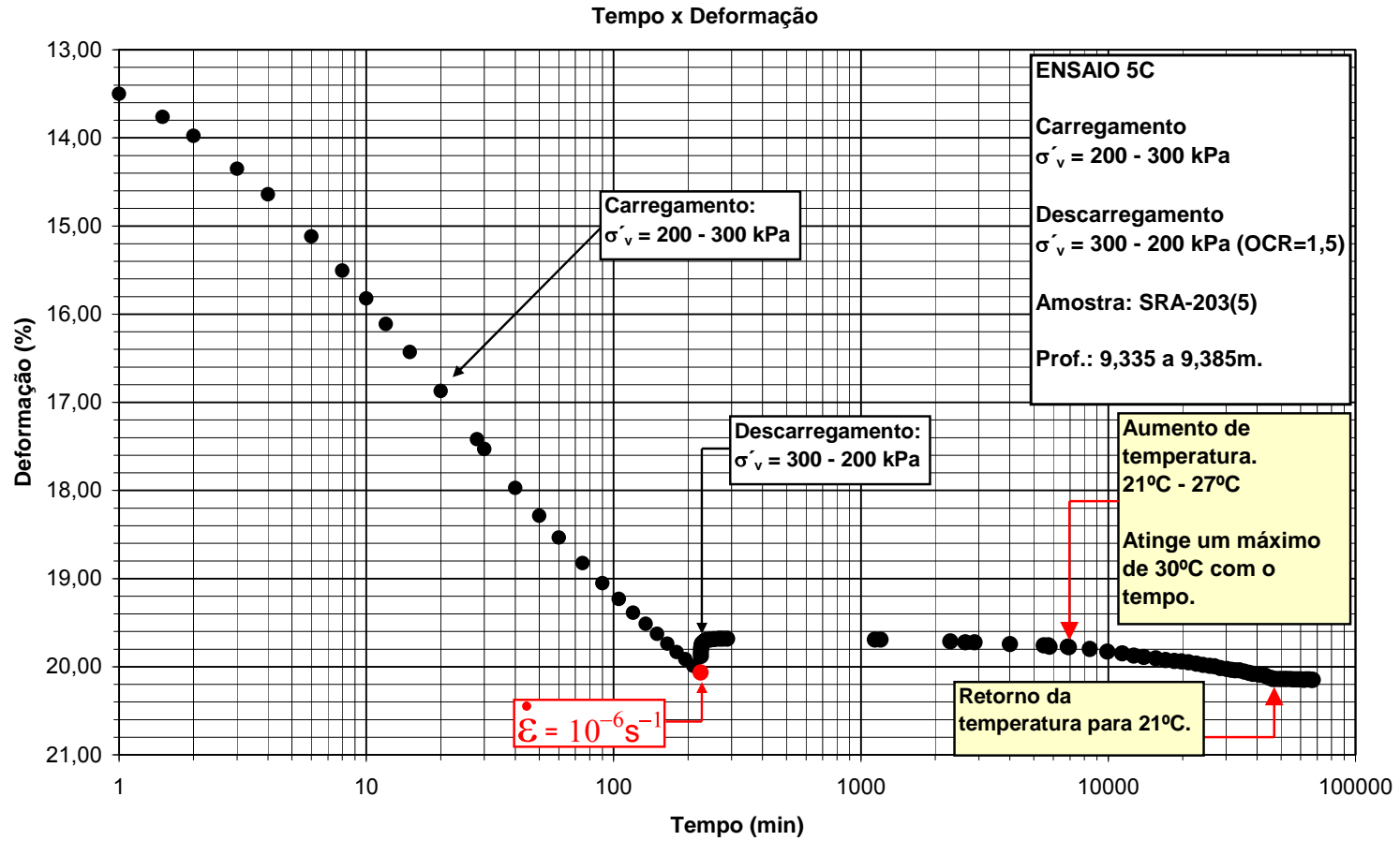


Figura 4.80: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5C

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 5C
Descarregamento 300 - 200 kPa (OCR =1,5)

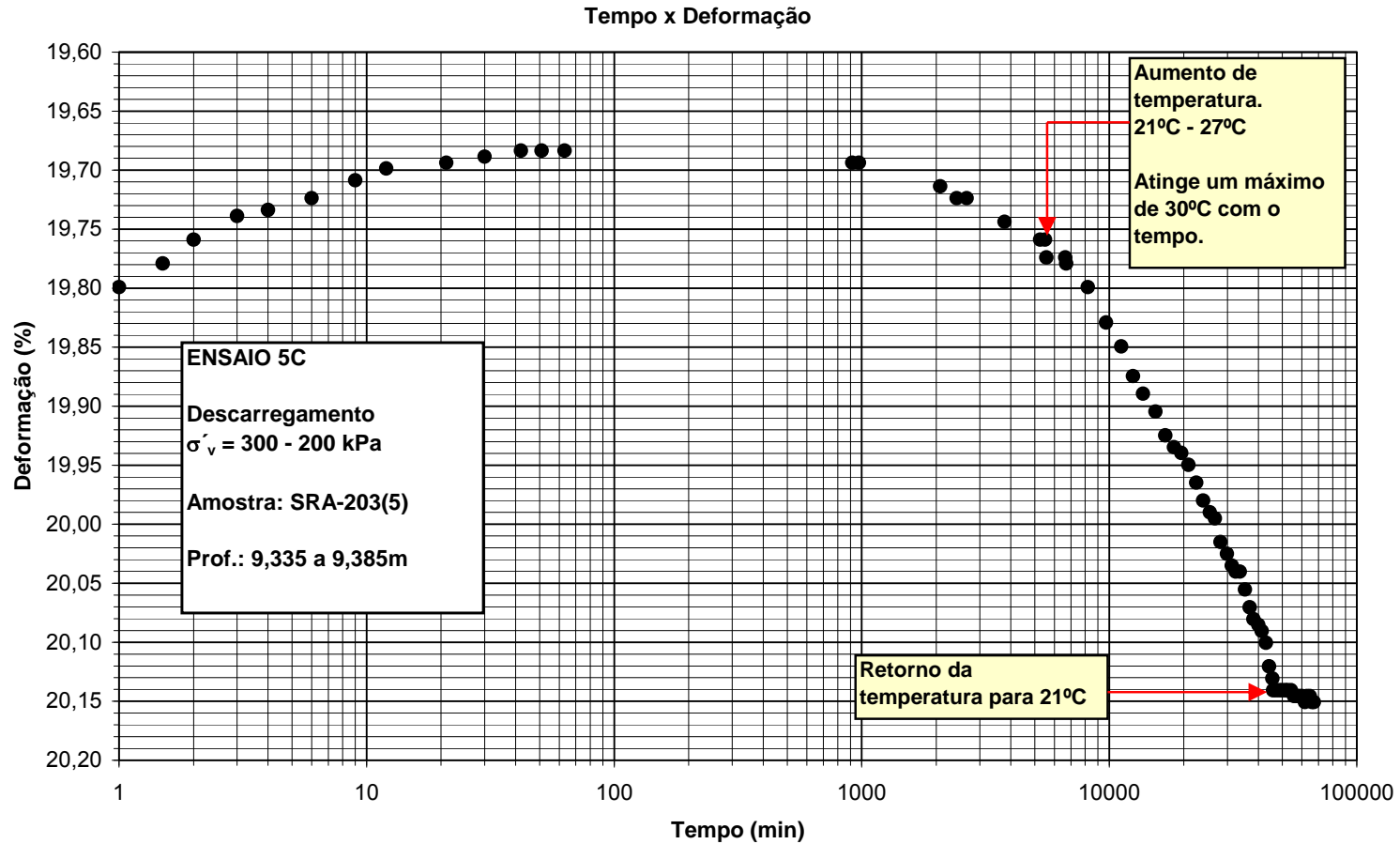


Figura 4.81: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 5C a partir do descarregamento

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 6A - Estágio 200 - 400 kPa (OCR =1)

Tempo x Deformação

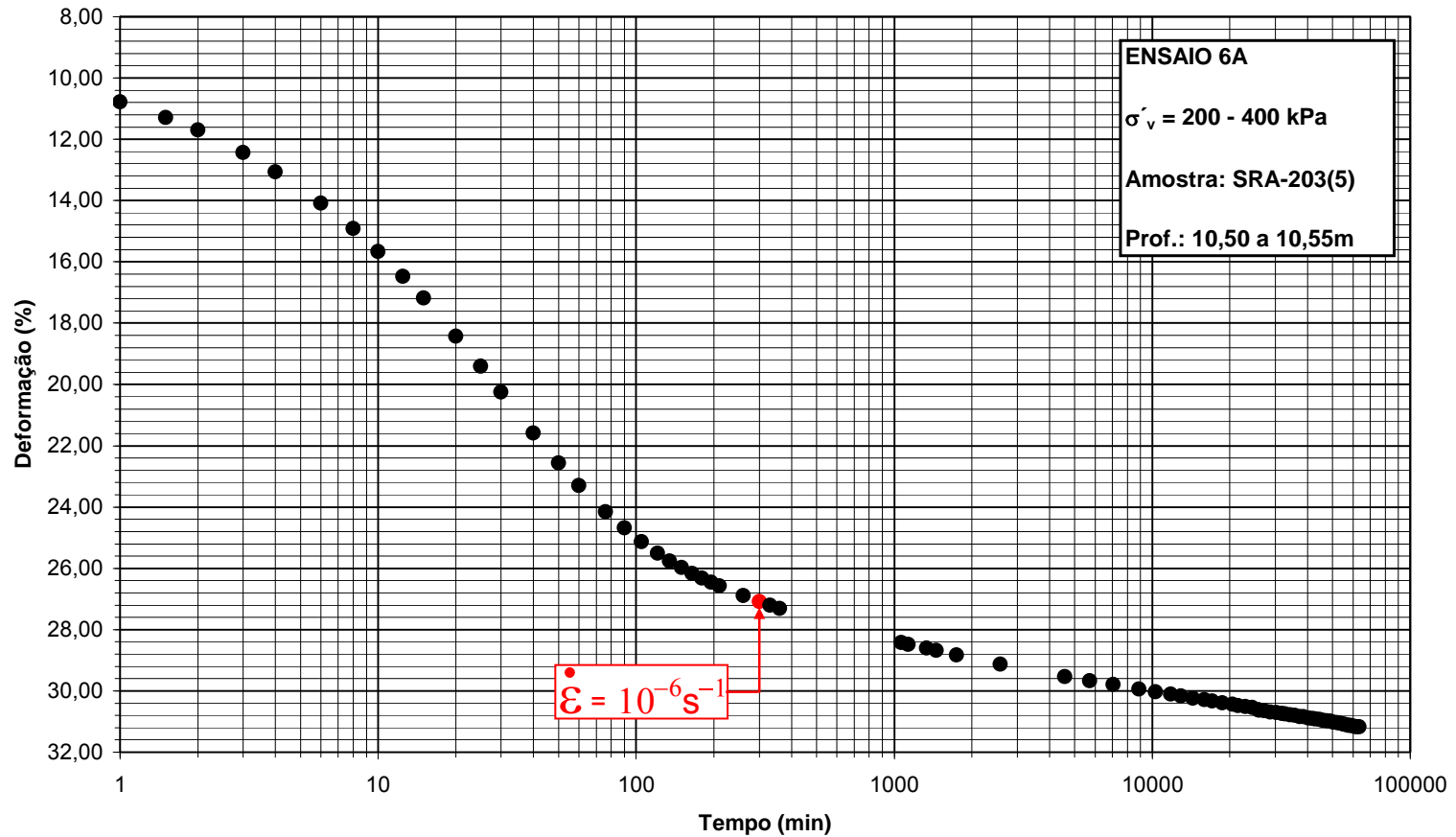


Figura 4.82: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 6B
Carregamento: 400 - 720 kPa - Descarregamento: 720 - 400 (OCR =1,8)

Tempo x Deformação

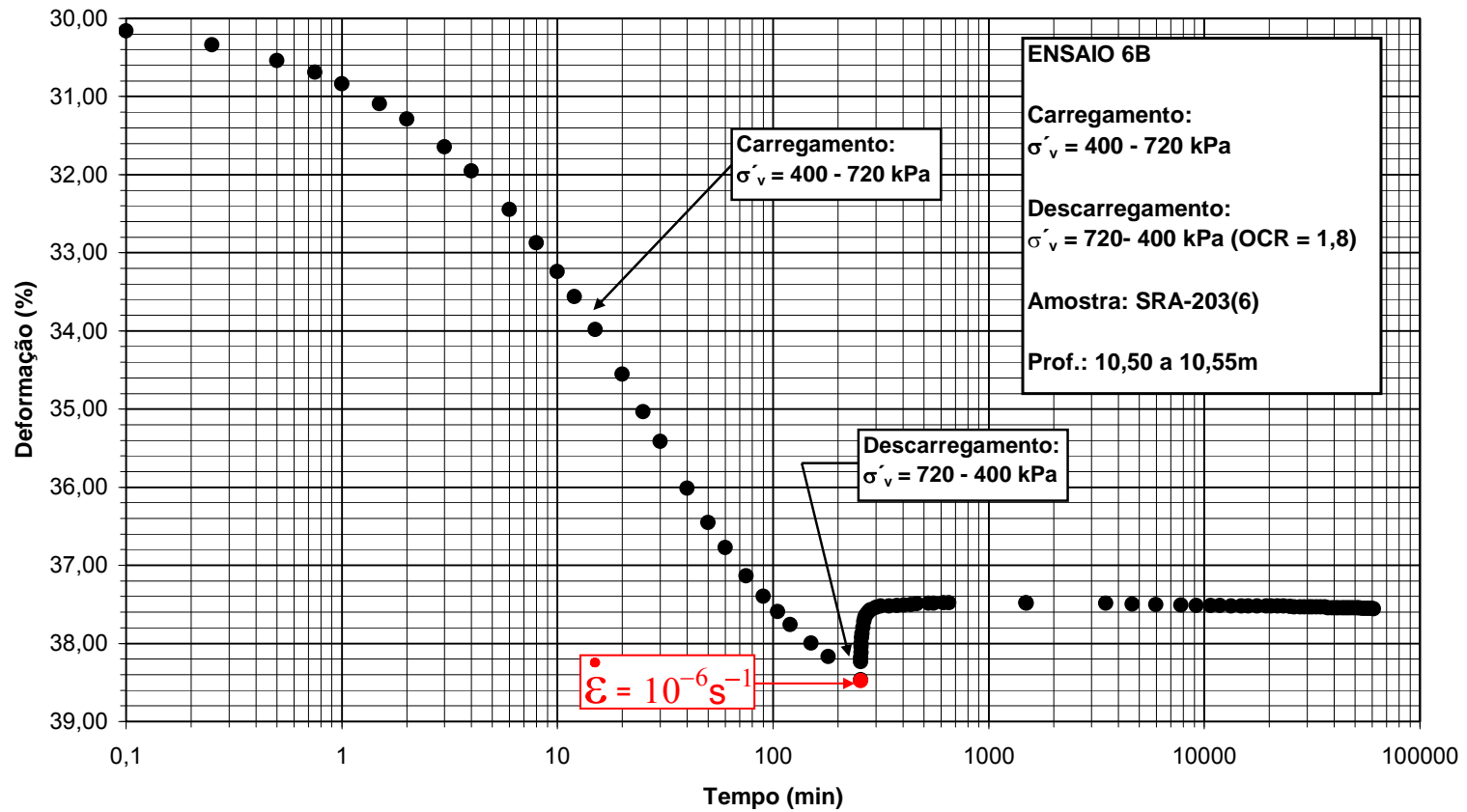


Figura 4.83: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA-203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 6B
Descarregamento: 720 - 400 (OCR = 1,8)

Tempo x Deformação

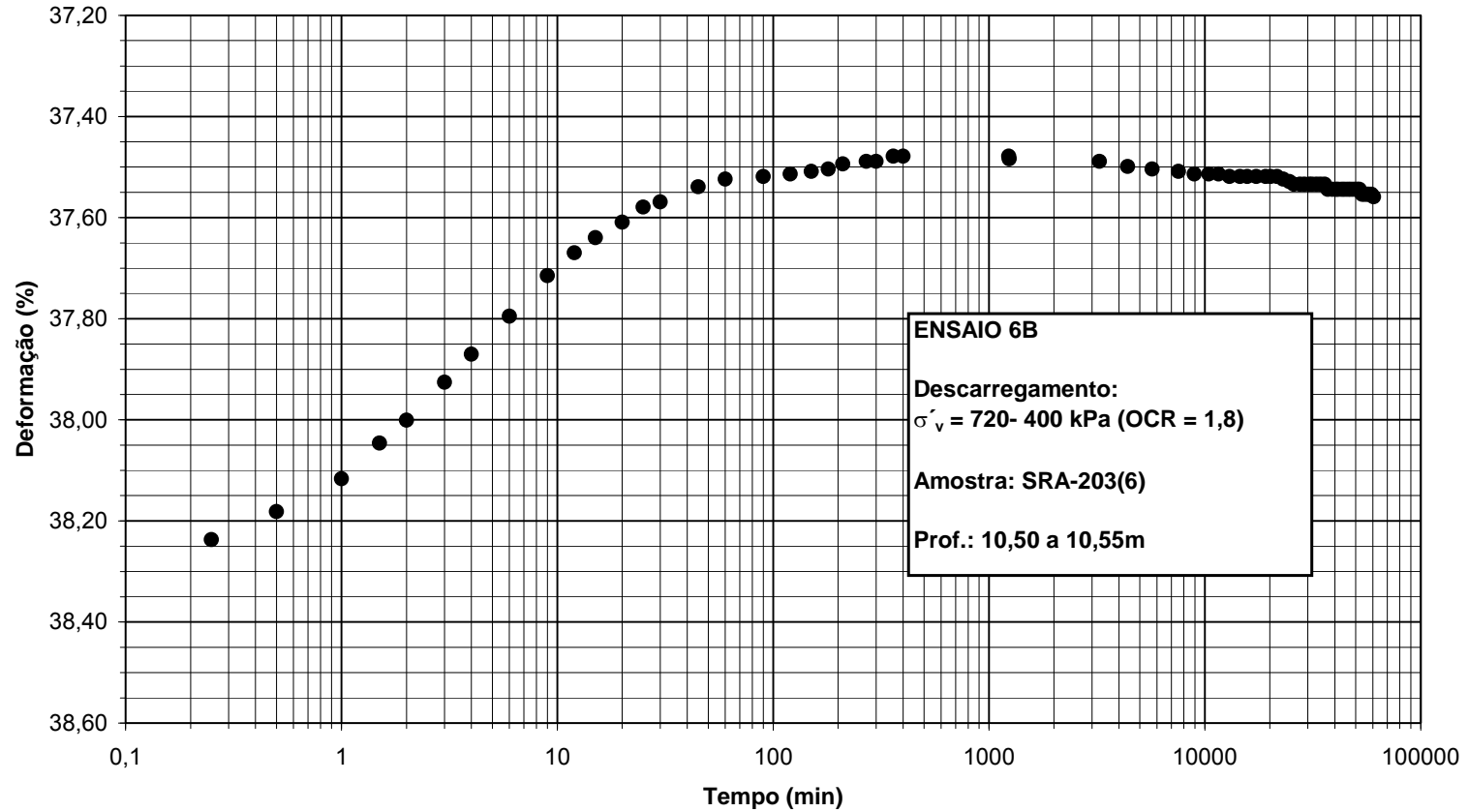


Figura 4.84: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6B a partir do descarregamento

NOVO TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 6C
Carregamento: 400 - 640 kPa - Descarregamento: 640 - 400 (OCR =1,6)

Tempo x Deformação

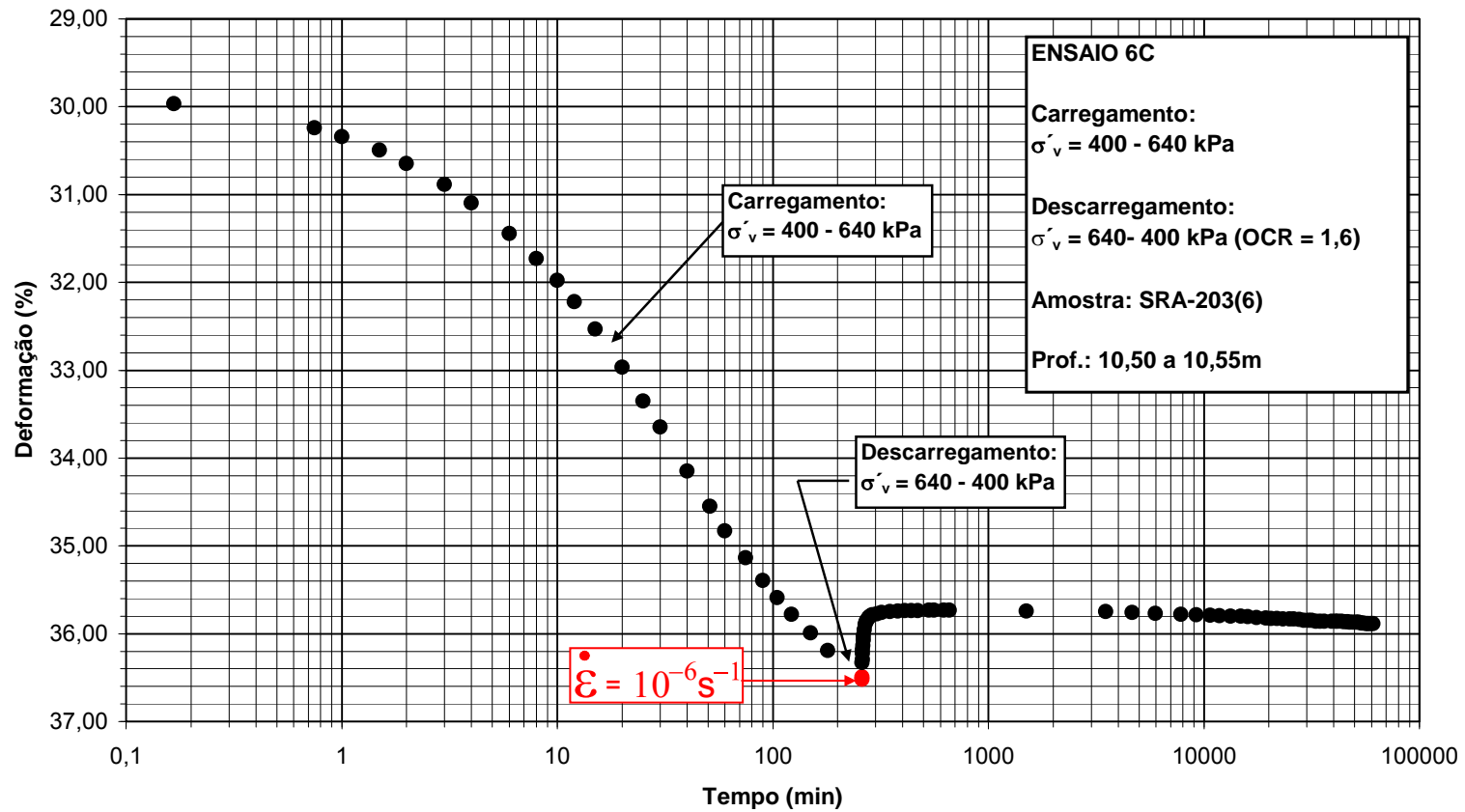


Figura 4.85: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6C

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA -203
Ensaio de adensamento edométrico - Ensaio 6C
Carregamento: 400 - 640 kPa - Descarregamento: 640 - 400 (OCR = 1,6)

Tempo x Deformação

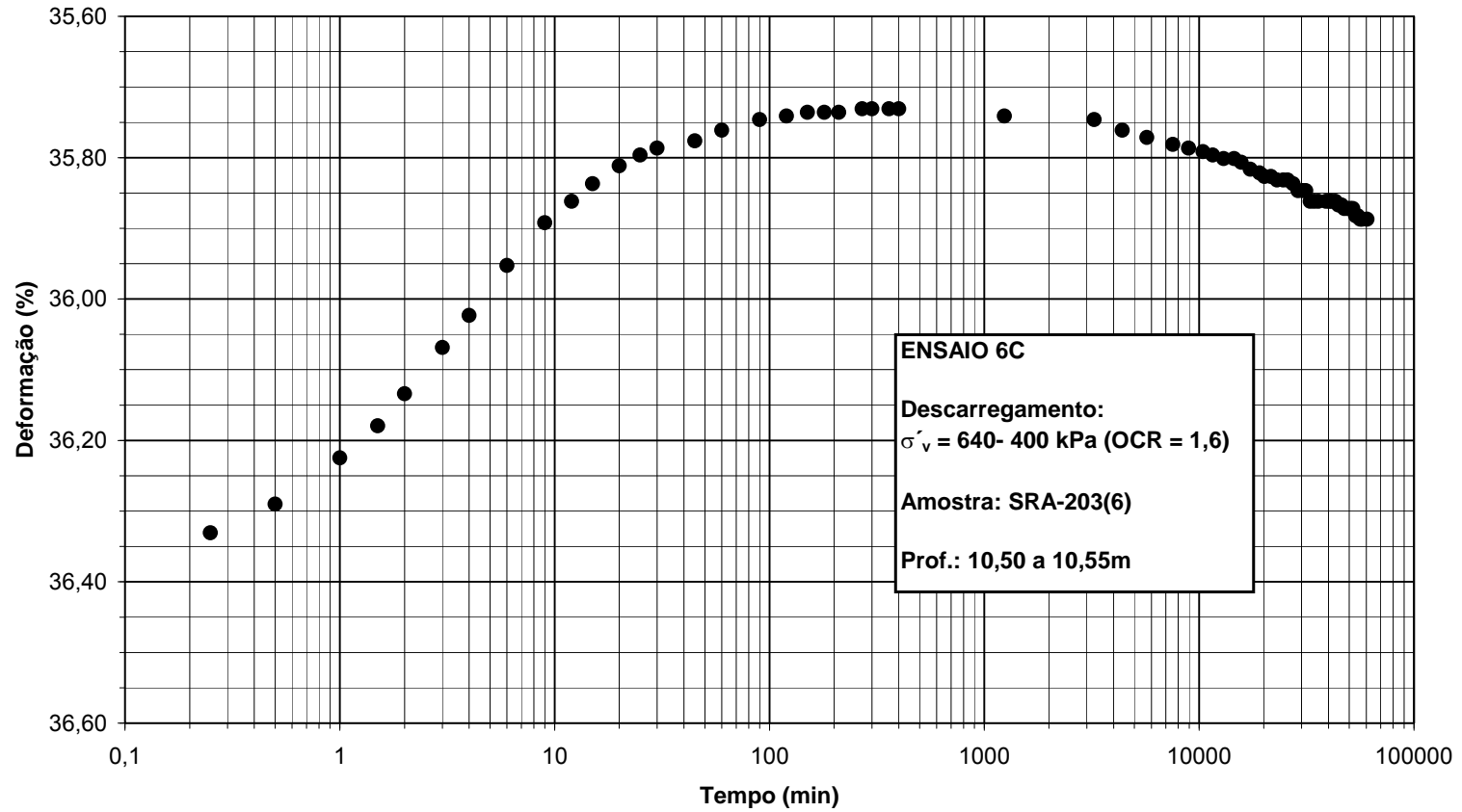


Figura 4.86: Curva de adensamento de longa duração do ensaio 6C a partir do descarregamento

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Critério de carregamento e traçado da curva de compressibilidade

Não se tem conhecimento de nenhum trabalho no qual tenha sido empregado um critério de carregamento no ensaio de adensamento edométrico convencional baseado na velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) conforme procedido nesta dissertação.

O critério de carregar o ensaio de adensamento edométrico e traçar a curva de compressibilidade com base na velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) está escorado nas seguintes abordagens:

1. **Taylor e Merchant (1940), Terzaghi (1941), Taylor (1942) e Bjerrum (1973)**, nas quais é admitida que a tensão vertical efetiva (σ'_v) é função do índice de vazios (e) e da velocidade de deformação ($\dot{\epsilon}$),
2. **Leroueil et al (1985)**, na qual é mostrado que existe uma relação única entre tensão vertical efetiva (σ'_v), deformação (ϵ) e velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$), na compressão unidimensional de argilas naturais,
3. **Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ**, na qual é assumida que a tensão vertical efetiva (σ'_v) corresponde à soma de duas parcelas, uma sólido-sólido (σ'_{vs}), que é função exclusiva do índice de vazios (e), e outra viscosa (σ'_{vv}), que é função do índice de vazios (e) e da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$).

Sob a óptica das referidas abordagens, o critério de carregamento do ensaio de adensamento edométrico e do traçado da curva de compressibilidade baseada na velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) é mais coerente do que os critérios de carregar o ensaio ao fim de 24 horas e ao “fim” do adensamento primário. Isto porque as curvas de compressibilidade para 24 horas e para “fim” do adensamento primário não correspondem, obrigatoriamente, a lugares geométricos de pontos de mesma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log\sigma'_v$ ou e - $\log\sigma'_v$.

Não é demais repetir que neste trabalho o carregamento era efetuado quando a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) do corpo de prova atingia o valor de 10^{-6} s^{-1} , que corresponde à primeira potência inteira de 10 após o “fim” do adensamento primário. Com o emprego deste critério, cada estágio de carregamento $\Delta\sigma/\sigma=1$ durava aproximadamente 30 minutos no trecho de recompressão e 3 horas no trecho de compressão virgem, para as amostras mais argilosas. Com isso é possível realizar um ensaio de adensamento edométrico convencional até a tensão vertical de 800kPa em 2 dias.

5.2 Parâmetros de compressibilidade e adensamento primário

A tabela 5.1, a seguir, apresenta os domínios para os valores de $Cc/(1+e_0)$ e $c_{v \text{ lab}}$ das Argilas de Sedimentos Flúvio Lagunares (SFL) da Baixada Santista segundo Massad (1999).

Tabela 5.1: Domínios de $Cc/(1+e_0)$ e $c_{v \text{ lab}}$ das Argilas de Sedimentos Flúvio Lagunares (SFL) segundo Massad (1999)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média
$Cc/(1+e_0)$	0,33	0,51	0,43
$c_{v \text{ lab}} (\text{cm}^2/\text{s})$	$0,3 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-3}$	-

Os valores de $Cc/(1+e_0)$ determinados nos ensaios realizados em corpos de prova indeformados das amostras SRA203(1) e SRA203(3) estão abaixo do limite inferior do domínio apresentado por Massad (1999) (ver tabela 4.1). Isto deve-se, muito provavelmente, ao alto percentual de areia dessas amostras, as quais, na realidade, pertencem a uma camada de transição entre a camada de areia superficial sobrejacente e a camada de Argila de SFL subjacente. Já os valores de $Cc/(1+e_0)$ determinados nos ensaios realizados em corpos de prova indeformados das amostras SRA203(4), SRA203(5) e SRA206(6), com exceção dos corpos de prova 5B e 5C, são um pouco superiores ao limite superior do domínio apresentado por Massad (1999) (ver tabela 4.1). Essas diferenças são possivelmente devidas ao fato das amostras aqui apresentadas serem de qualidade superior. Esta questão será abordada mais adiante.

Os valores de c_v _{lab} determinados nos ensaios realizados em corpos de prova indeformados das amostras SRA203(4), SRA203(5) e SRA203(6) estão dentro do domínio apresentado por Massad (1999). Já os valores de c_v determinados nos ensaios realizados em corpos de prova indeformados das amostras SRA203(1), SRA203(2) e SRA203(3) são superiores ao limite superior do domínio apresentado por Massad (1999). Tal fato deve-se, muito provavelmente, ao alto percentual de areia das amostras SRA203(1), SRA203(2) e SRA203(3), as quais, conforme já mencionado, pertencem a uma camada de transição entre a camada de areia superficial sobrejacente e a camada de Argila de SFL subjacente.

Observa-se uma excelente repetibilidade dos parâmetros de compressibilidade obtidos em ensaios feitos em corpos de prova indeformados originados de uma mesma amostra (ver tabela 4.1). Tal fato faz com que haja confiabilidade dos parâmetros de compressibilidade obtidos.

As curvas “ c_v x σ'_v ” dos corpos de prova indeformados de uma mesma amostra são muito parecidas, o que também aumenta a confiabilidade desses resultados.

5.3 Efeitos do amolgamento

Com exceção da amostra SRA203(2), para todas as amostras com as quais se ensaiou um corpo de prova remoldado no laboratório, a comparação entre as curvas de compressibilidade do corpo de prova remoldado e dos corpos de prova indeformados evidenciou todos os efeitos do amolgamento na curva de compressibilidade segundo Ladd (1973), a saber:

- Diminuição do índice de vazios (ou aumento de deformação) para qualquer valor de tensão vertical efetiva;
- Torna difícil a determinação da tensão de sobreadensamento (σ'_{vm});
- Diminuição do valor estimado para a tensão de sobreadensamento (σ'_{vm});

- Aumento da compressibilidade na região de recompressão e diminuição da compressibilidade na região de compressão virgem.

Esses efeitos do amolgamento na curva de compressibilidade também foram observados por outros autores, como por exemplo, Coutinho (1976), Martins (1983) Coutinho (1988).

Os efeitos listados não foram observados na amostra SRA203(2) devido ao fato desta ser bastante arenosa.

Com exceção da amostra SRA203(2), para todas as demais amostras com as quais se ensaiou um corpo de prova remoldado no laboratório, a comparação entre as curvas “ c_v - $\log \sigma'_v$ ” do corpo de prova remoldado e dos corpos de prova indeformados mostrou que para qualquer tensão vertical efetiva (σ'_v) o coeficiente de adensamento (c_v) do corpo de prova remoldado é menor do que o coeficiente de adensamento (c_v) do corpo de prova indeformado. Esta diferença é mais acentuada no trecho de recompressão do que no trecho de compressão virgem.

Observa-se que a medida que a tensão vertical efetiva aumenta, as curvas de compressibilidade dos corpos de prova indeformados tendem a convergir para a curva de compressibilidade do corpo de prova remoldado. Além disso, a inclinação do trecho de descarregamento final da curva de compressibilidade do corpo de prova remoldado é igual à inclinação do trecho de descarregamento final das curvas de compressibilidade dos corpos de prova indeformados. Isto ocorre porque, a medida em que os estágios de carregamento se sucedem, a tensão vertical efetiva aumenta fazendo com que a estrutura do corpo de prova indeformado vai sendo destruída e, portanto, seu comportamento vai se aproximando do comportamento do corpo de prova remoldado.

É importante destacar que a exigência do cumprimento da norma ABNT NBR-9820/1997 – “Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência” e do documento “Especificação técnica para coleta de amostras indeformadas” garantiram a obtenção de amostras de boa qualidade.

O cuidado na moldagem dos corpos de prova, seguindo as recomendações de Ladd e deGroot (2007), e o cuidado na execução dos ensaios contribuíram para a excelente qualidade dos resultados obtidos refletida na repetibilidade dos parâmetros de compressibilidade e de adensamento primário obtidos em ensaios de corpos de prova indeformados esculpido a partir de uma mesma amostra.

O procedimento de realizar ensaios com corpos de prova remoldados no laboratório a fim de comparar as curvas de compressibilidade do corpo de prova remoldado com as curvas de compressibilidade dos corpos de prova supostamente indeformados de uma mesma amostra mostrou-se bastante eficaz para verificação da qualidade da amostra. A curva de compressibilidade do corpo de prova remoldado serve como referência de qualidade uma vez que corresponde ao limite inferior de qualidade.

A tabela 5.2, a seguir, apresenta a classificação da qualidade dos corpos de prova segundo Lunne et al (1997) e Coutinho (2007).

Tabela 5.2: Qualidade dos corpos de prova

Amostra	Ensaio/ Corpo de Prova	Prof. (m)	σ'_{v0} (kPa)	σ'_{vm} (kPa)	OCR	e_0	$e(\sigma'_{v0})$	$\Delta e/e_0$	Qualidade	
									Lunne et al (1997)	Coutinho (2007)
SRA203(1)	1A	5,60	40	100	2,5	1,30	1,25	0,037	Boa/aceitável	Excelente
	1B	5,60	40	100	2,5	1,35	1,30	0,038	Boa/aceitável	Excelente
	1C	5,60	40	92	2,3	1,37	1,31	0,048	Boa/aceitável	Excelente
	1D	5,60	40	90	2,3	1,44	1,37	0,050	Boa/aceitável	Boa/aceitável
SRA203(3)	3A	7,28	50	105	2,1	1,55	1,46	0,062	Ruim	Boa/aceitável
	3B	7,36	50	100	2,0	1,69	1,63	0,038	Boa/aceitável	Excelente
	3C	7,28	50	120	2,4	1,52	1,46	0,043	Boa/aceitável	Excelente
	3D	7,36	50	35	1,0	1,83	1,50	0,217	Muito ruim	Muito ruim
SRA203(4)	4A	8,42	55	170	3,1	2,24	2,18	0,026	Boa/aceitável	Excelente
	4B	8,49	55	165	3,0	2,26	2,15	0,051	Ruim	Boa/aceitável
	4C	8,42	55	170	3,1	2,17	2,08	0,045	Boa/aceitável	Excelente
	4D	8,49	55	70	1,3	-	-	-	-	-
SRA203(5)	5A	9,36	60	170	2,8	1,97	1,88	0,048	Boa/aceitável	Excelente
	5B	9,42	60	165	2,8	2,02	1,92	0,051	Ruim	Boa/aceitável
	5C	9,42	60	155	2,6	2,14	1,99	0,077	Ruim	Boa/aceitável
	5D	9,49	60	65	1,1	2,13	1,86	0,142	Muito ruim	Muito ruim
SRA203(6)	6A	10,53	65	175	2,7	2,53	2,44	0,038	Boa/aceitável	Excelente
	6B	10,46	65	175	2,7	2,57	2,42	0,061	Ruim	Boa/aceitável
	6C	10,46	65	180	2,8	2,60	2,48	0,048	Boa/aceitável	Excelente
	6D	10,46	65	80	1,2	2,58	2,24	0,151	Muito ruim	Muito ruim

(*) Os ensaios 3D, 4D, 5D e 6D foram feitos com corpos de prova remoldados no laboratório.

Na tabela 5.2, tem-se que:

Prof. = profundidade média do corpo de prova,

σ'_{v0} = tensão vertical efetiva de campo estimada,

σ'_{vm} = tensão de sobreadensamento determinada no ensaio,

$OCR = \sigma'_{vm}/\sigma'_{v0}$,

e_0 = índice de vazios inicial (determinado no laboratório),

$e(\sigma'_{v0})$ = índice de vazios para σ'_{v0} determinado na curva de compressibilidade,

$\Delta e = e(\sigma'_{v0}) - e_0$.

5.4 Adensamento secundário e relaxação imperfeita

5.4.1 Curvas de velocidade de deformação específica

As figuras 5.1 a 5.4, a seguir, apresentam as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log\sigma'_v$ obtidas no acompanhamento do adensamento secundário e da relaxação imperfeita dos ensaios das amostras SRA203(1), SRA203(3), SRA203(4) e SRA203(6) respectivamente.

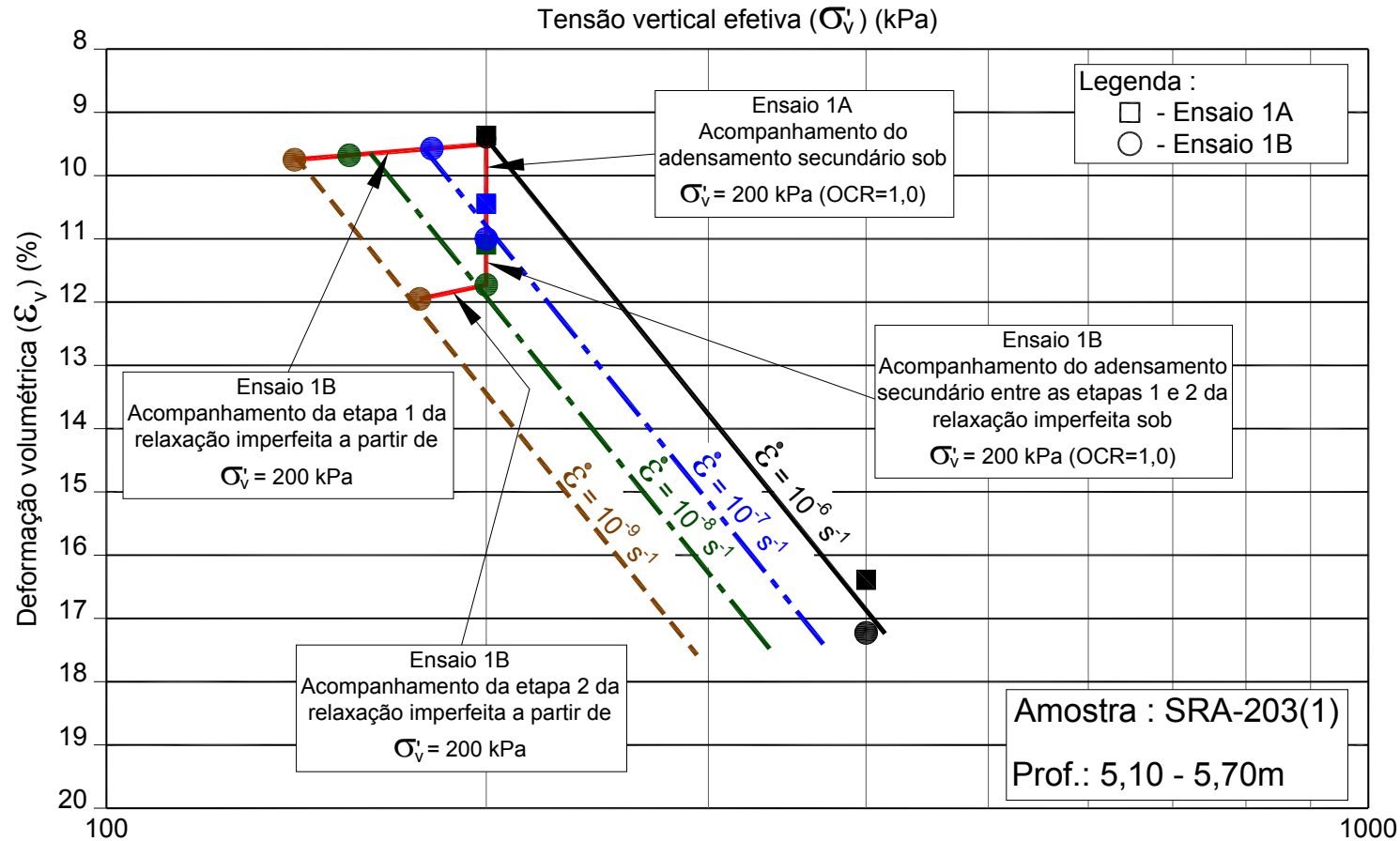
Não foram traçadas as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log\sigma'_v$ dos ensaios feitos na amostra SRA203(2) devido ao fato desta ser bastante arenosa.

Também não foram traçadas as curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log\sigma'_v$ dos ensaios feitos na amostra SRA203(5) devido ao fato dos aparelhos de ar condicionado da sala de ensaios terem parado de funcionar durante o período de acompanhamento do adensamento secundário e da relaxação imperfeita, o que provocou um aumento de temperatura da sala de 21°C para 30°C.

Nessas curvas não foram incluídos os dados dos ensaios cuja curva de compressibilidade de velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a 10^{-6} s^{-1} afasta-se do conjunto. Os ensaios cujos dados não foram incluídos nas curvas a seguir foram: ensaios 1C e 1D da amostra SRA203(1) (ver figura 4.51) e ensaio 3C para SRA203(3) (ver figura 4.55). Os símbolos indicam mesmo ensaio e as cores indicam mesma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$).

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203

Curva de compressibilidade para pontos de mesma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$)
Tensão vertical efetiva x Deformação volumétrica



150

Figura 5.1: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(1)

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203

Curva de compressibilidade para pontos de mesma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$)
Tensão vertical efetiva x Deformação volumétrica

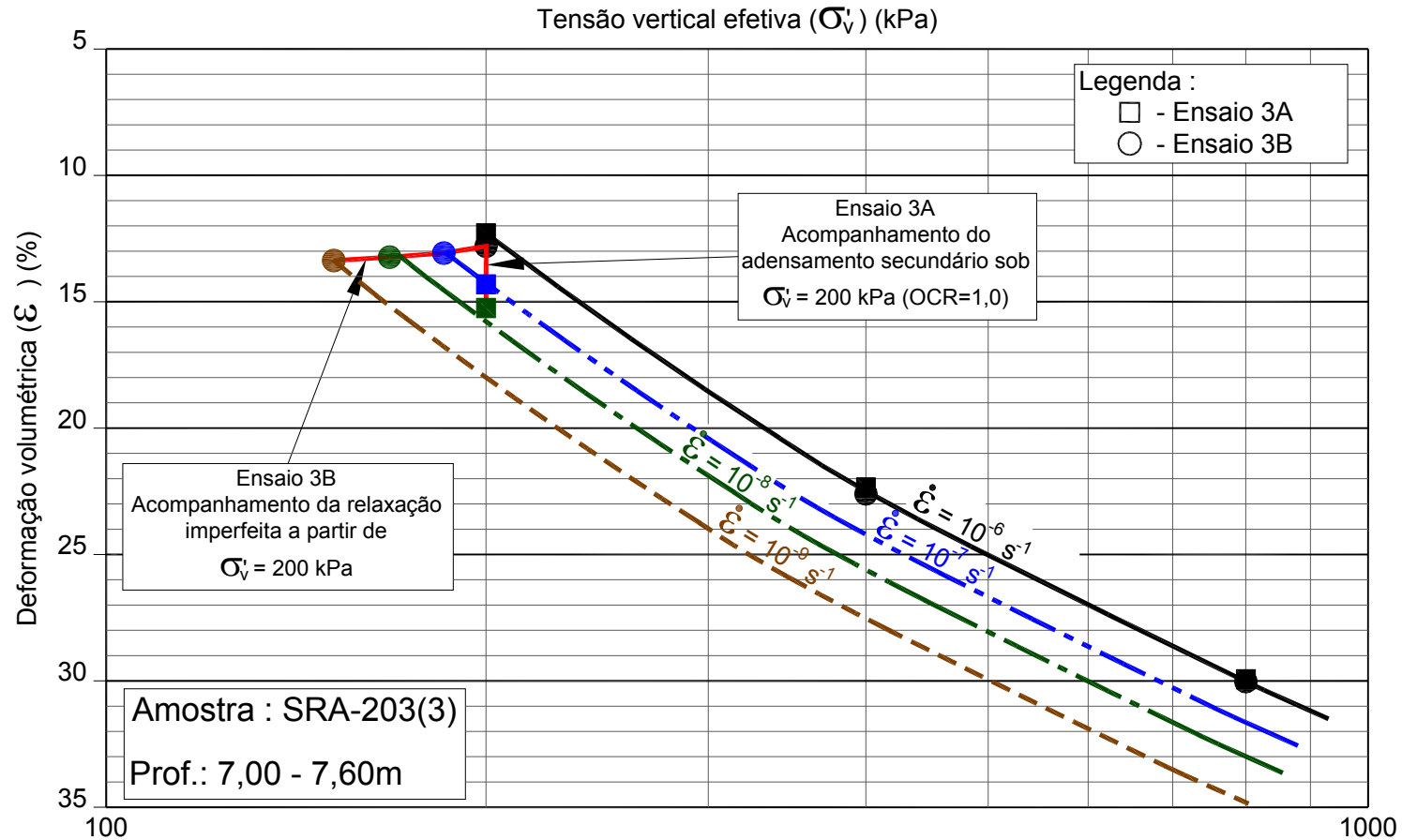


Figura 5.2: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(3)

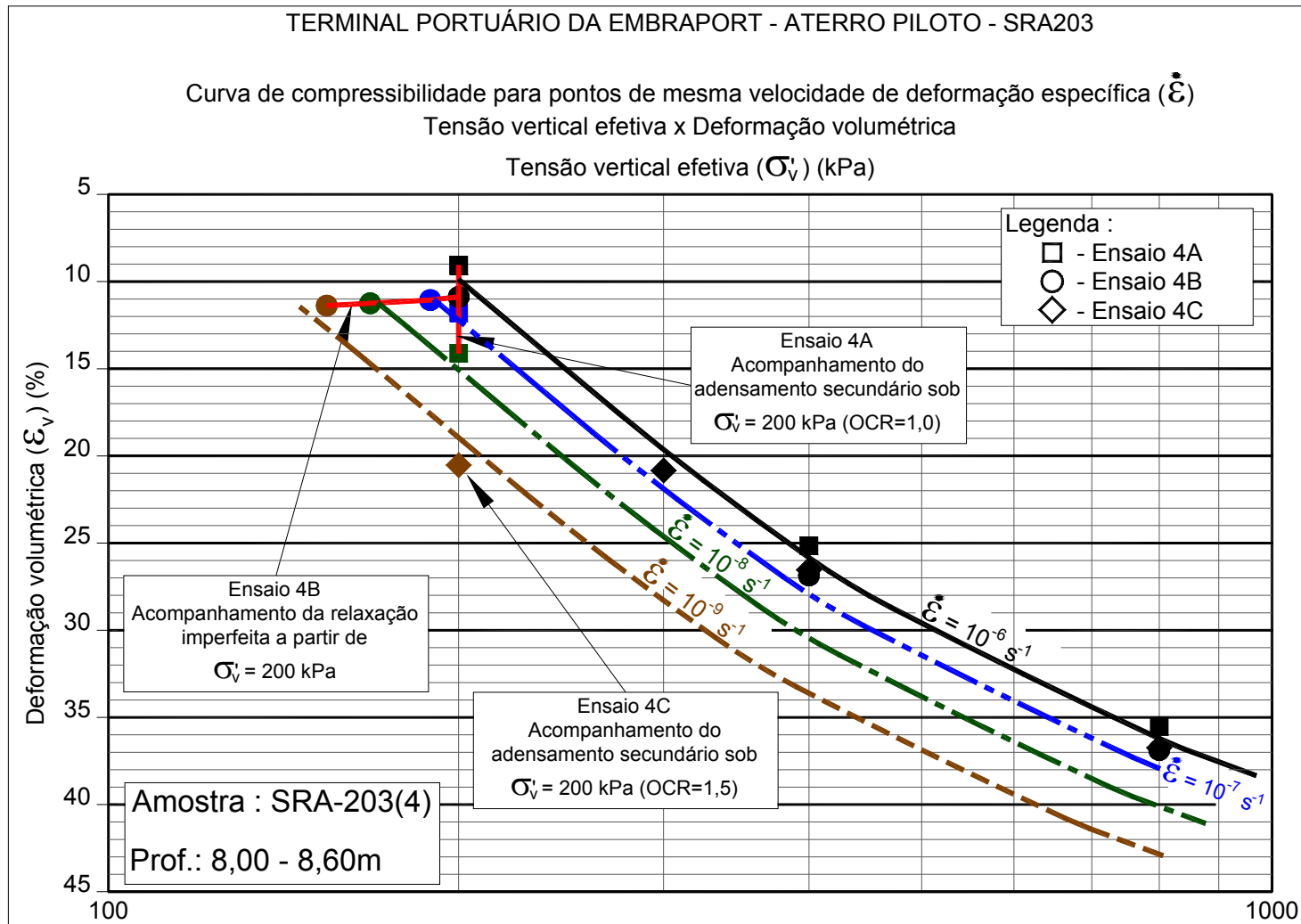


Figura 5.3: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(4)

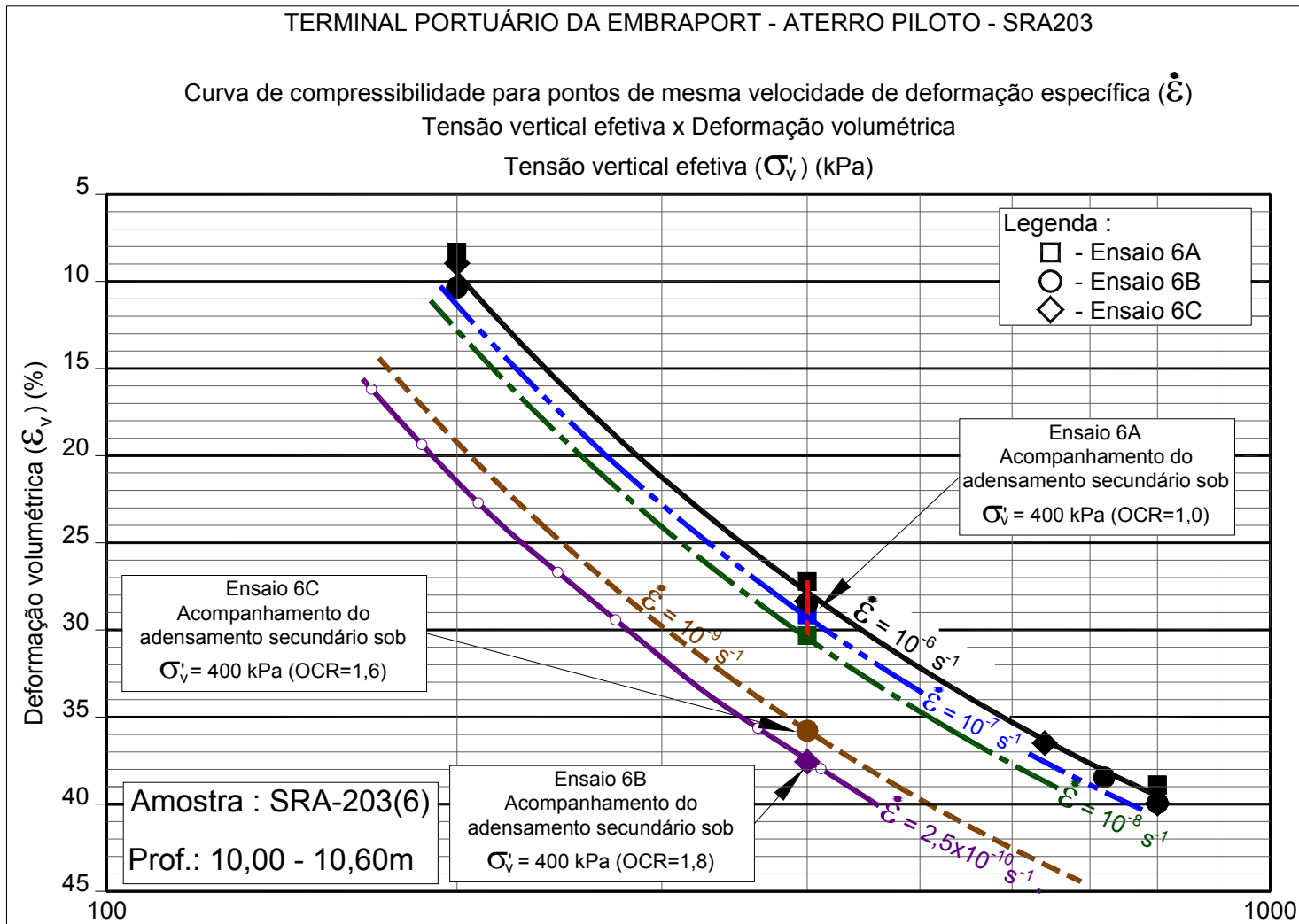


Figura 5.4: Curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) determinadas nos ensaios da amostra SRA203(6)

O adensamento secundário provoca um efeito de sobreadensamento no corpo de prova. É possível calcular a razão de sobreadensamento (OCR_a) associada ao adensamento secundário em qualquer instante t do processo. A figura 5.5, a seguir, ilustra a obtenção do valor de OCR_a .

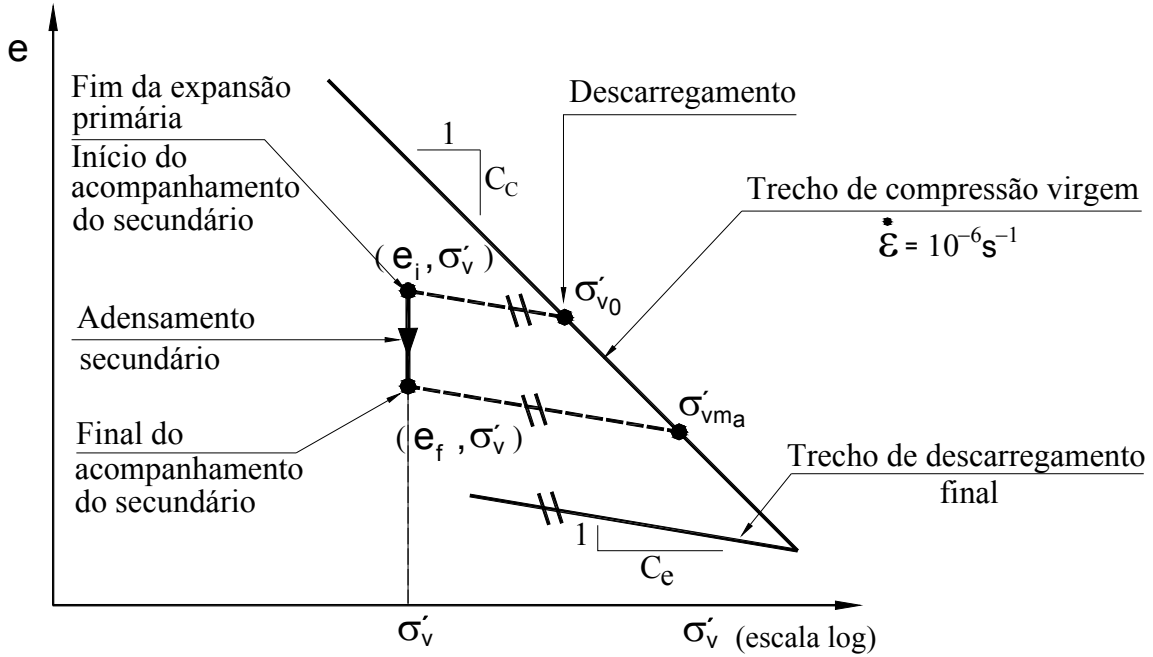


Figura 5.5: Determinação da tensão de sobreadensamento gerada pelo adensamento secundário

Através de um cálculo simples chega-se à seguinte expressão para a tensão de sobreadensamento associada ao adensamento secundário (σ'_{vma}):

$$\sigma'_{vma} = \sigma'_v OCR 10^{\left[\frac{(e_i - e_f)}{(C_c - C_e)} \right]}, \quad (5.1)$$

onde:

OCR = razão de sobreadensamento gerado pelo descarregamento.

$$OCR = \frac{\sigma'_{v0}}{\sigma'_v} \quad (5.2)$$

σ'_{v0} = tensão vertical efetiva antes do descarregamento;

σ'_v = tensão vertical efetiva ao fim da expansão primária provocada pelo descarregamento;

e_i = índice de vazios ao fim da expansão primária provocado pelo descarregamento.

e_f = índice de vazios ao fim do acompanhamento do adensamento secundário que ocorre após a expansão primária.

O OCRa associado ao adensamento secundário é:

$$OCRa = \frac{\sigma'_{vm_a}}{\sigma'_v} \quad (5.3)$$

A tabela 5.3, a seguir, mostra os valores da tensão de sobreadensamento e de OCR_a associados ao adensamento secundário na ocasião da interrupção do ensaio de todos os ensaios de adensamento secundário (ensaio tipo 1 e 2).

A tabela 5.3 também mostra os valores de velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) de entrada na compressão secundária após expansão primária provocado pelo descarregamento dos ensaios em que foi gerado um OCR maior que 1 (ensaio tipo 2) e a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no final do acompanhamento de todos os ensaios de adensamento secundário (ensaio tipo 1 e 2).

Tabela 5.3: Resumo dos ensaios de adensamento secundário

Amostra	Ensaio / Corpo de prova	OCR no início do acompanha- mento do secundário	Tempo de acompanha- mento (dias)	Tensão vertical efetiva durante o acompanha- mento σ'_v (kPa)	Velocidade de deformação específica no início do acompanhamento (s^{-1})	Índice de vazios no início do acompanha- mento e_i	Índice de vazios no final do acompanha- mento e_f	Índice de compressão C_c	Índice de expansão C_e	Tensão de sobreadensamento associada ao secundário no final do acompanhamento σ'_{vma} (kPa)	Razão de sobreadensamento associada ao secundário no final do acompanhamento OCRa (kPa)	Velocidade de deformação específica no final do acompanhamento (s^{-1})
SRA203(1)	1A	1,00	42	200	$1,0 \times 10^{-6}$	1,080	1,020	0,48	0,02	270	1,35	$1,6 \times 10^{-9}$
	1C	1,25		200	$1,8 \times 10^{-8}$	1,050	1,030	0,51	0,02	275	1,37	$1,9 \times 10^{-9}$
	1D	1,50		200	$9,5 \times 10^{-9}$	1,039	1,030	0,57	0,02	312	1,56	$1,0 \times 10^{-9}$
SRA203(2)	3A	1,00	17	200	$1,0 \times 10^{-6}$	1,236	1,150	0,80	0,06	261	1,31	$4,7 \times 10^{-9}$
	3C	1,25		200	$1,3 \times 10^{-8}$	1,214	1,204	0,66	0,05	260	1,30	$1,8 \times 10^{-9}$
SRA203(4)	4A	1,00	19	200	$1,0 \times 10^{-6}$	1,942	1,770	1,91	0,15	250	1,25	$6,9 \times 10^{-9}$
	4C	1,50		200	$3,2 \times 10^{-9}$	1,525	1,520	1,73	0,15	302	1,51	$8,4 \times 10^{-10}$
SRA203(5)	5A	1,00	47	200	$1,0 \times 10^{-6}$	1,692	1,499	1,56	0,10	271	1,36	$1,0 \times 10^{-9}$
	5C	1,50		200	$3,4 \times 10^{-9}$	1,523	1,510	1,42	0,11	307	1,53	$4,4 \times 10^{-10}$
SRA203(6)	6A	1,00	42	400	$1,0 \times 10^{-6}$	1,571	1,431	2,22	0,16	468	1,17	$2,4 \times 10^{-9}$
	6B	1,80		400	$5,7 \times 10^{-10}$	1,228	1,227	2,18	0,14	721	1,80	$2,5 \times 10^{-10}$
	6C	1,60		400	$1,8 \times 10^{-9}$	1,311	1,308	2,37	0,17	642	1,61	$4,0 \times 10^{-10}$

Em todos os ensaios de acompanhamento do secundário com OCR maior que 1 (ensaios tipo 2), o corpo de prova entrou na compressão secundária após a expansão primária gerada pelo descarregamento. Isto significa que em todos esses ensaios, após a expansão primária, o corpo de prova situava-se na zona de compressão secundária identificada por Feijó (1991).

Observa-se que quanto maior o valor do OCR gerado no descarregamento menor é a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) de entrada na compressão secundária que ocorre após a expansão primária. Ou seja, quanto mais próximo o corpo de prova está da zona de equilíbrio indiferente após a expansão primária destacado por Martins et al (1997), menor é a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) de entrada na compressão secundária. À medida que o corpo de prova aproxima-se da zona de equilíbrio indiferente, a velocidade de deformação específica diminui tendendo à zero.

Observa-se que no ensaio 6B, no qual foi gerado um OCR igual à 1,8, o corpo de prova entrou na compressão secundária com uma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual a $5,7 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Neste ensaio foi alcançada uma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no final do acompanhamento do adensamento secundário igual a $2,5 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Essa foi a menor velocidade atingida para todos os ensaios realizados, incluindo os de relaxação imperfeita.

Segundo o modelo do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ, a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) é uma propriedade que depende das coordenadas do ponto no plano ϵ - $\log \sigma'_v$. Para um mesmo solo, os lugares geométricos dos pontos de mesma velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) sugerem ser curvas de mesmo valor de OCR.

Assim como o adensamento secundário, a relaxação imperfeita gera um efeito de sobreadensamento no corpo de prova. Para cada um dos ensaios de relaxação imperfeita executados foi calculado o OCRr gerado no corpo de prova no final do acompanhamento.

A figura 5.6, a seguir, ilustra o cálculo do OCRr associado à relaxação imperfeita.

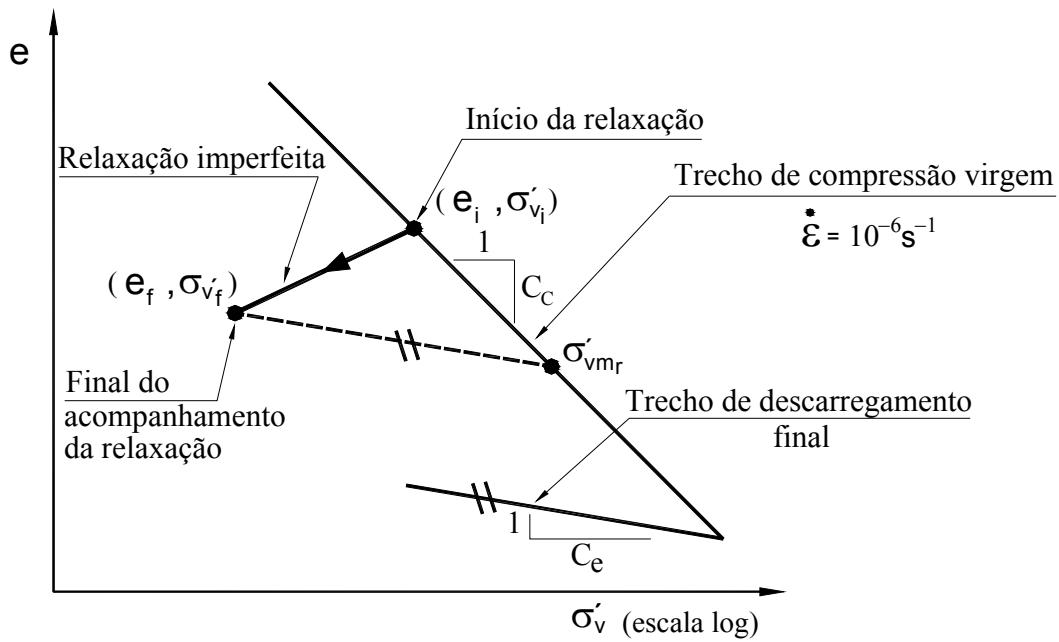


Figura 5.6: Determinação da tensão de sobreadensamento gerada pela relaxação imperfeita

Através de um cálculo simples chega-se à seguinte expressão para a tensão de sobreadensamento associada à relaxação imperfeita (σ'_{vmr}):

$$\sigma'_{vmr} = 10^{\left[\frac{(e_i - e_f) + (C_c \log \sigma'_{vi} - C_e \log \sigma'_{vf})}{(C_c - C_e)} \right]} \quad (5.4)$$

onde:

σ'_{vi} = tensão vertical efetiva no início da relaxação imperfeita;

σ'_{vf} = tensão vertical efetiva no final do acompanhamento da relaxação imperfeita;

e_i = índice de vazios no início da relaxação imperfeita;

e_f = índice de vazios no final do acompanhamento da relaxação imperfeita;

O OCRr associado à relaxação imperfeita no final do acompanhamento é:

$$OCRr = \frac{\sigma'_{vmr}}{\sigma'_{vf}} \quad (5.5)$$

A tabela 5.4, a seguir mostra as características da relaxação imperfeita no final do acompanhamento.

Tabela 5.4: Resumo dos ensaios de relaxação imperfeita

Amostra	Ensaio/ Corpo de prova	Tempo de acompanha- mento (dias)	Tensão vertical efetiva no início da relaxação σ'_{vi} (kPa)	Tensão vertical efetiva no final do acompanha- mento σ'_{vf} (kPa)	$\sigma'_{vi} / \sigma'_{vf}$	Índice de vazios no início da relaxação e_i	Índice de vazios no final do acompanha- mento e_f	Índice de compressão C_c	Índice de expansão C_e	Tensão de sobreadensamento associada a relaxação no final do acompanhamento σ'_{vmr} (kPa)	Razão de sobreadensamento associada a relaxação no final do acompanhamento OCRr (kPa)	Velocidade de deformação específica no final do acompanhamento (s^{-1})
SRA203(1)	1B - etapa 1	17	200	135	1,48	1,13	1,12	0,46	0,02	215	1,59	$7,4 \times 10^{-10}$
	1B - etapa 2	20	200	169	1,18	1,08	1,07	0,46	0,02	276	1,63	$6,1 \times 10^{-10}$
SRA203(2)	3B	17	200	150	1,33	1,35	1,33	0,86	0,06	214	1,43	$7,7 \times 10^{-10}$
SRA203(3)	4B	19	200	150	1,33	1,90	1,89	1,73	0,15	211	1,40	$5,9 \times 10^{-10}$
SRA203(4)	5B	47	300	202	1,49	1,44	1,41	1,53	0,11	323	1,60	$2,9 \times 10^{-10}$

O valor de σ'_{vmr} gerado na etapa 2 da relaxação 1B não foi calculado com a fórmula acima porque o ponto de partida da relaxação não pertence à curva de compressão virgem de velocidade 10^{-6}s^{-1} . Todavia, o cálculo utilizado é similar ao apresentado para o cálculo dos valores de σ'_{vmr} das demais relaxações, as quais partem da curva de velocidade 10^{-6}s^{-1} .

5.4.2 Quantificação da tensão vertical efetiva viscosa

Segundo o modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ, a tensão vertical efetiva (σ'_v) corresponde à soma de duas parcelas, uma sólido-sólido (σ'_{vs}), a qual é função exclusiva do índice de vazios (e), e outra viscosa (σ'_{vv}), a qual é função do índice de vazios (e) e da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$).

$$\sigma'_v = \sigma'_{vs} + \sigma'_{vv}, \quad (5.6)$$

sendo que:

$$\sigma'_{vs} = f(e) \quad (5.7)$$

$$\sigma'_{vv} = f(e, \dot{\epsilon}) \quad (5.8)$$

A medida que o adensamento secundário desenvolve-se ocorre diminuição do índice de vazios (e) e da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$). A diminuição do índice de vazios está associada ao ganho de tensão vertical efetiva sólido-sólido (σ'_{vs}), enquanto que a diminuição da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) está associada à transferência de tensão vertical efetiva viscosa (σ'_{vv}) para a tensão vertical efetiva sólido-sólido (σ'_{vs}).

O fim do adensamento secundário ocorre quando toda a parcela de tensão vertical efetiva viscosa (σ'_{vv}) tiver sido transferida para a tensão vertical efetiva sólido-sólido (σ'_{vs}).

Desta forma é possível fazer a seguinte analogia entre o adensamento secundário e o adensamento primário: Enquanto o adensamento primário corresponde à transferência do excesso de poropressão (u) para a tensão vertical efetiva (σ'_v), o adensamento secundário corresponde à transferência de parcela de tensão vertical efetiva viscosa (σ'_{vv}) para a tensão vertical efetiva sólido-sólido (σ'_{vs}).

A figura 5.7, a seguir, ilustra a parcela de tensão vertical efetiva sólido-sólido (σ'_{vs}) e a parcela de tensão vertical efetiva viscosa (σ'_{vv}) em três diferentes instantes t do adensamento secundário em um ensaio de adensamento edométrico convencional. O ponto A corresponde ao instante em que a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) é igual a 10^{-6} s^{-1} , o ponto B corresponde a um instante qualquer durante o processo e o ponto C corresponde ao final do adensamento secundário ($\dot{\epsilon} = 0$).

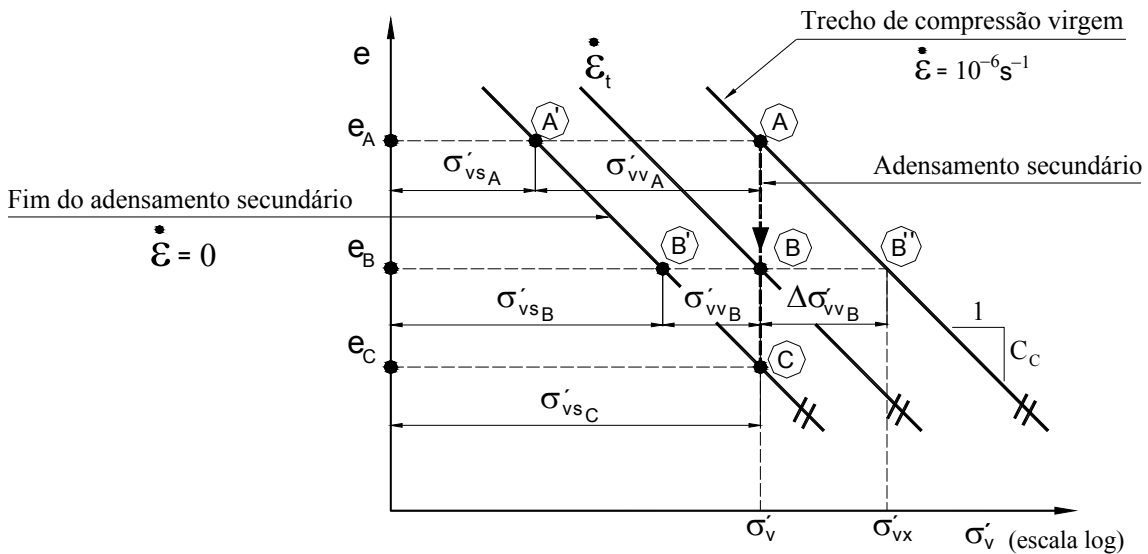


Figura 5.7: Adensamento secundário no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

No ensaio de adensamento edométrico convencional pode-se considerar que após a deformação correspondente ao “fim” do adensamento primário, dado pelas construções de Taylor ou de Casagrande, o adensamento secundário ocorre sob tensão vertical efetiva constante. Assim sendo, tem-se para tempos maiores que o “fim” do primário:

$$\sigma'_v = \sigma'_{vs} + \sigma'_{vv} \Rightarrow \frac{d\sigma'_v}{dt} = \frac{d\sigma'_{vs}}{dt} + \frac{d\sigma'_{vv}}{dt} \quad (5.9)$$

$$\frac{d\sigma'_v}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\sigma'_{vs}}{dt} = -\frac{d\sigma'_{vv}}{dt} \quad (5.10)$$

Ou seja, após o “fim” do adensamento primário, em qualquer instante t (ponto B da figura 5.7), a diminuição da tensão vertical efetiva viscosa ($\Delta\sigma'_{vv}$) é igual ao aumento de tensão vertical efetiva sólido-sólido ($\Delta\sigma'_{vs}$).

A tensão vertical efetiva viscosa transferida do ponto A ao ponto B ($\Delta\sigma'_{vvB}$) na figura 5.7 é:

$$\Delta\sigma'_{vvB} = \sigma'_{vx} - \sigma'_v \quad (5.11)$$

Como:

$$C_c = \frac{e_A - e_B}{\log \sigma'_{vx} - \log \sigma'_v} \quad (5.12)$$

então:

$$\sigma'_{vx} = \sigma'_v 10^{\frac{e_A - e_B}{C_c}} \quad (5.13)$$

Assim sendo, tem-se que:

$$\Delta\sigma'_{vvB} = \sigma'_v \left(10^{\frac{e_A - e_B}{C_c}} - 1 \right) \quad (5.14)$$

Desta forma, foram traçadas curvas de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo (t) e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ durante o adensamento secundário para os ensaios submetidos ao OCR=1 (ensaios tipo 1) das amostras SRA203(1), SRA203(3), SRA203(4) e SRA203(6). A origem dessas curvas é o ponto no qual o corpo de prova atinge a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual 10^{-6}s^{-1} .

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo

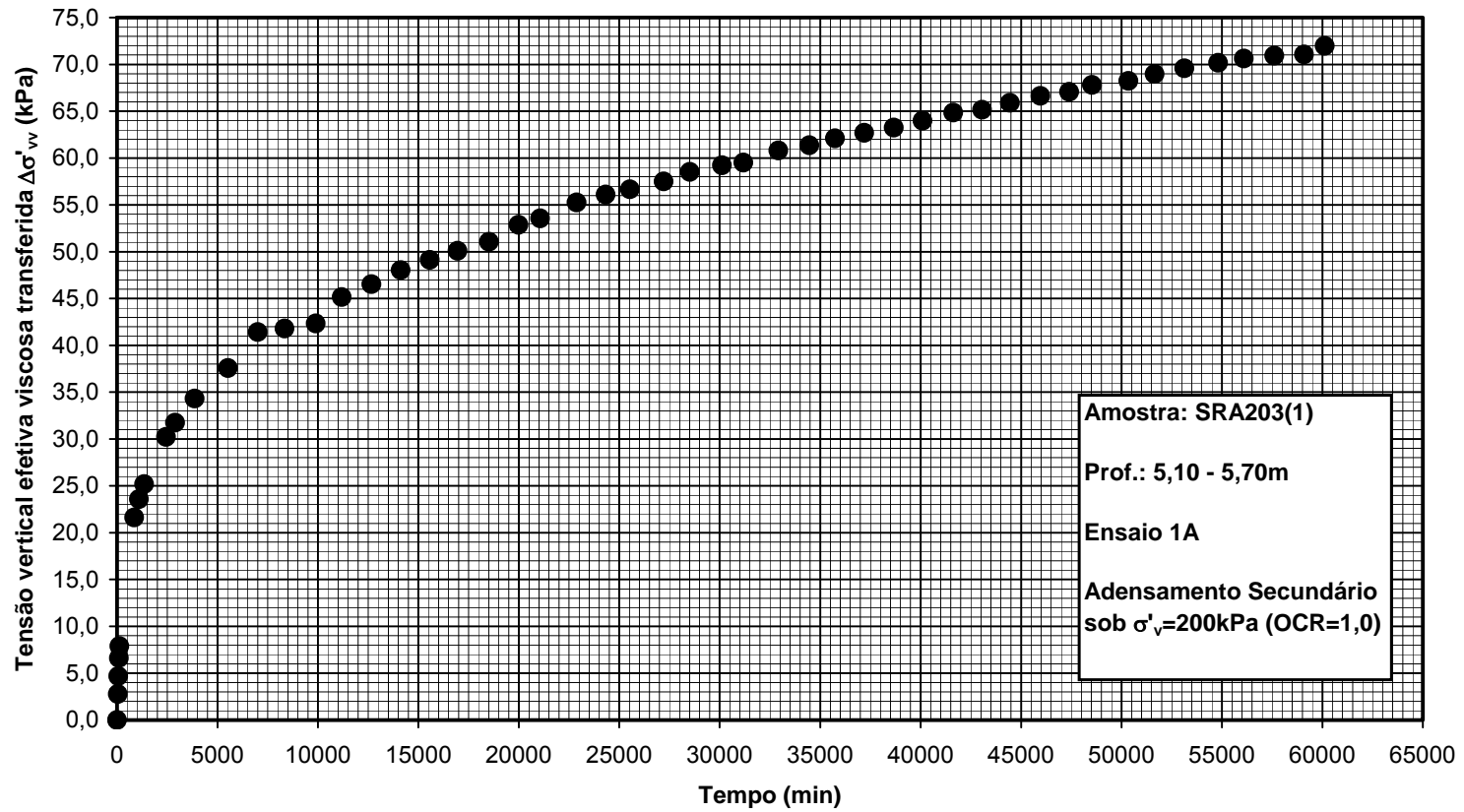


Figura 5.8: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR =1,0 da amostra SRA203(1) – Ensaio 1A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

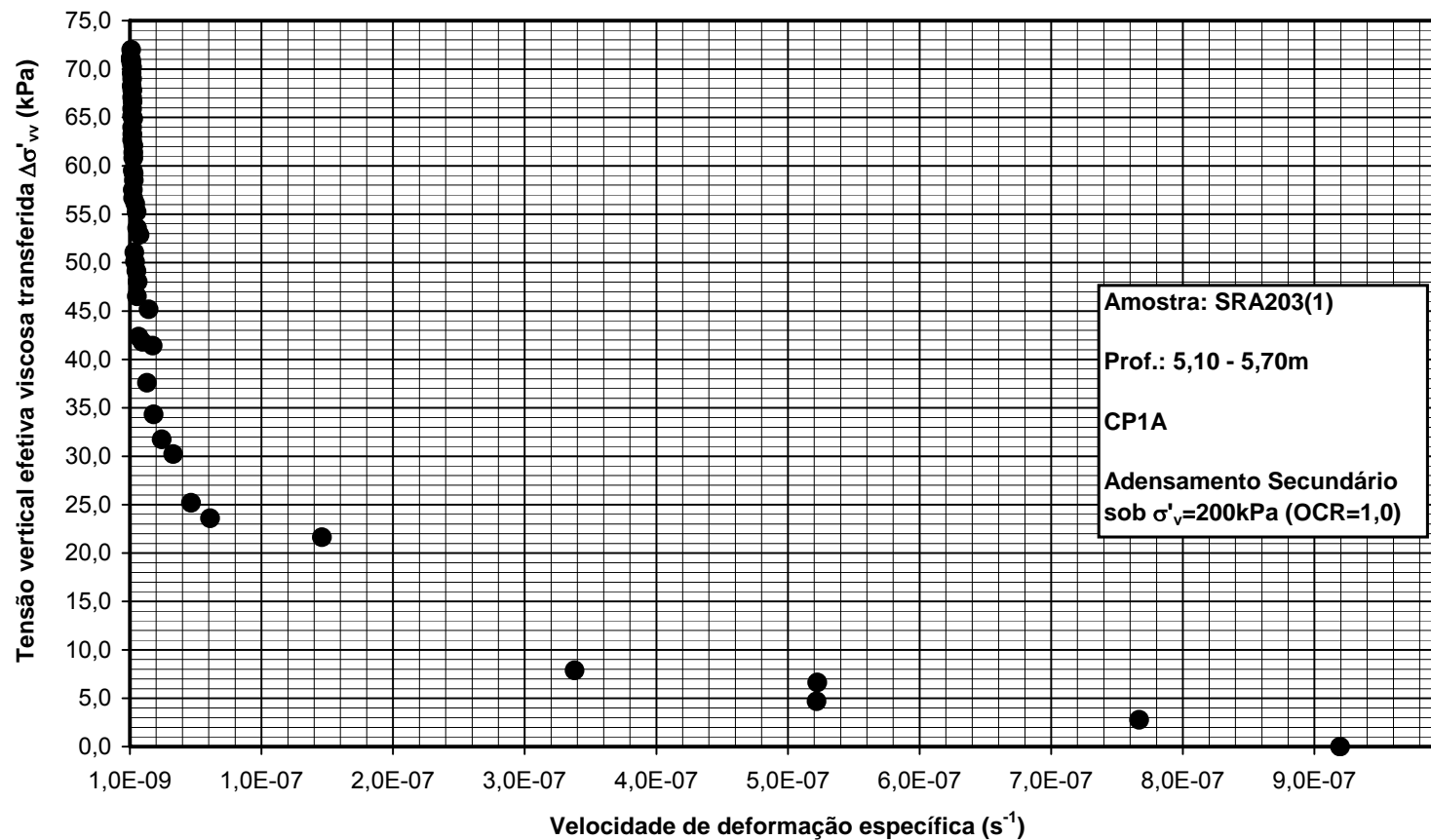


Figura 5.9: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR=1,0 da amostra SRA203(1) – Ensaio 1A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203

Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo

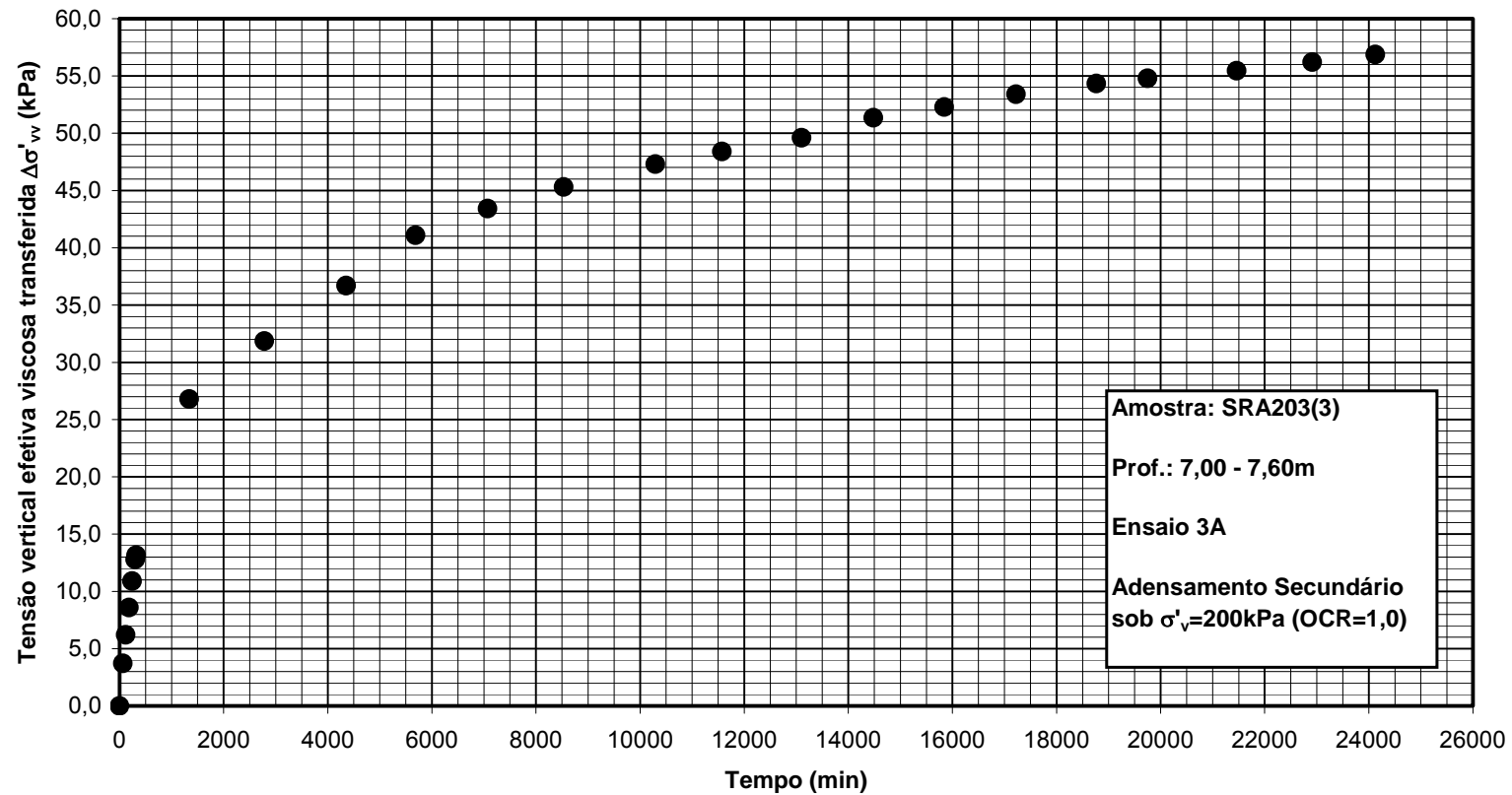


Figura 5.10: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR=1,0 da amostra SRA203(3) – Ensaio 3A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203

Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

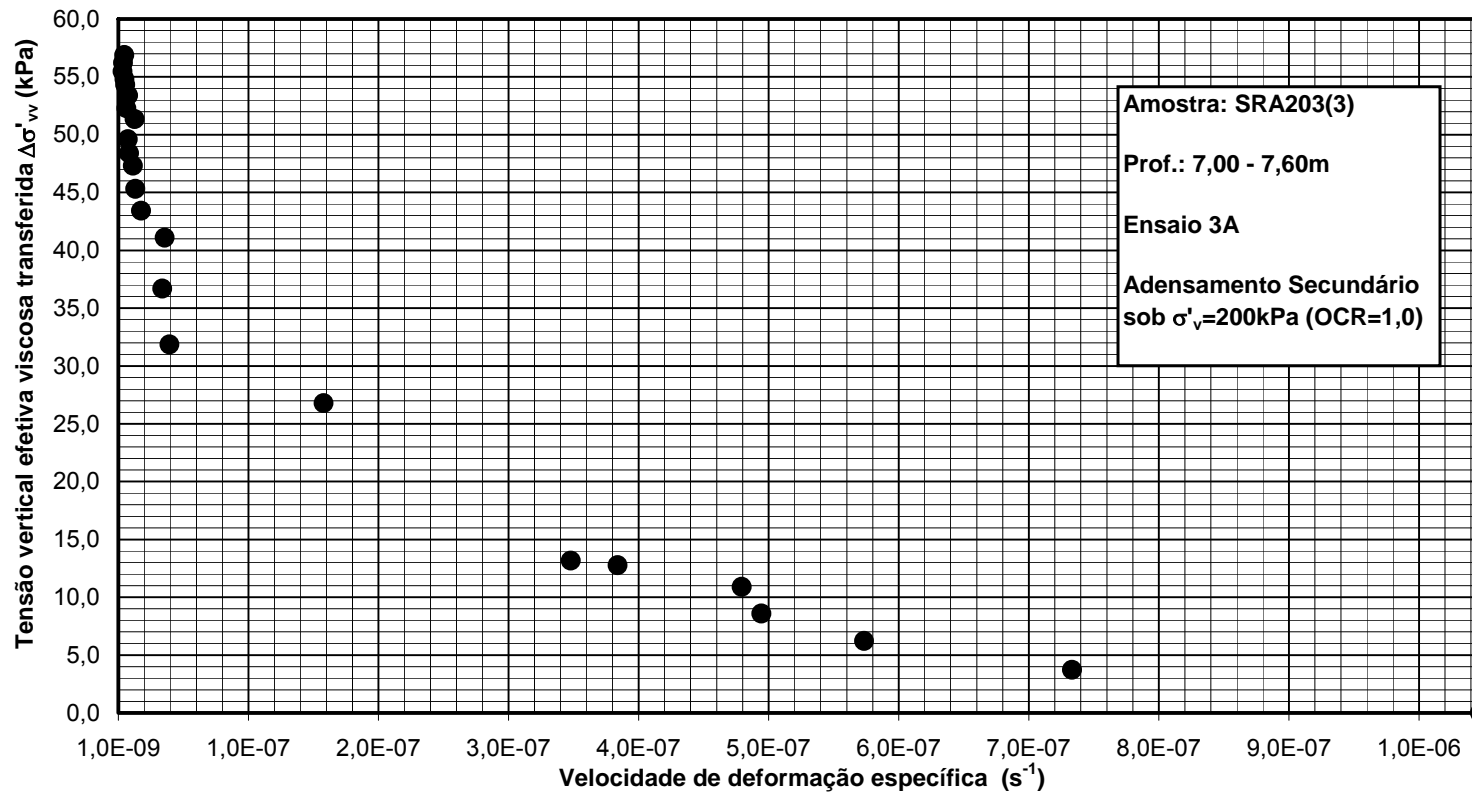


Figura 5.11: Curva de $\Delta\sigma'_{vv} \times \dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(3) – Ensaio 3A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Tempo (min)

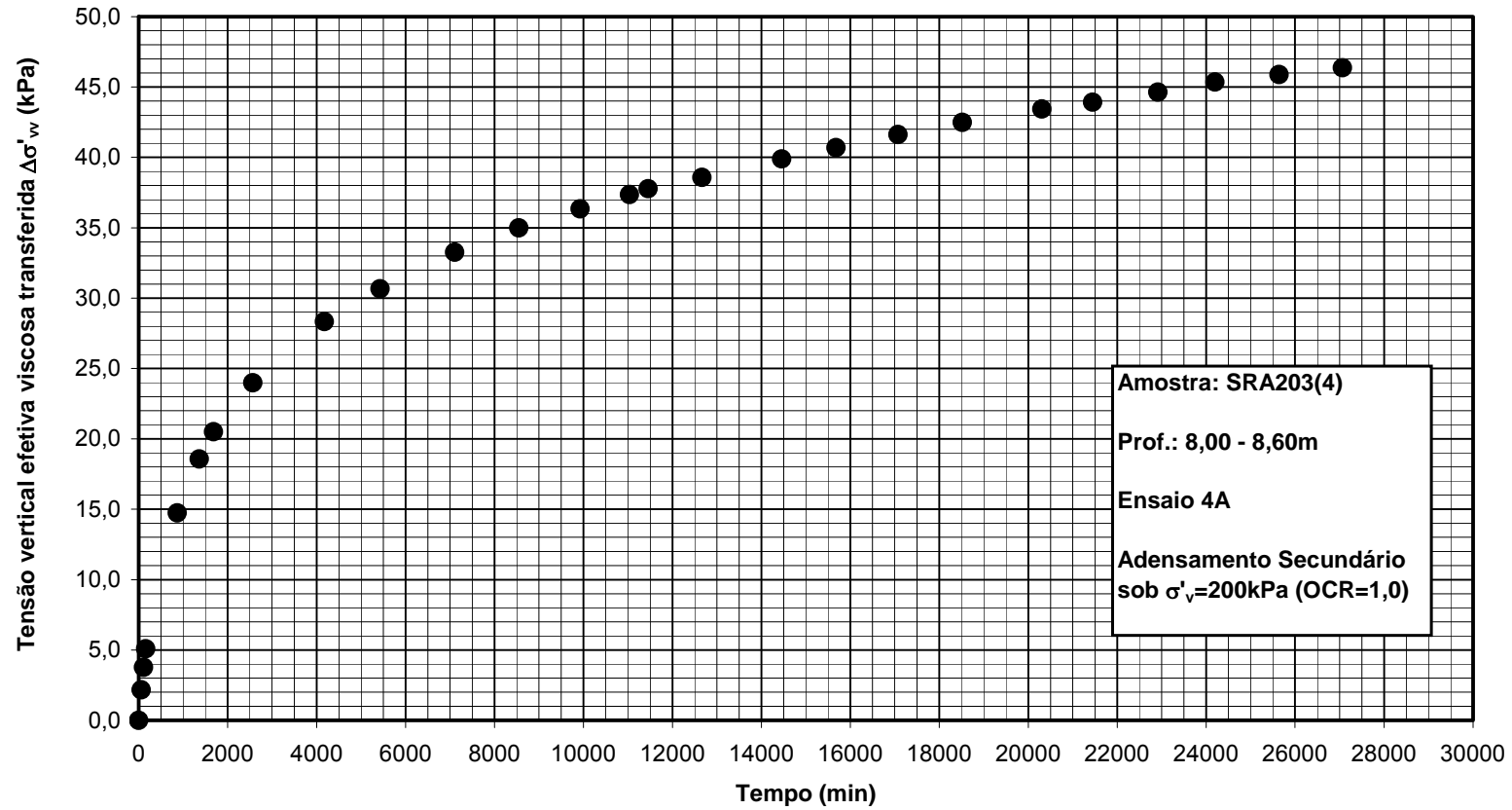


Figura 5.12: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob $\text{OCR} = 1,0$ da amostra SRA203(4) – Ensaio 4A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

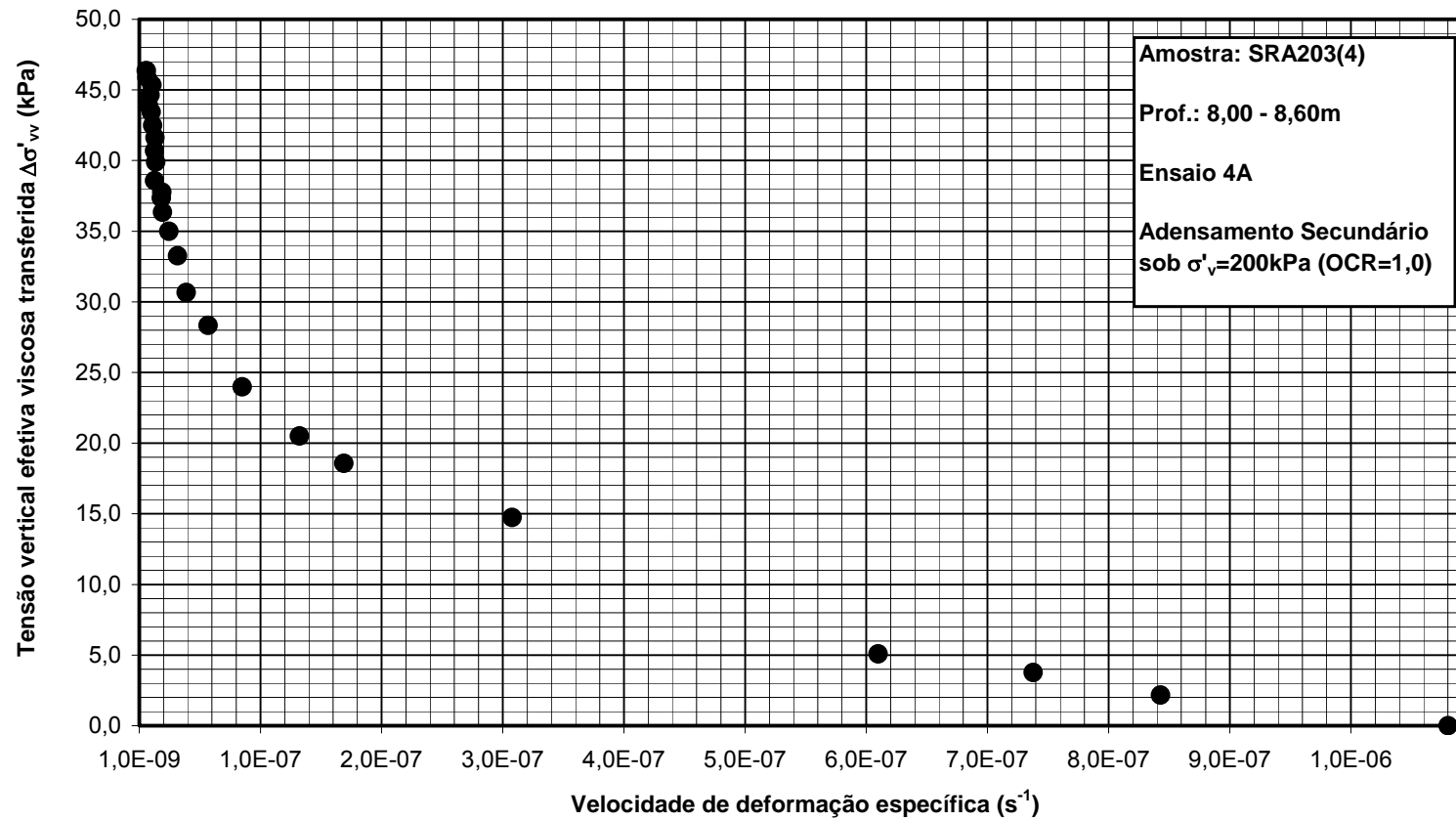


Figura 5.13: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(4) – Ensaio 4A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Tempo

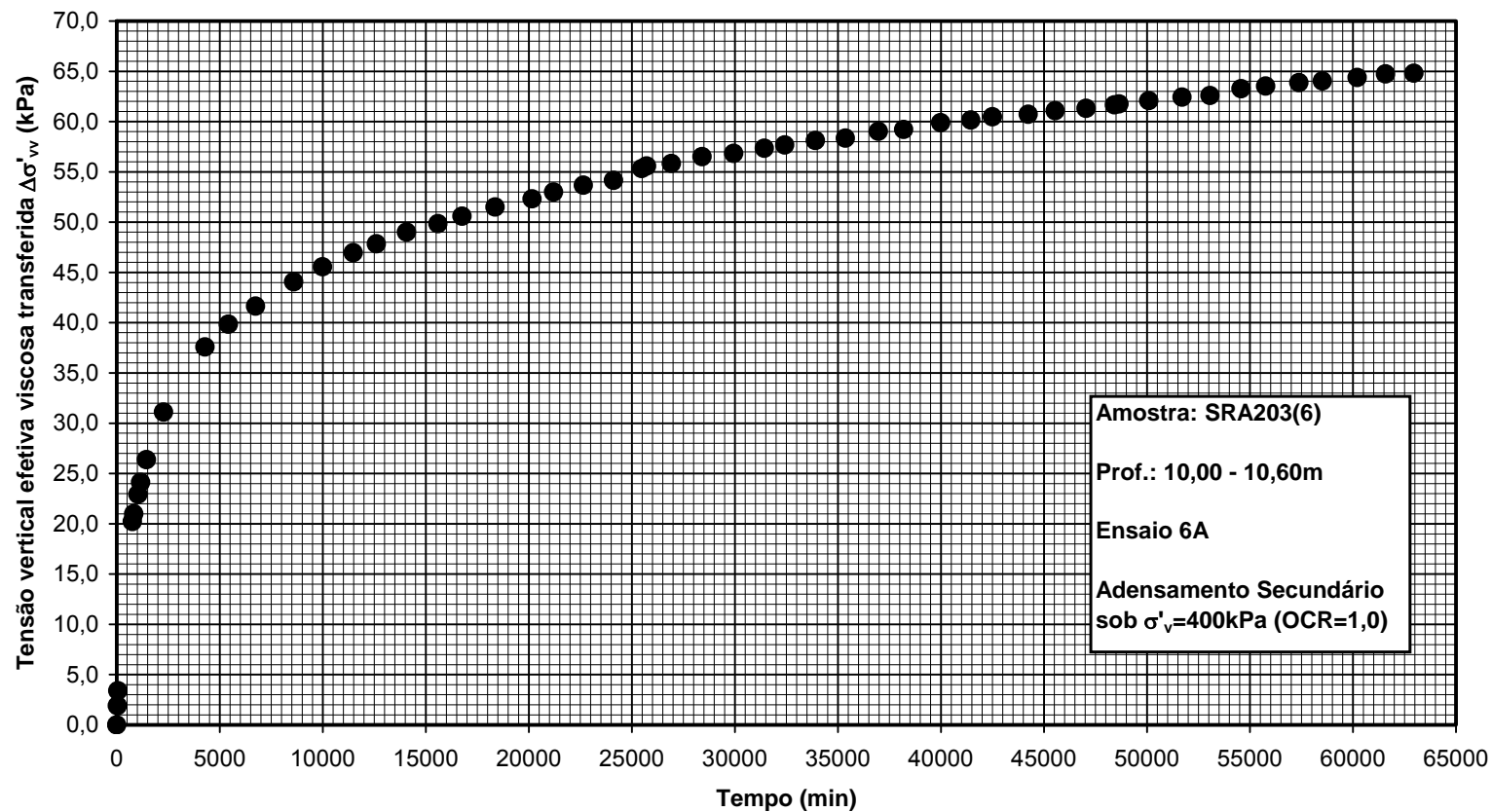


Figura 5.14: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(6) – Ensaio 6A

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

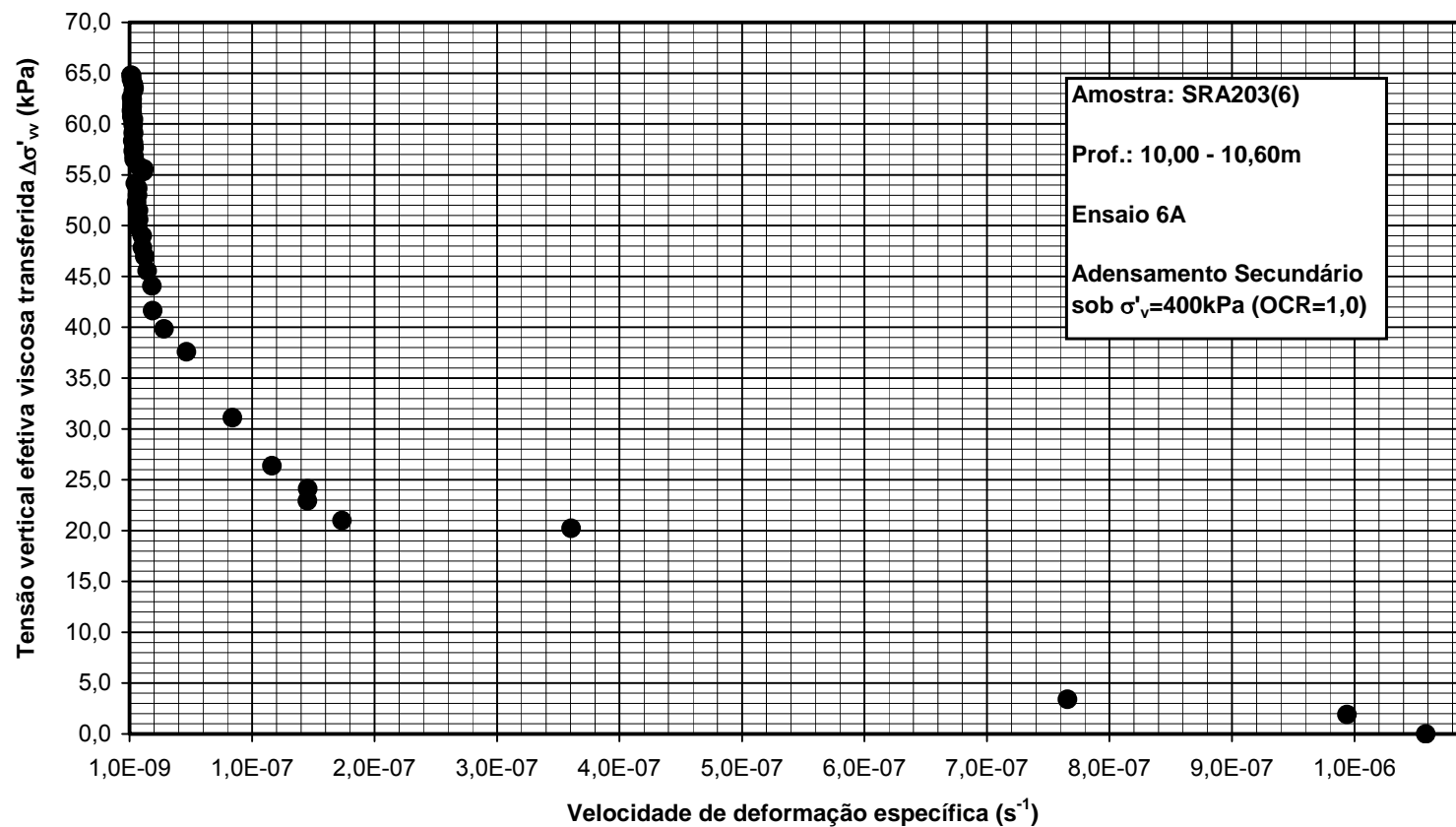


Figura 5.15: Curva de $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ do adensamento secundário sob OCR = 1,0 da amostra SRA203(6) – Ensaio 6A

No caso da relaxação perfeita no ensaio de adensamento edométrico, o caminho seguido pelo corpo de prova no plano $e \times \log \sigma'_v$ seria horizontal marchando em direção à linha de fim de compressão secundária ($\dot{\epsilon} = 0$), conforme ilustra a figura 5.16, a seguir.

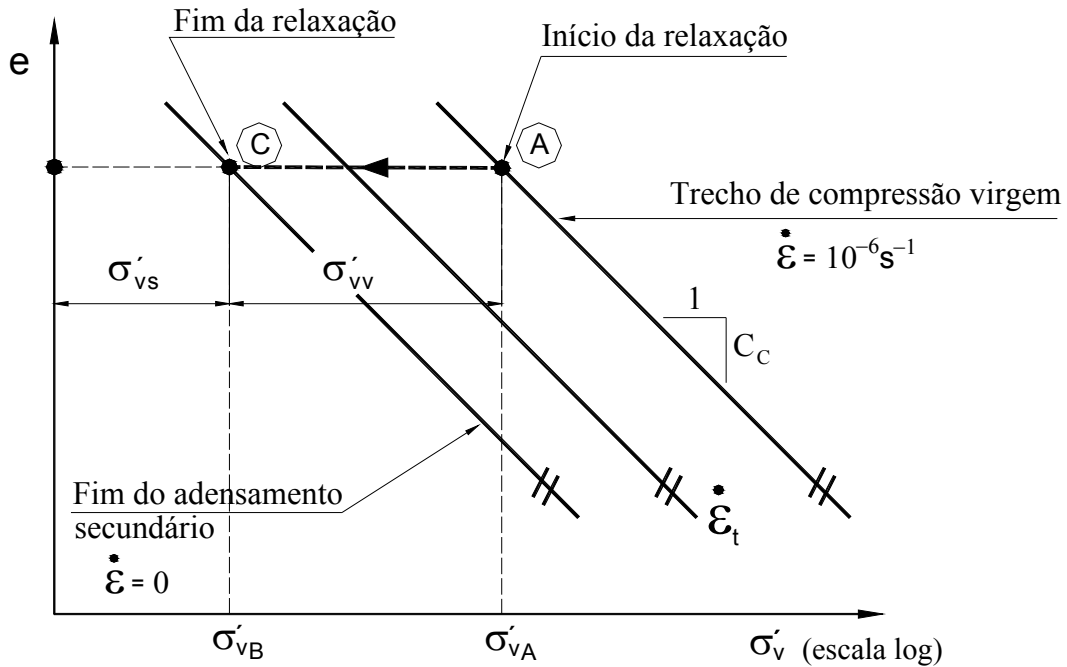


Figura 5.16: Relaxação perfeita no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

Segundo o modelo do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ, durante a relaxação perfeita ocorre perda de parcela viscosa da tensão vertical efetiva com diminuição da velocidade de relaxação. No fim da relaxação, tem-se o esgotamento total da parcela viscosa (σ'_{vv}) e a tensão vertical efetiva (σ'_v) é composta apenas pela parcela sólido-sólido (σ'_{vs}). Durante a relaxação perfeita não ocorre variação da parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva porque não ocorre variação do índice de vazios.

Já na relaxação imperfeita o caminho seguido pelo corpo de prova em direção à linha de fim de compressão secundária ($\dot{\epsilon} = 0$) é inclinado, pois é permitido que o corpo de prova sofra deformação.

A figura 5.17, a seguir, ilustra a relaxação imperfeita à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ.

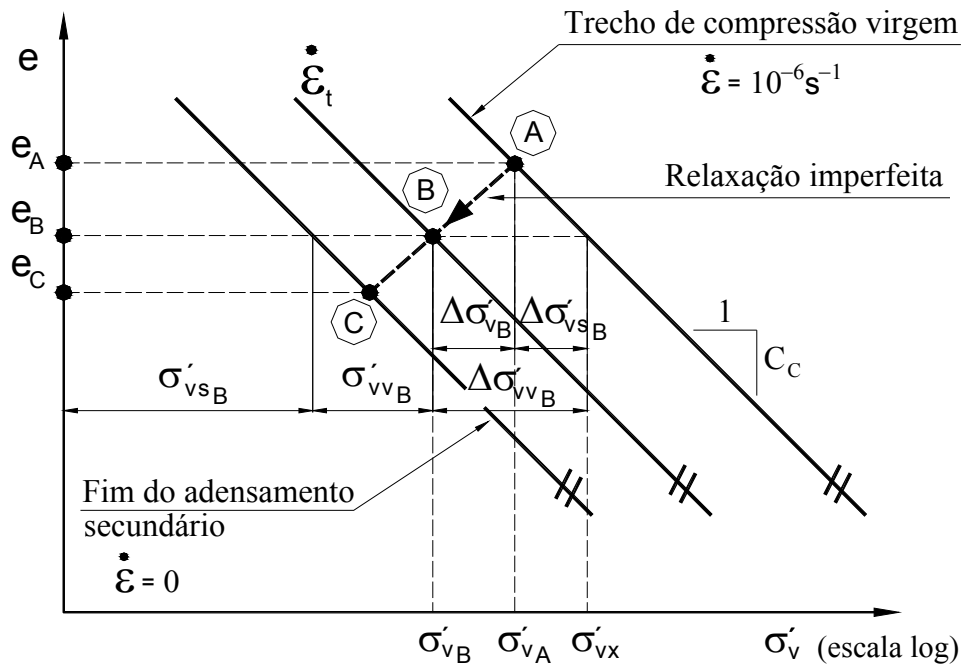


Figura 5.17: Relaxação Imperfeita no ensaio de adensamento edométrico convencional à luz do modelo reológico do Grupo de Reologia da COPPE/UFRJ

Durante a relaxação imperfeita, ocorre variação do índice de vazios e , portanto, ocorre variação positiva (aumento) de tensão vertical efetiva sólido-sólido. Mas o fato é que ocorre variação negativa (diminuição) de tensão vertical efetiva durante a relaxação. Assim sendo, o módulo da variação tensão vertical efetiva viscosa ($\Delta\sigma'_{vv}$) é igual ao módulo da variação de tensão vertical efetiva ($\Delta\sigma'_v$) mais a variação de tensão vertical efetiva sólido-sólido ($\Delta\sigma'_{vs}$). Ou seja, na relaxação imperfeita ocorre tanto relaxação quanto adensamento secundário.

Assim sendo, entre os pontos A e B da figura 5.17 tem-se que:

$$|\Delta\sigma'_{vvB}| = |\Delta\sigma'_{vB}| + |\Delta\sigma'_{vsB}| \quad (5.15)$$

$$|\Delta\sigma'_{vvB}| = (\sigma'_{vA} - \sigma'_{vB}) + \sigma'_{vA} \left(10^{\frac{\Delta e}{C_c}} - 1 \right) \quad (5.16)$$

Desta forma, foram traçadas curvas de $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo (t) e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ durante relaxação imperfeita (ensaios tipo 3) das amostras SRA203(1) (etapa 1 da relaxação), SRA203(3), SRA203(4). A origem dessas curvas é o ponto no qual o corpo de prova atinge a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) igual 10^{-6}s^{-1} .

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo

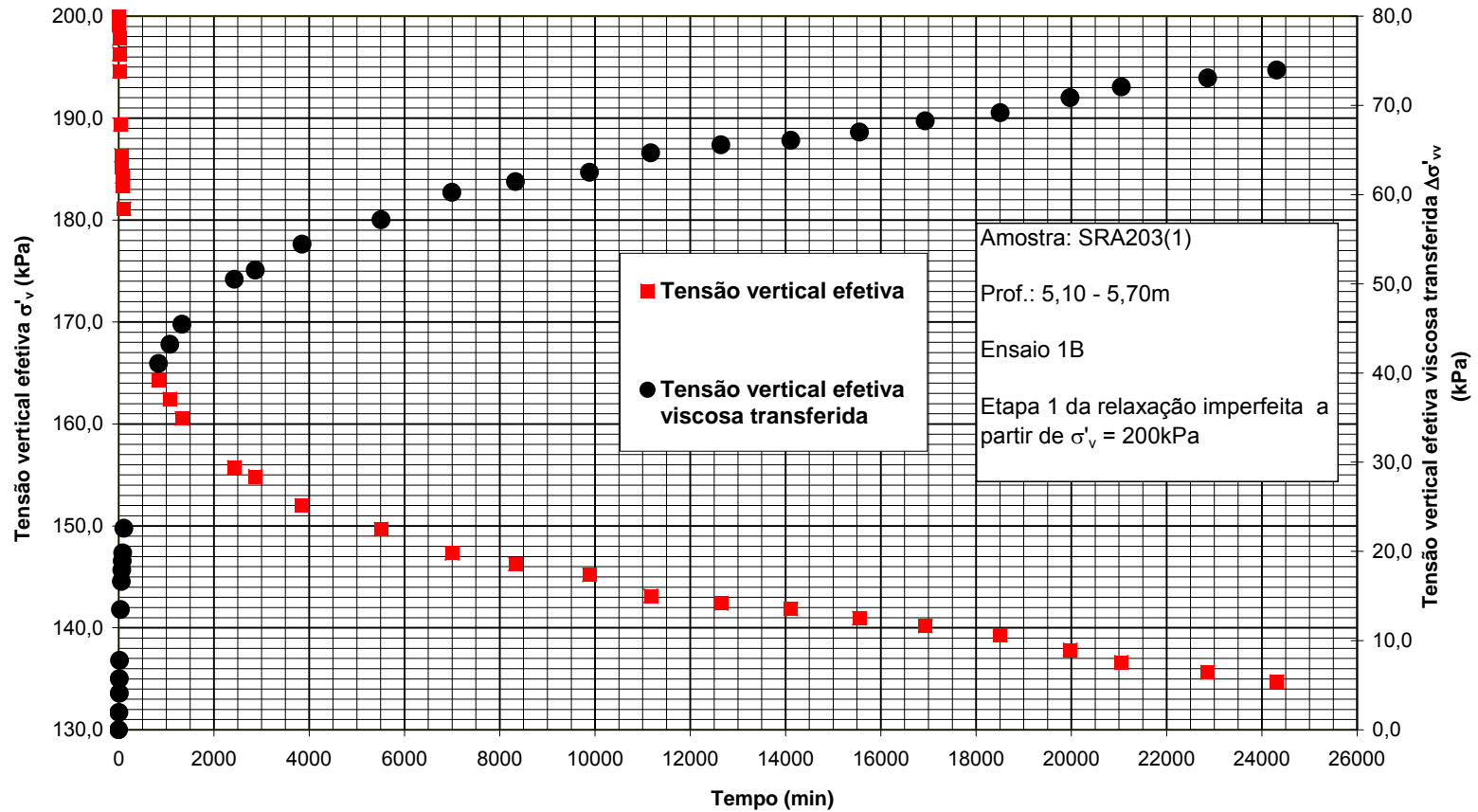


Figura 5.18: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da etapa 1 da relaxação imperfeita da amostra SRA203(1) – Ensaio 1B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

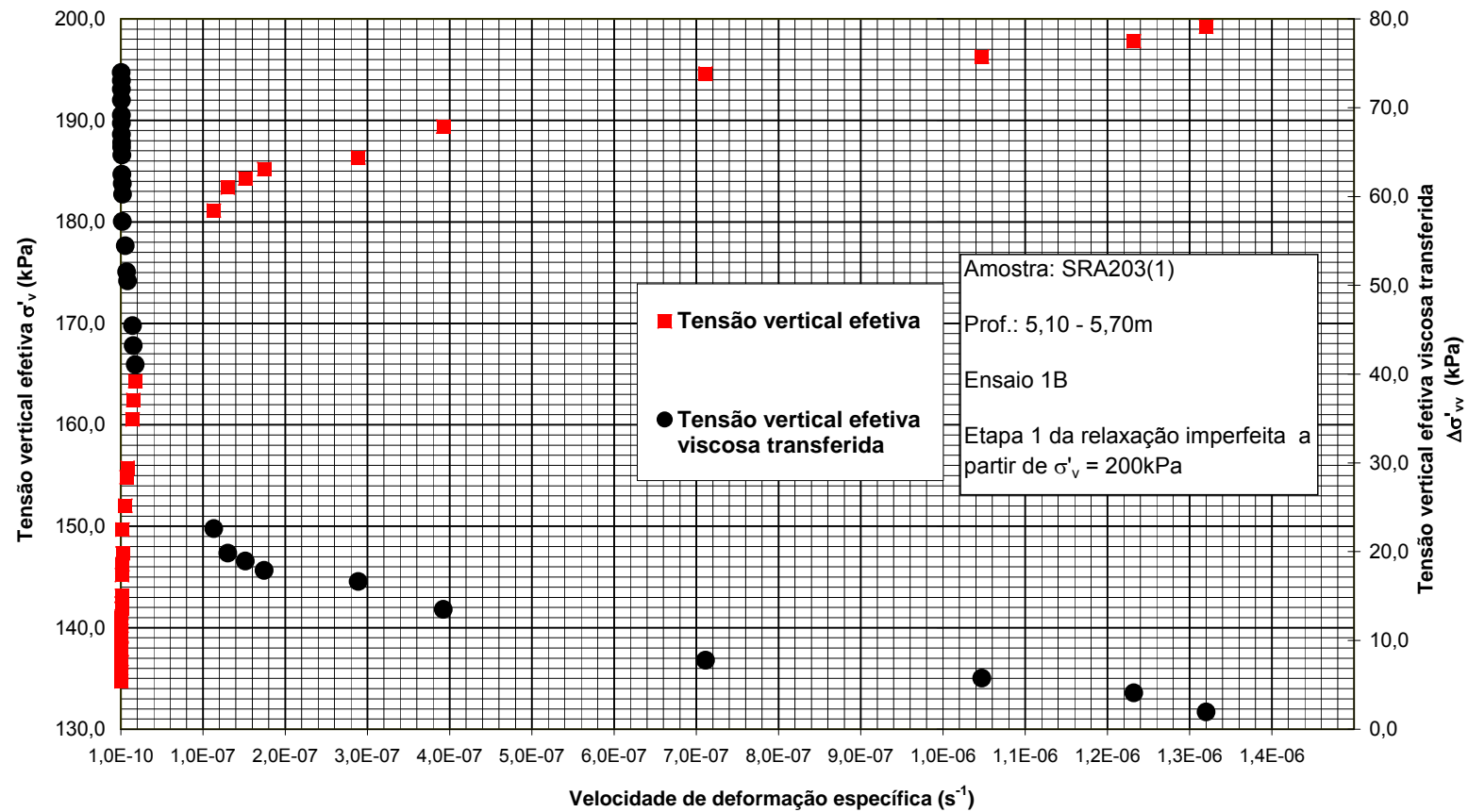


Figura 5.19: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(1) – Ensaio 1B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo

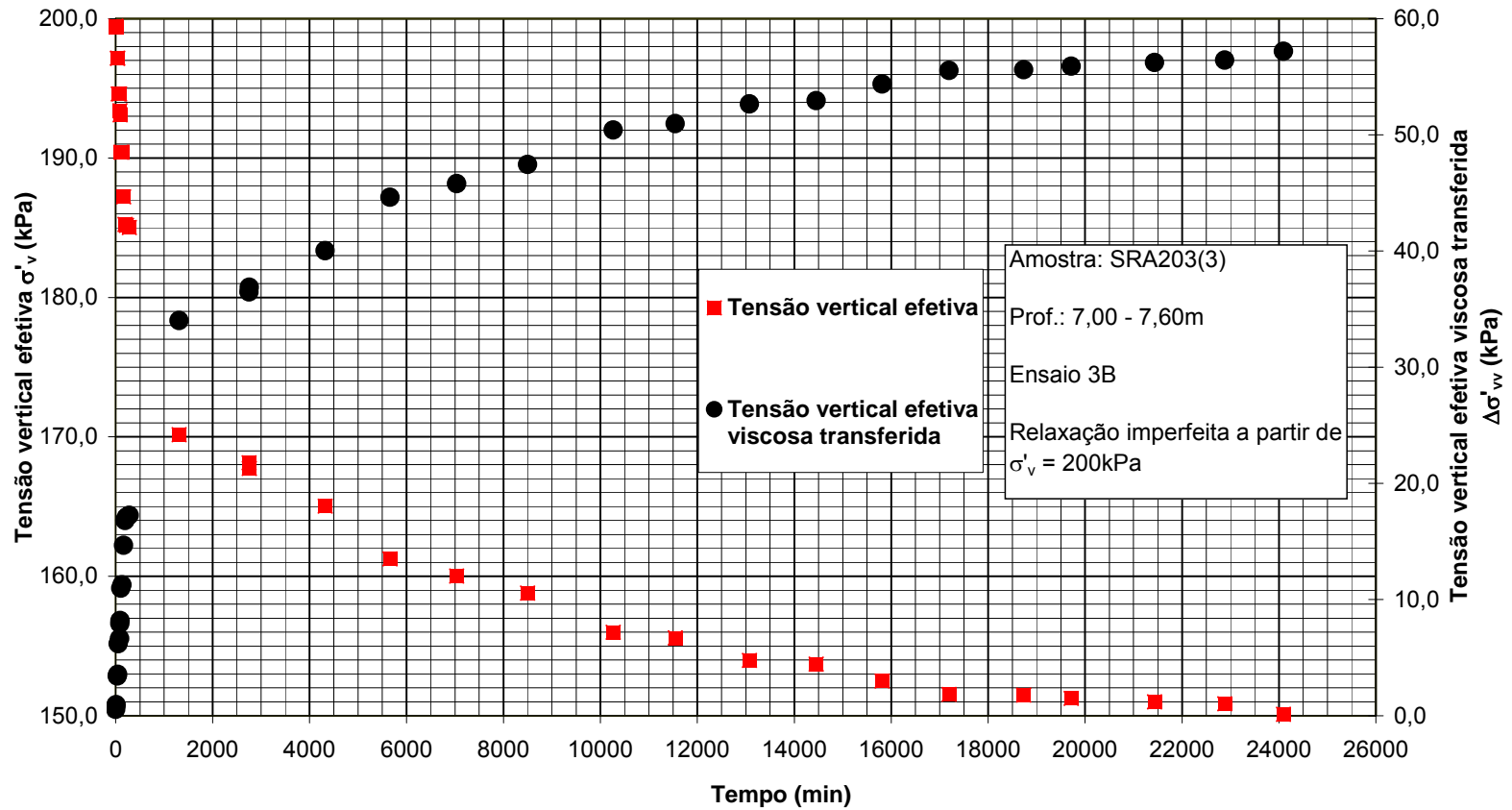


Figura 5.20 Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da relaxação imperfeita da amostra SRA203(3) – Ensaio 3B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x Velocidade de deformação específica

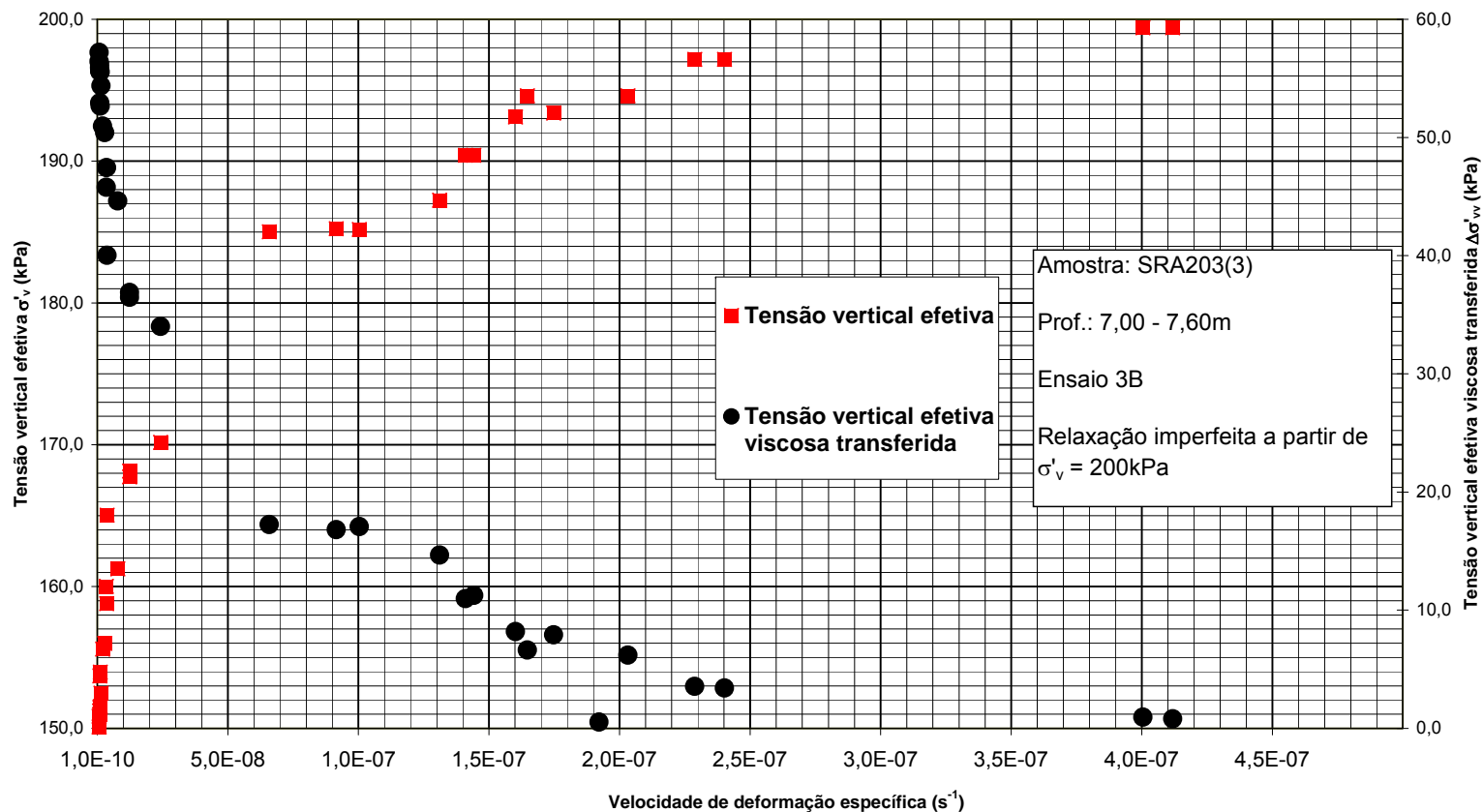


Figura 5.21: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x $\dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(3) – Ensaio 3B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo

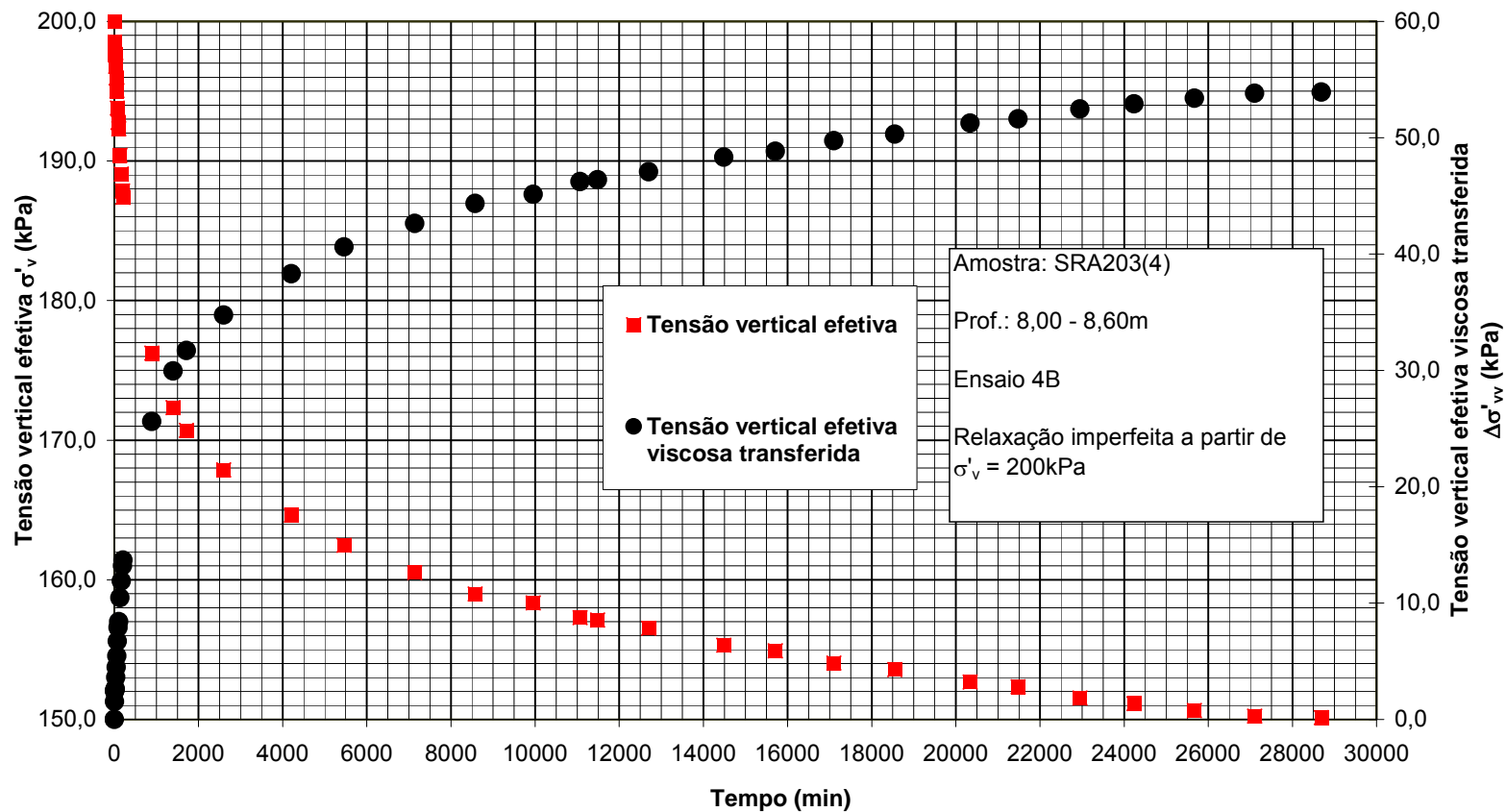


Figura 5.22 Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv}$ x tempo da relaxação imperfeita da amostra SRA203(4) – Ensaio 4B

TERMINAL PORTUÁRIO DA EMBRAPORT - ATERRO PILOTO - SRA203
Ensaio de adensamento edométrico

Tensão vertical efetiva σ'_v e Tensão vertical efetiva viscosa transferida $\Delta\sigma'_{vv} \times$ Velocidade de deformação específica

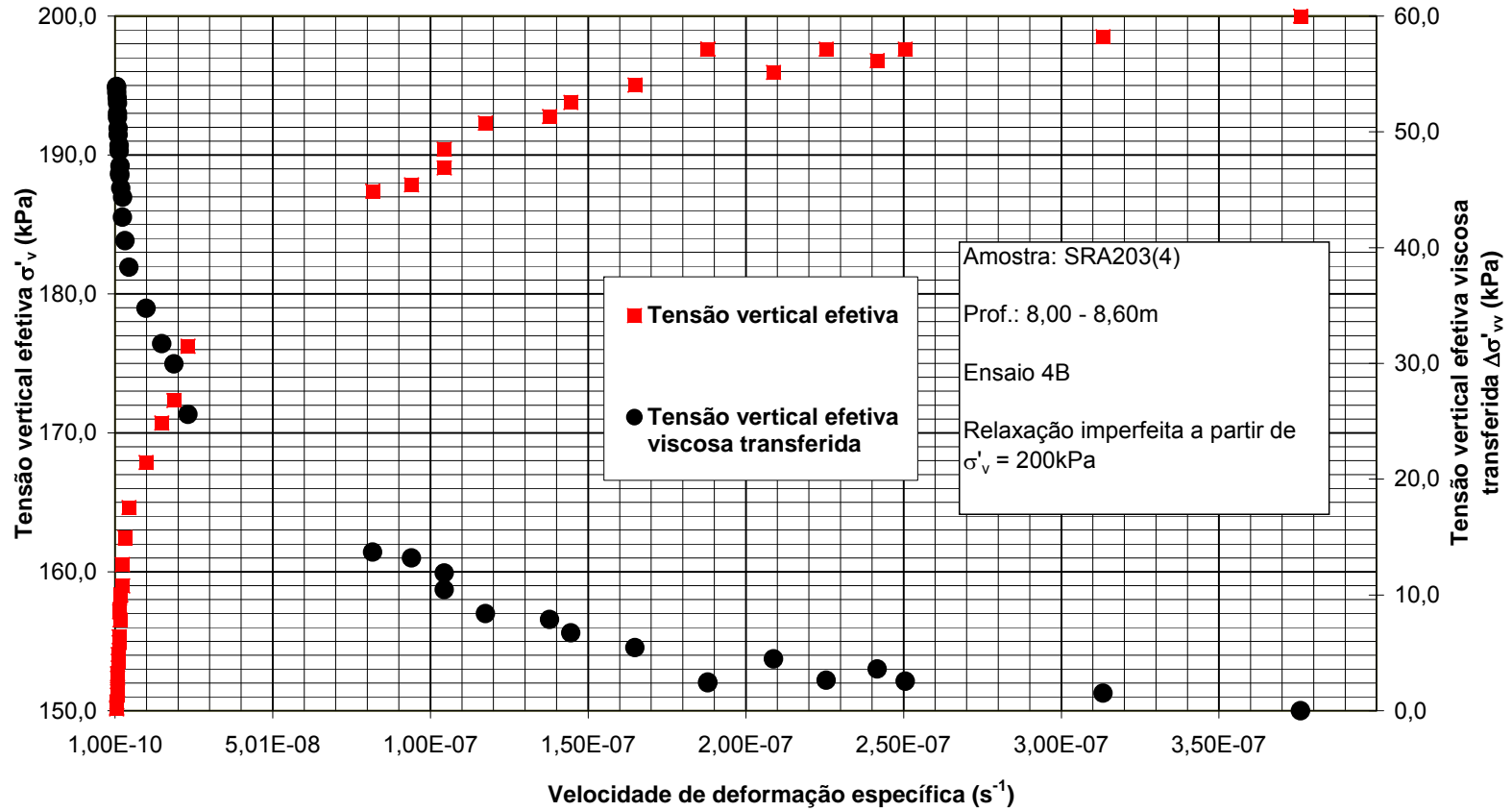


Figura 5.23: Curva de σ'_v e $\Delta\sigma'_{vv} \times \dot{\epsilon}$ da relaxação imperfeita da amostra SRA203(4) – Ensaio 4B

5.5 Efeito da temperatura

Durante o acompanhamento do adensamento secundário e da relaxação imperfeita dos ensaios executados na amostra SRA203(5) os aparelhos de ar condicionado da sala de ensaios pararam de funcionar. Em função disso, a temperatura da sala de ensaios subiu de 21°C para 27° C em 24 horas, atingindo a temperatura máxima de 30°C.

Foi observado que o aumento de temperatura acelerou o adensamento secundário e a relaxação imperfeita (ver figuras 4.78, 4.79, 4.80 e 4.81). Posteriormente, quando os aparelhos de ar condicionado voltaram a funcionar, a temperatura retornou aos 21 °C, observando-se uma notável queda na velocidade de deformação. Embora o estudo da influência da temperatura no adensamento secundário não esteja dentro do escopo desta dissertação, não se pode deixar de mencionar que tal comportamento é de inteiramente de acordo com o mecanismo viscoso que dá suporte ao modelo do Grupo de Reologia da COPPE. No caso em questão, o aumento da temperatura provoca queda no valor do coeficiente de viscosidade com conseqüente aumento de velocidade de deformação.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

6.1 Conclusões

1. À luz das abordagens de Taylor e Merchant (1940), Terzaghi (1941), Taylor (1942), Bjerrum (1973), Lerroueil (1985) e do Grupo de Reologia de Solos da COPPE, o critério de carregamento do ensaio de adensamento edométrico convencional baseado na velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) é mais coerente do que carregar ao final de 24 horas de duração do estágio e ao “fim” do adensamento primário.
2. O critério de carregar o ensaio de adensamento edométrico quando a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) atinge o valor de 10^{-6}s^{-1} permite realizar em 2 dias um ensaio completo até a tensão vertical de 800kPa com estágios de carga $\Delta\sigma/\sigma = 1$.
3. A exigência do cumprimento da norma ABNT NBR-9820/1997 – “Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência” e do documento “Especificação técnica para coleta de amostras indeformadas” garantiram a obtenção de amostras de boa qualidade.
4. O cuidado na moldagem dos corpos de prova, seguindo as recomendações de Ladd e DeGroot (2007), e o cuidado na execução dos ensaios contribuíram para a excelente qualidade dos resultados obtidos.
5. Das seis amostras ensaiadas, as três mais superficiais a saber, SRA203(1), SRA203(2) e SRA203(3), pertencem a uma camada de transição entre a camada de areia superficial sobrejacente e a camada de Argila de Sedimentos Flúvio-Lagunares (SFL). Já as três amostras mais profundas a saber, SRA203(4), SRA203(5) e SRA203(6), são mais argilosas e pertencem realmente à camada de Argila de SFL de acordo com a classificação genética das argilas da Baixada Santista proposta por Massad (1985). Para as três amostras mais profundas ensaiadas, os valores de

coeficiente de adensamento vertical (c_v), francamente dentro do domínio normalmente adensado, situam-se entre $0,9 \times 10^{-4}$ e $4,0 \times 10^{-4}$ cm²/s. Tais valores pertencem ao domínio apresentado por Massad (1999) para as Argilas de SFL. Já os valores de $C_v/(1+e_0)$ das três amostras mais profundas ensaiadas situam-se entre 0,45 e 0,66 sendo, em geral, um pouco superiores ao limite superior do domínio de $C_v/(1+e_0)$ da Argila de SFL apresentada por Massad (1999). Essas diferenças são possivelmente devidas ao fato das amostras aqui apresentadas serem de qualidade superior.

6. As curvas de compressibilidade dos corpos de prova remoldados se comparadas às curvas de compressibilidade dos corpos de prova supostamente indeformados de todas as amostras em que esta comparação foi feita evidenciaram todos os efeitos de amolgamento enunciados por Ladd (1973).
7. Os resultados mostram que durante a relaxação imperfeita no equipamento edométrico convencional, o caminho seguido pelo corpo de prova no plano $\varepsilon\text{-log}\sigma'_v$ é inclinado marchando em direção à curva de velocidade de deformação específica ($\dot{\varepsilon}$) igual a zero. A componente horizontal do referido caminho está associada à relaxação perfeita, enquanto que a componente vertical está associada ao adensamento secundário. Assim sendo, durante a relaxação imperfeita ocorre tanto relaxação quanto adensamento secundário.
8. Consoante o modelo do Grupo de Reologia da COPPE, não é a variação da tensão vertical efetiva quem responde pela variação do índice de vazios na compressão edométrica, mas sim a variação da parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva.
9. O acompanhamento do adensamento secundário e da relaxação imperfeita possibilitou a obtenção de curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\varepsilon}$) no plano $\varepsilon\text{-log}\sigma'_v$. Contudo, para obterem-se maiores amplitudes de velocidade de deformação no mesmo tempo deve-se optar pelo ensaio de relaxação imperfeita.

10. A execução de duas etapas de relaxação imperfeita entremeadas por um adensamento secundário puro, realizados em um mesmo corpo de prova, mostrou-se um método confiável e eficaz para obtenção de curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log\sigma'_v$. Isto ocorre porque se eliminam as menores heterogeneidades que porventura possam surgir entre corpos de prova de uma mesma amostra.
11. Assim como Feijó (1991), observou-se que quanto maior o valor do OCR gerado no descarregamento, menor é a velocidade de entrada na compressão secundária que ocorre após a expansão primária.
12. De acordo com o modelo do Grupo de Reologia da COPPE, a tensão vertical efetiva (σ'_v) é composta por duas parcelas: uma parcela sólido-sólido (σ'_{vs}) que é função exclusiva do índice de vazios (e) e outra parcela viscosa (σ'_{vv}) que é função do índice de vazios (e) e da velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$). Durante o adensamento secundário e a relaxação imperfeita ocorre transferência da parcela viscosa da tensão vertical efetiva para a parcela sólido-sólido da tensão vertical efetiva. À luz do referido modelo, foi possível quantificar a parcela da tensão vertical efetiva viscosa transferida ($\Delta\sigma'_{vv}$) durante o adensamento secundário e a relaxação imperfeita, e relacionar esta grandeza com a velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$).
13. Foi constatado que a temperatura interfere significativamente na evolução do adensamento secundário e da relaxação imperfeita. O aumento de temperatura acelera os referidos fenômenos.
14. Todos os fenômenos reológicos observados no laboratório na argila do Canal do Porto de Santos enquadram-se no modelo proposto pelo Grupo de Reologia da COPPE.

6.2 Sugestões para futuras pesquisas

1. Investigar os efeitos da temperatura no adensamento secundário e na relaxação imperfeita no equipamento edométrico convencional.
2. Executar mais ensaios de adensamento edométrico convencional com duas etapas de relaxação imperfeita entremeadas por um período de acompanhamento do adensamento secundário puro, introduzindo o anel dinamométrico para bloquear o braço da prensa, retirando-o e recolocando-o, a fim de obter curvas de igual velocidade de deformação específica ($\dot{\epsilon}$) no plano ϵ - $\log \sigma'_v$.
3. Repetir para a argila do Canal do porto de Santos, o esquema de descarregamento aplicado por Feijó (1991) à argila do Sarapuí com o intuito de localizar com acurácia a linha de fim do secundário no plano e - $\log \sigma'_v$.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKINSON, J. H. & BRANSBY, P. L., 1978, “**The Mechanics of Soils, An Introduction to Critical State Soil Mechanics**”, London, McGraw-Hill;

BJERRUM, L., 1967, “Engineering Geology of Norwegian Normally Consolidated Marine Clays as Related to the Settlements of Buildings”, **7th Rankine Lecture – Géotechnique**, vol. 22, nº 1 (Jun), pp. 83-118;

BJERRUM, L., 1973, “Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays and Structurally Unstable Soils (Collapsible, Expansive and Others)”, In: **Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Proceedings, Moscow, August, Session 4, vol.3 , pp.111-159.

BUISMAN, A. S. K., 1936, “Results of Long Duration Settlements Tests”, In: **First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, Proceedings. Cambridge, vol. 1, pp. 103-106;

CASAGRANDE, A. 1936, The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: **First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Proceedings. Cambridge, v, III, discussion D-34.

COUTINHO (2007) – “Characterization and Engineering Properties of Recife Soft Clays – Brazil”, **Characterization and Engineering Properties of Natural Soils**, Taylor and Francis – Balkema, Editors Tan, Phoon, Hight and Leroueil, vol. 3, pp. 2049-2100;

COUTINHO, R.Q., (1976) – “**Características de adensamento com drenagem radial em argila mole da Baixada Fluminense, Rio de Janeiro**”, COPPE/UFRJ”. Tese de mestrado.

DA MOTA, J. L. C. P., 1996, “**Estudo do Adensamento Unidimensional com Carregamento Crescente com o Tempo**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil;

DE JONG, L. & VERRUIJT, A., 1965, “Primary and Secondary Consolidation of a Spherical Clay Sample”, In: **Proceedings of the 6th ICSMFE**, Montreal, vol.1, pp. 254-258.

FEIJÓ, R. L., 1991, “**Relação entre a Compressão Secundária, Razão de Sobreadensamento e Coeficiente de Empuxo no Repouso**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FEIJÓ, R. L., e MARTINS, I. S. M., 1993, “Relação entre Compressão Secundária, OCR e K_0 ”, COPPEGEO 95, In: **Simpósio Comemorativo dos 30 anos da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro**, pp.27-40.

GARCIA, S. G. F., 1996, “**Relação entre o Adensamento Secundário e a Relaxação de Tensões de uma Argila Mole Submetida à Compressão Edométrica**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil;

KAVAZANJIAN, Jr., E. & MITCHELL, J.K., (1984), “Time Dependence of Lateral Earth Pressure”, **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE, April, pp. 530-533.

LACERDA, W. A. 1976, “**Stress-Relaxion and Creep Effects on Soil Deformation**”, Ph.D Thesis, University of Berkeley, California, USA;

LADD, C. C., 1971, “Settlement Analysis for Cohesive Soils”, Research Report R71-2, Soils Publication 272, Soil Mechanics Division, Department of Civil Engineering, M.I.T, Cambridge, Mass., pp. 1-76;

LADD, C. C., 1973, “Estimating Settlements of Structures Supported on Cohesive Soils”, Revised Version of a Paper Originally Prepared for MIT 1971, Special Summer Program, 1.34s”, Soft Ground Construction”;

LADD, C.C., & DEGROOT, D.J., 2003, “Recommended Practice for Soft Ground Site Characterization”, Arthur Casagrande Lecture, **12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**.

LEONARDS, G. A. & ALTSCHAEFFL, 1964, A. G. Compressibility of clay. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, ASCE, New York, 90 (SM5): 133-155.

LEROUEIL, S., KABBAJ, M., TRAVENAS, F. & BOUCHARD, R., 1985, “Stress – Strain - Strain Rate Relation for Compressibility of Sensitive Natural Clays”, **Geotechnique**, vol. 35, n. 2, pp.159-180;

LIMA, G. da P., 1993, “**Estudo de uma Teoria Não linear para Adensamento Unidimensional**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil;

LUNNE, T., BERRE, T. & STRANDVIK, S., 1997, “Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay”, *Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics*, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam.

MARTINS, I. S. M. 1983, “**Sobre uma nova Relação Índice de Vazios – Tensão nos Solos**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil;

MARTINS, I. S. M. 1992, “**Fundamentos de um Modelo de Comportamento de Solos Argilosos Saturados**”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

MARTINS I. S. M., 2005, “**Algumas considerações sobre adensamento secundário**”, Palestra proferida no Clube de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil;

MARTINS, I. S. M. & LACERDA, W. A., 1985, “A Theory of Consolidation with Secondary Compression”, In: **Proceedings of the 11th ICSMFE**, San Francisco, vol. 2, pp.567-570;

MARTINS, I. S. M., SANTA MARIA & LACERDA, W. A., 1997, “A Brief Review About The Most Significant Results of COPPE Research on Rheological Behaviour of Saturated Clays Subjected to One Dimension Strain”, Almeida, M.S.S. (ed), **Recent Developments in Soil Mechanics**, Balkema, Rotterdam, pp.255-264;

MARTINS, I. S. M. e ABREU, F. R. S., 2002, “Uma Solução Aproximada para o Adensamento Unidimensional com Grandes Deformações e Submersão de Aterros”, **Solos e Rochas**, vol.1, pp 3-14, São Paulo;

MASSAD, F., 1985, “Progressos Recentes dos estudos sobre as Argilas Quaternárias da Baixada santista”, ABMS/ABGE, São Paulo, Brasil;

MASSAD, F., 1988, História Geológica e Propriedades dos Solos das Baixadas: Comparação entre Diferentes Locais da Costa Brasileira. In: **Simpósio Sobre Depósito Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras**, Agosto, Rio de Janeiro, Anais, vol. 1, pp. 3.1 a 3.34.

MASSAD, F., 1994, Propriedades dos Sedimentos Marinhos: **Solos do Litoral Paulista**, ABMS (Associação Brasileira de Mecânica dos Solos), ed., Núcleo Regional de S. Paulo, p. 99-128.

MASSAD, F., 1999, “Baixada Santista: Implicações na História Geológica no Projeto de Fundações”, **Solos e Rochas**, vol. 22, pp.3-49;

MAYNE, P.W. & KULHAWY, F.H. 1982, “ K_0 -OCR Relationship in Soil”, **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, v.108, n. GT6 (June), pp. 851-872;

MB 3336, 1990, Solo - Ensaio de Adensamento Unidimensional. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

MESRI, G. & CASTRO A., 1987, “ C_d/C_c Concept and K_0 During Secondary Compression”, **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, vol. 113, n. 3, pp. 230-247;

MESRI, G. & GODLEWSKI (1977), “Time and Stress Compressibility Interrelationship”, **Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE**, Vol. 103, Maio;

MITCHELL, J. K., 1964, “Shearing Resistance of Soils as a Rate Process”, **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, ASCE, vol. 90, n.1, p. 29 (January)

MOTA, J. L. C. P. 1996, “**Estudo do Adensamento Unidimensional com o Carregamento Crescente com o Tempo**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil;

NBR 7181, 1984 – “*Solo – Análise Granulométrica – Método de ensaio*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 6457, 1986 – “*Amostras de Solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 6459, 1984 “*Solo – Determinação do Limite de Liquidez – Método de Ensaio*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 7180, 1984 - “*Solo – Determinação do Limite de Plasticidade – Método de Ensaio*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 6508, 1984 – “*Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 13600, 1996 – “*Solo - Determinação do Teor de Matéria Orgânica por Queima a 440°C*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

NBR 9820, 1997 - “*Coleta de amostras indeformadas de solos de baixa consistência em furos de sondagens*”. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

PACHECO SILVA, F. 1953, Controlling the Stability of a Foundation Through Neutral Pressure Measurements. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 3. Suisse, Proc ... v. 1, p. 299-301, 1953-a.

PACHECO SILVA, F. 1970, Uma nova construção gráfica para a determinação da pressão de pré-adensamento de uma amostra de solo. In: **IV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações**, Anais, Guanabara, v. II, tomo I, p. 219-223.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1978 - Formações Quaternárias Marinhas do Litoral Paulista e Sul Fluminense. Publicação Especial nº 1, In: **Inter. Sympos. on Coastal Evolution in the Quaternary**, Sept., 11-18, S. Paulo.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. 1981 – **Progress in Research on Quaternary Sea Level Changes and Coastal Evolution in Brazil. Symposium on Variations in Sea Level in the Last 15000 Years, Magnitude and Causes.** Univ. South Caroline, USA.

TAYLOR D. W., 1942, “Research on Consolidation of Clays”, Dept. of Civil and Sanitary Eng., M.I.T, serial 82 (August), 145p;

TAYLOR D. W., 1948, “**Fundamentals of Soil Mechanics**”, John Wiley e Sons., New York;

TAYLOR, D. W. & MERCHANT, W. 1940, “A Theory of Clay Consolidation Accounting for Secondary Compression”, **Journal of Mathematics and Physics**, v. 19, n.3, p.167-185;

TERZAGHI, K., 1936, “The Shearing Resistance of Saturated Soils and The Angle between the Planes of Shear”, In: **Proceedings of 1st ICSMFE**, Cambridge;

TERZAGHI, K., (1941), “Undisturbed clay samples and undisturbed clays.”, Journal of the Boston Society of Civil Engineeres.

VIEIRA, L.O.M., 1988, “**Contribuição ao Estudo do Adensamento Secundário**”, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

ANEXOS

ANEXO A: Desenvolvimento da equação do adensamento unidimensional da teoria de Terzaghi e Frölich

A equação diferencial do adensamento unidimensional origina-se da equação geral do fluxo em meios porosos. Para estabelecer a equação geral do fluxo em meios porosos considera-se o elemento “infinitesimal” sujeito à fluxo conforme apresentado na figura A.1, a seguir.

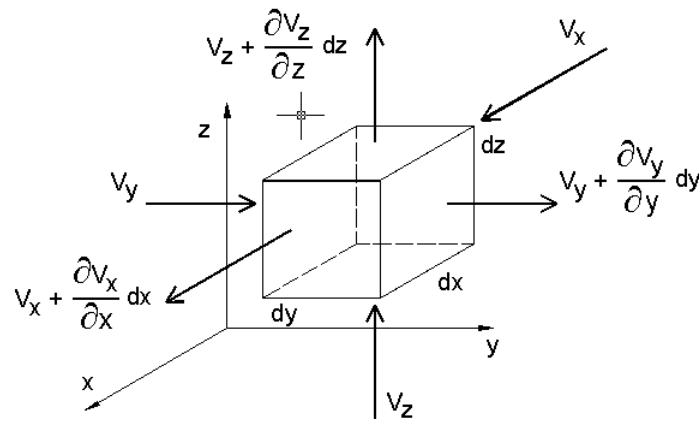


Figura A.1: Elemento de solo submetido a fluxo tridimensional

O volume de água que entra no elemento na unidade de tempo é:

$$Q_{\text{entra}} = v_x \, dy \, dz + v_y \, dx \, dz + v_z \, dx \, dy \quad (\text{A.1})$$

O volume de água que sai do elemento na unidade de tempo é:

$$Q_{\text{sai}} = \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \, dx \right) dy \, dz + \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \, dy \right) dx \, dz + \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \, dz \right) dx \, dy \quad (\text{A.2})$$

Portanto, a variação do volume de água do elemento na unidade de tempo é:

$$Q_{\text{sai}} - Q_{\text{entra}} = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx \, dy \, dz \quad (\text{A.3})$$

Por outro lado, a taxa de variação do volume de água do elemento na unidade de tempo é: $\frac{\partial V_w}{\partial t}$ (A.4)

O volume de água do elemento (V_w) pode ser expresso por:

$$V_w = S V_v = S e V_s \quad (\text{A.5})$$

Onde:

V_v = volume de vazios,

V_s = volume de sólidos,

S = grau de saturação e

e = índice de vazios.

Admitindo que os grãos sólidos são incompressíveis, o volume de sólidos pode ser expresso por:

$$V_s = \frac{V_0}{(1 + e_0)} \quad (\text{A.6})$$

Onde:

V_0 = volume total inicial do elemento e

e_0 = índice de vazios inicial do elemento.

Substituindo a expressão A.6 em A.5, tem-se que:

$$V_w = \frac{V_0}{(1 + e_0)} S e \quad (\text{A.7})$$

Assim sendo, a taxa de variação do volume de água em relação ao tempo é:

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = \frac{V_0}{(1 + e_0)} \left(S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (\text{A.8})$$

Admitindo que a água é incompressível, a taxa de variação do volume de água do elemento em relação ao tempo é igual à diferença do volume de água que entra e que sai na unidade de tempo. As expressões A.3 e A.8 são igualadas, obtendo-se:

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \frac{V_0}{1 + e_0} \left(S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (\text{A.9})$$

E finalmente, como o volume total inicial do elemento (V_0) é: $V_0 = dx dy dz$, a equação geral do fluxo em meios porosos, admitindo os grãos sólidos e a água incompressíveis, é:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{1+e_0} \left(S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (\text{A.10})$$

Considerando a hipótese que o fluxo é exclusivamente vertical $\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \right)$, tem-se que:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{1+e_0} \left(S \frac{\partial e}{\partial t} + e \frac{\partial S}{\partial t} \right) \quad (\text{A.11})$$

Admitindo que o solo encontra-se saturado ($S=cte=1$), a equação assume o seguinte aspecto:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{1}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (\text{A.12})$$

Considerando a hipótese de que no adensamento unidimensional o fluxo obedece a Lei de Darcy:

$$v_z = k_z i_z \quad (\text{A.13})$$

$$i_z = \frac{\partial H}{\partial z} \quad (\text{A.14})$$

Onde:

k_z = coeficiente de permeabilidade na direção z.

i_z = gradiente hidráulico na direção z.

H = carga hidráulica.

Como somente a parcela da carga hidráulica correspondente ao excesso de poropressão (u) provoca fluxo tem-se que:

$$i_z = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{A.15})$$

Portanto:

$$v_z = \frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (\text{A.16})$$

Substituindo a expressão A.16 na equação A.12 tem-se que:

$$\frac{k_z}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (\text{A.17})$$

Lançando-se mão da relação idealizada entre tensão vertical efetiva e índice de vazios (hipótese 9), define-se o coeficiente de compressibilidade (a_v) como:

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma'_v} = cte \quad (\text{A.18})$$

Assim sendo, tem-se que: $\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t}$ (A.19)

Segundo o “Princípio das tensões efetivas”: $\sigma'_v = \sigma_v - u$ (A.20)

E, portanto: $\frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t}$ (A.21)

Admitindo o carregamento instantâneo e desconsiderando o efeito de submersão ao longo do tempo, tem-se que:

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial t} = 0 \rightarrow \frac{\partial \sigma'_v}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A.22})$$

Substituindo A.22 em A.19, tem-se que:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = a_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A.23})$$

Finalmente, substituindo a equação A.23 na equação A.17 chega-se a seguinte equação do adensamento unidimensional:

$$\frac{k_z (1 + e_0)}{\gamma_w a_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{A.24})$$

ANEXO B: Planta do Canal do Porto de Santos



Figura B.1: Planta do Canal do Porto de Santos

ANEXO C: Especificação técnica para coleta de amostra indeformada

C.1. OBJETIVO

O objetivo deste documento é apresentar algumas recomendações que deverão ser cumpridas na ocasião das amostragens em complementação e/ou substituição às recomendações da norma NBR 9820/1994.

C.2. PROCEDIMENTO

C.2.1 Perfuração

C.2.1.1 Tipo e Geometria dos Segmentos do Tubo de Revestimento

Os segmentos que constituem o tubo de revestimento devem possuir pelo menos 150 mm de diâmetro. No caso do avanço do tubo de revestimento a percussão e lavagem, não será permitido o uso de tubos de revestimento de sondagens rotativas, pois estes não resistem à cravação a percussão.

C.2.1.2 Avanço Do Tubo De Revestimento

No caso do avanço do tubo de revestimento a percussão e lavagem, o avanço do tubo de revestimento deve ser efetuado de modo que o avanço por lavagem através do trépano esteja sempre adiantado em relação à cravação do tubo de aproximadamente 0,5m. Próximo à profundidade de amostragem a defasagem entre o avanço por lavagem e o tubo deve ser de 0,25m. Portanto, esta deve ser a distância entre o tubo e o fundo do furo no momento da cravação do tubo Shelby. O Esquema da figura C.1 a seguir ilustra esta metodologia.

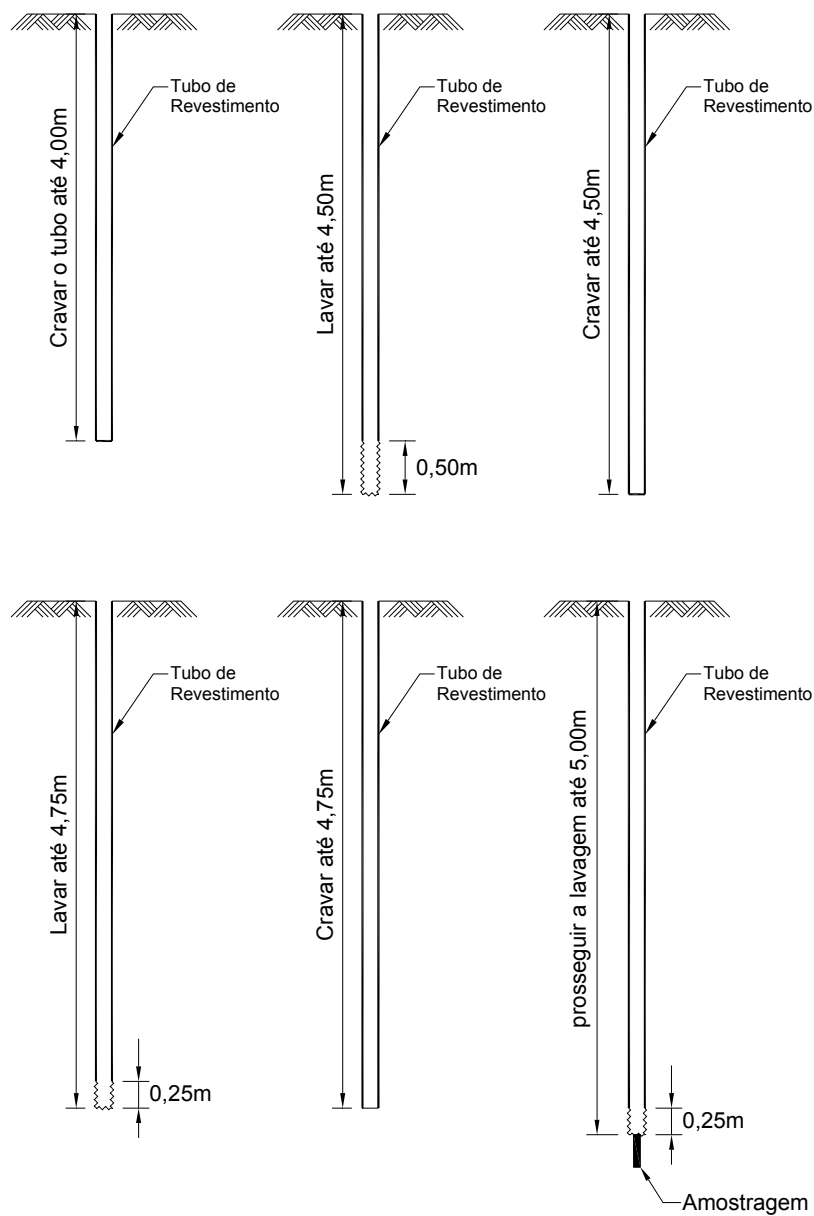


Figura C.1: Cinema esquemático da cravação do tubo de revestimento. Exemplo de amostragem a 5m de profundidade

C.2.2 Cravação do Amostrador

C.2.2.1 Tipo e Geometria do Amostrador

Dever-se-á usar amostrador de pistão estacionário com diâmetro mínimo de 100mm.

C.2.2.2 Água de Circulação.

Antes da cravação do amostrador, é importante que a lavagem seja efetuada até que a água de circulação esteja totalmente desprovida de grumos. Caso isso não seja verificado, a precipitação desses grumos acarretará na formação de uma camada de material “falso” que ocupará um certo volume na parte superior do amostrador, diminuindo o volume de amostra indeformada dentro do mesmo como ilustrado na figura C.2 a seguir.

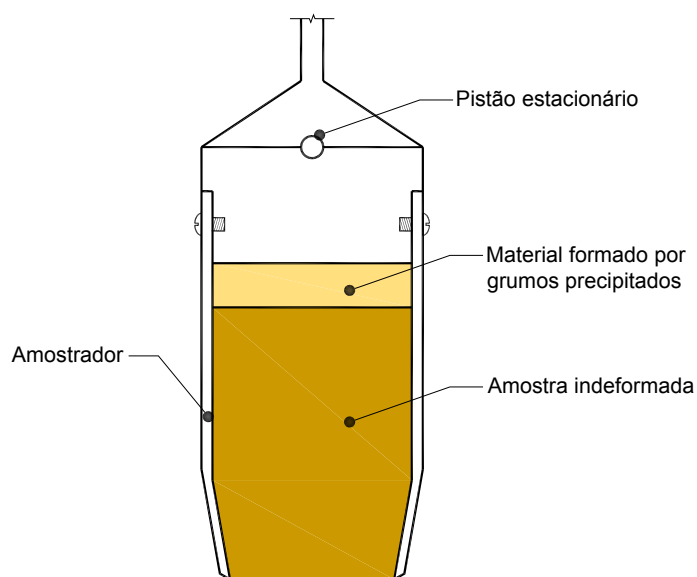


Figura C.2: Amostrador Shelby com parte de seu volume preenchido por material formado por grumos precipitados.

C.2.2.3 Lama Bentonítica

Recomenda-se o uso de lama bentonítica densa com seu nível sempre mantido no mínimo 1m acima do nível do mar conforme ilustrado na figura C.3 a seguir. Este procedimento tem por objetivo manter uma tensão vertical atuando na amostra a fim de evitar ruptura por extensão.

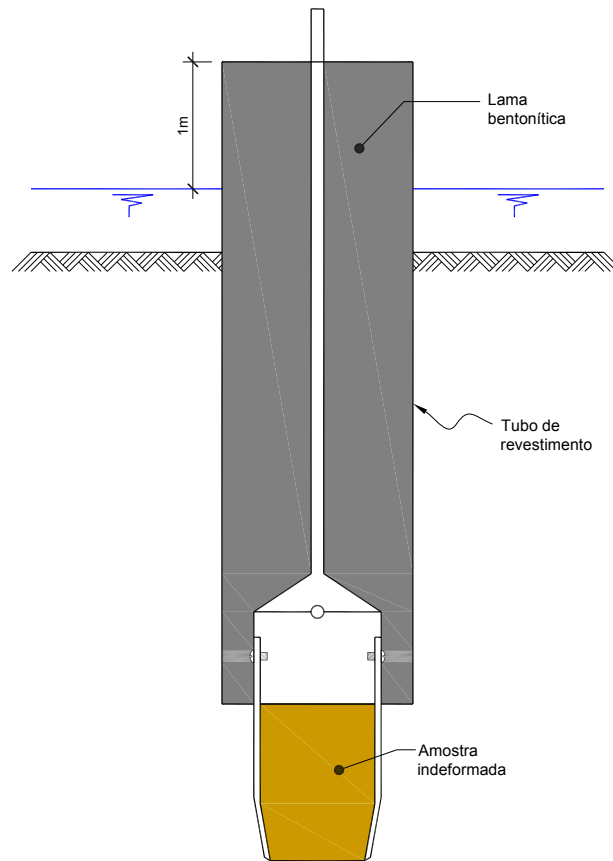


Figura C.3: Esquema da lama bentonítica

C.2.2.4 Tempo de Repouso

Após a cravação do amostrador, este deverá ficar em repouso e sua retirada só deverá ser efetuada após uma hora. Este procedimento tem por objetivo permitir que a amostra expanda-se e, conseqüentemente, acomode-se dentro do amostrador como mostrado na figura C.4 a seguir.

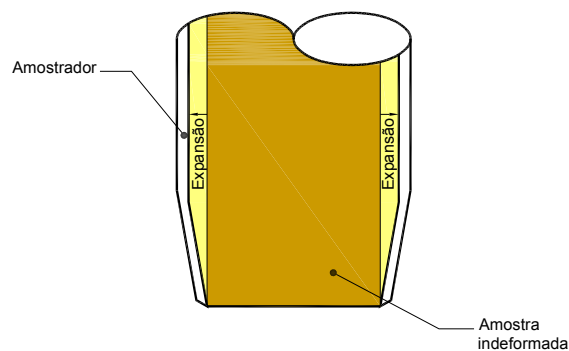


Figura C.4: Esquema da acomodação da amostra dentro do amostrador

C.2.3 Manipulação da Amostra

C.2.3.1 Retirada do Amostrador

Após a retirada do amostrador, é de suma importância a limpeza e desentupimento do orifício de comunicação do pistão com a atmosfera antes da retirada dos parafusos de conexão do amostrador ao corpo do pistão. Este procedimento elimina a possibilidade de surgimento de sucção na parte superior do amostrador, o que evita comprometer a integridade estrutural da amostra ou até mesmo sua perda na ocasião da desconexão.

C.2.3.2 Lacragem

A lacragem deve ser executada conforme recomendações descritas na norma NBR-9820/1994. Entretanto, antes da aplicação da parafina, recomenda-se cobrir a superfície da amostra primeiramente com filme de pvc, que ficará bem aderido à amostra, e posteriormente com papel laminado. Tal procedimento deve ser adotado nas duas extremidades, pois garante maior eficácia na conservação da umidade. Após a colocação do papel laminado, o lacre da extremidade biselada completa-se executando as recomendações dos itens 4.2.1.3, 4.2.1.4 e 4.2.1.5 da norma NBR-9820. O lacre da extremidade não biselada completa-se seguindo as recomendações dos itens 4.2.2.1 e 4.2.2.2 da mesma norma. A figura C.5, a seguir, ilustra a lacragem da amostra.

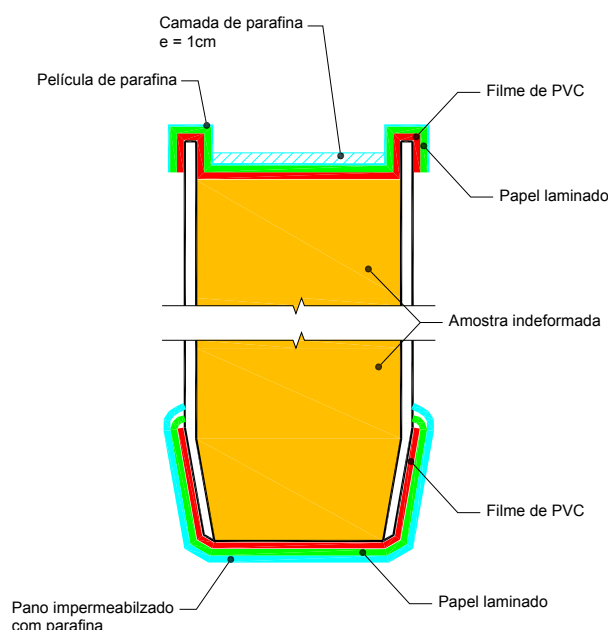


Figura C.5: Esquema da vedação das extremidades do amostrador

C.2.3.3 Identificação

Seguir recomendações descritas na norma NBR-9820/1994 e indicar o laboratório de destino da amostra.

C.2.3.4 Acondicionamento das Amostras

Os amostradores devem ser acondicionados com a extremidade biselada voltada para baixo em caixas de madeira nas quais deverão ser transportadas. As caixas devem acondicionar no máximo 4 tubos Shelby e devem ser mantidas sempre com a base voltada para baixo. A base das caixas (todo volume abaixo da prateleira inferior) deve ser preenchida com serragem molhada. A figura C.6 a seguir mostra um esquema da caixa de madeira.

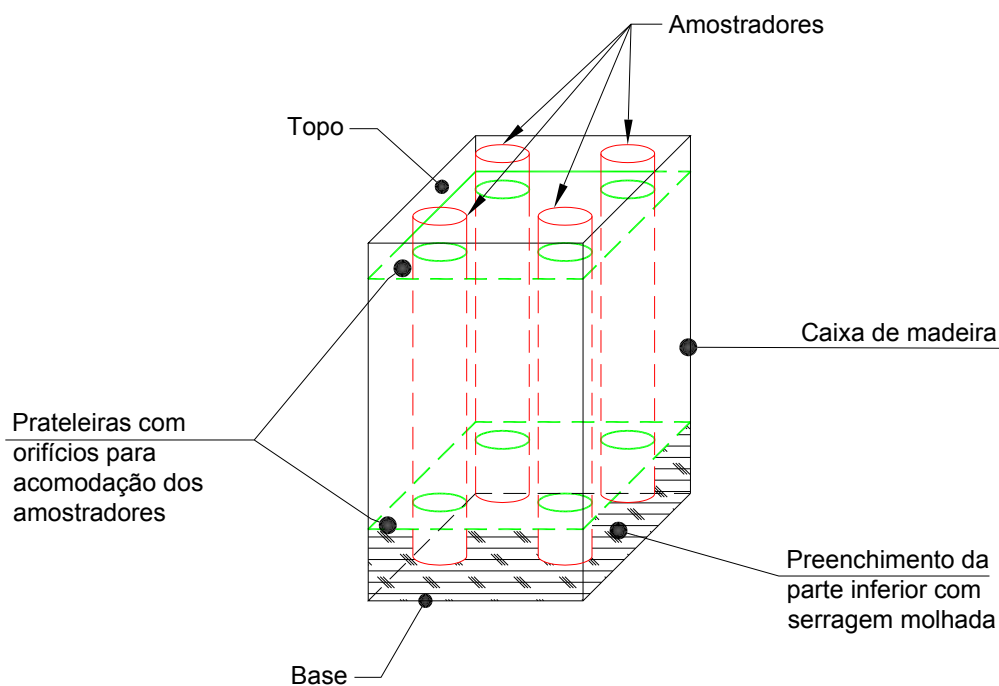


Figura C.6: Caixa de madeira para transporte dos amostradores.

C.2.2.5 Transporte

Seguir recomendações descritas na norma NBR-9820/1994. Durante o transporte as caixas de madeira devem ser mantidas sempre na mesma posição com a face correspondente à base voltada para baixo.”

ANEXO D: Imagens da amostragem

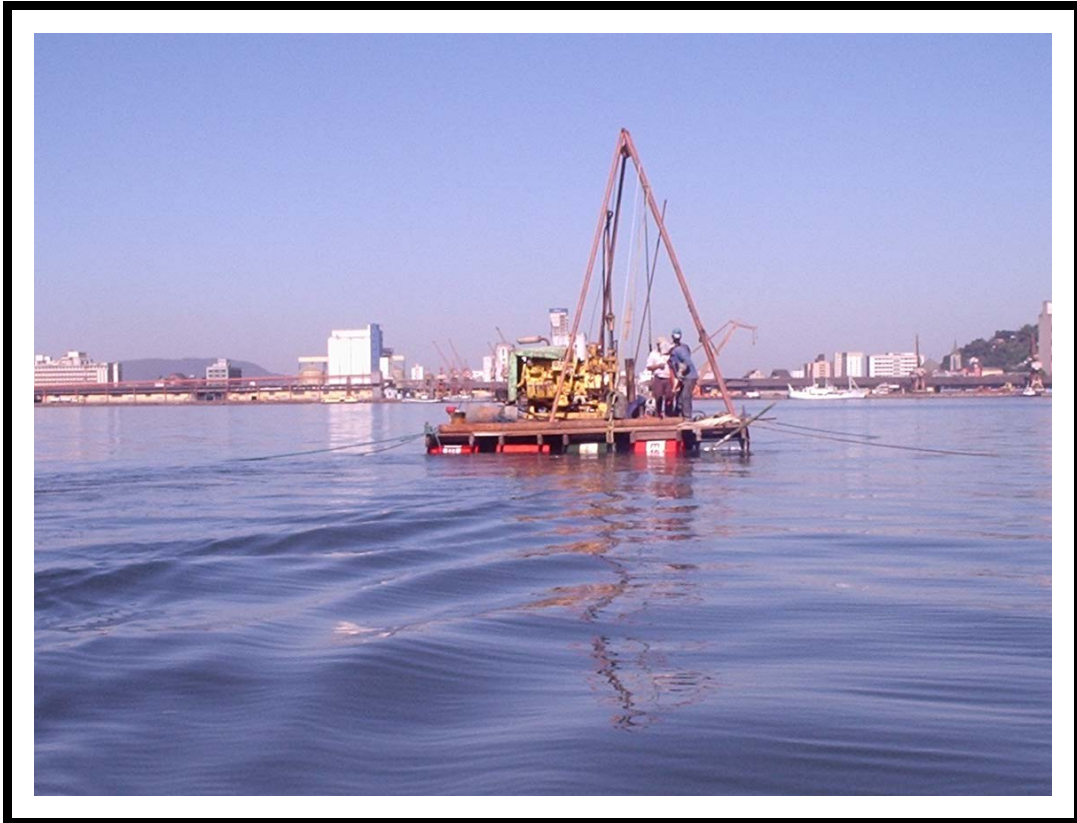


Figura D.1: Flutuante sobre o qual foram extraídas as amostras indeformadas



Figura D.2: Amostrador de pistão estacionário de 10cm de diâmetro interno utilizado para a extração das amostras



Figura D.3: Tubo de revestimento e avanço do furo por lavagem com trépano



Figura D.4: Retirada do amostrador

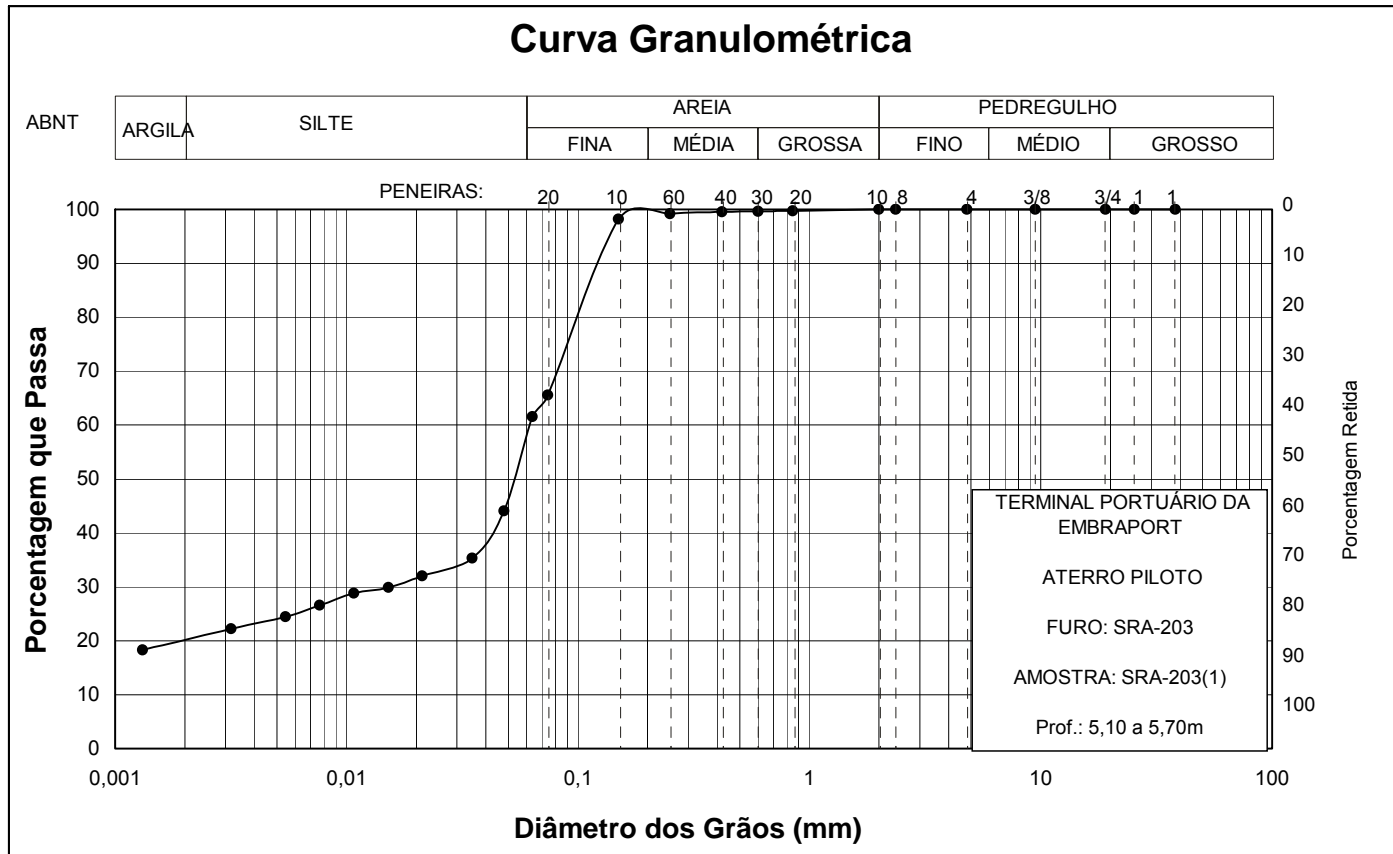


Figura D.5: Lacragem do amostrador



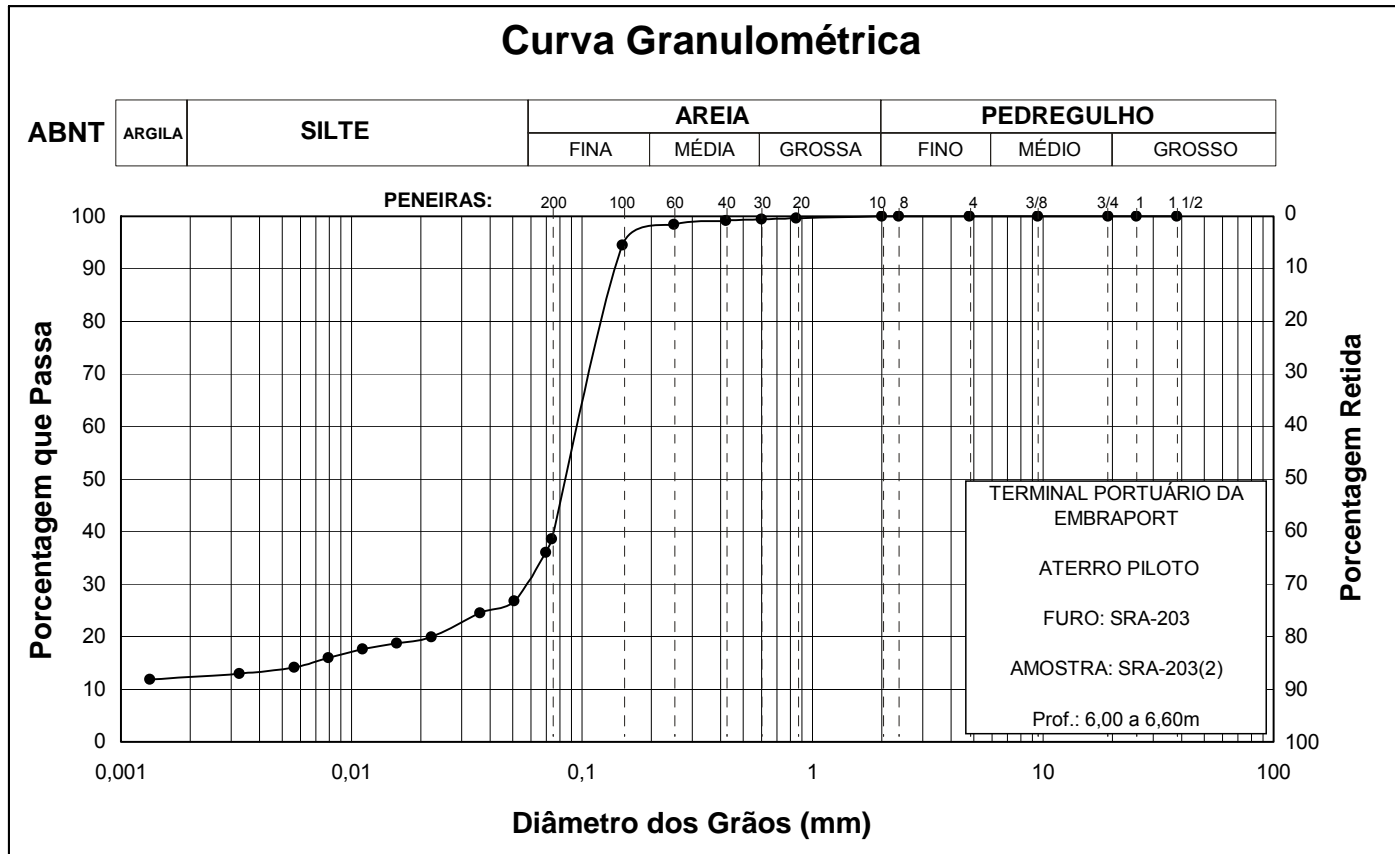
Figura D.6: Amostrador pronto para ser armazenado na caixa de madeira

ANEXO E: Curvas de Distribuição Granulométrica



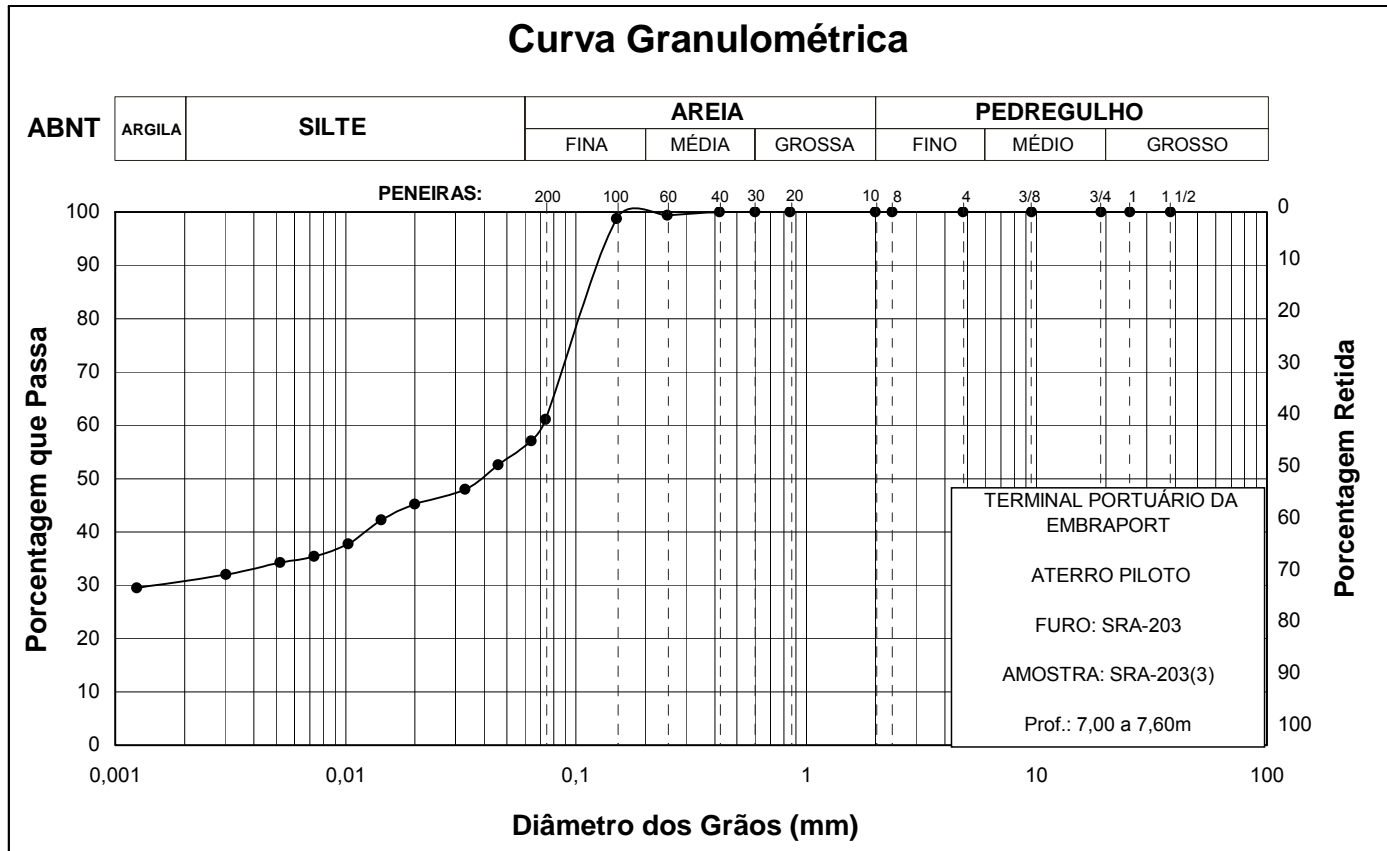
Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
20	38	41	1	0	0

Figura E.1: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(1)



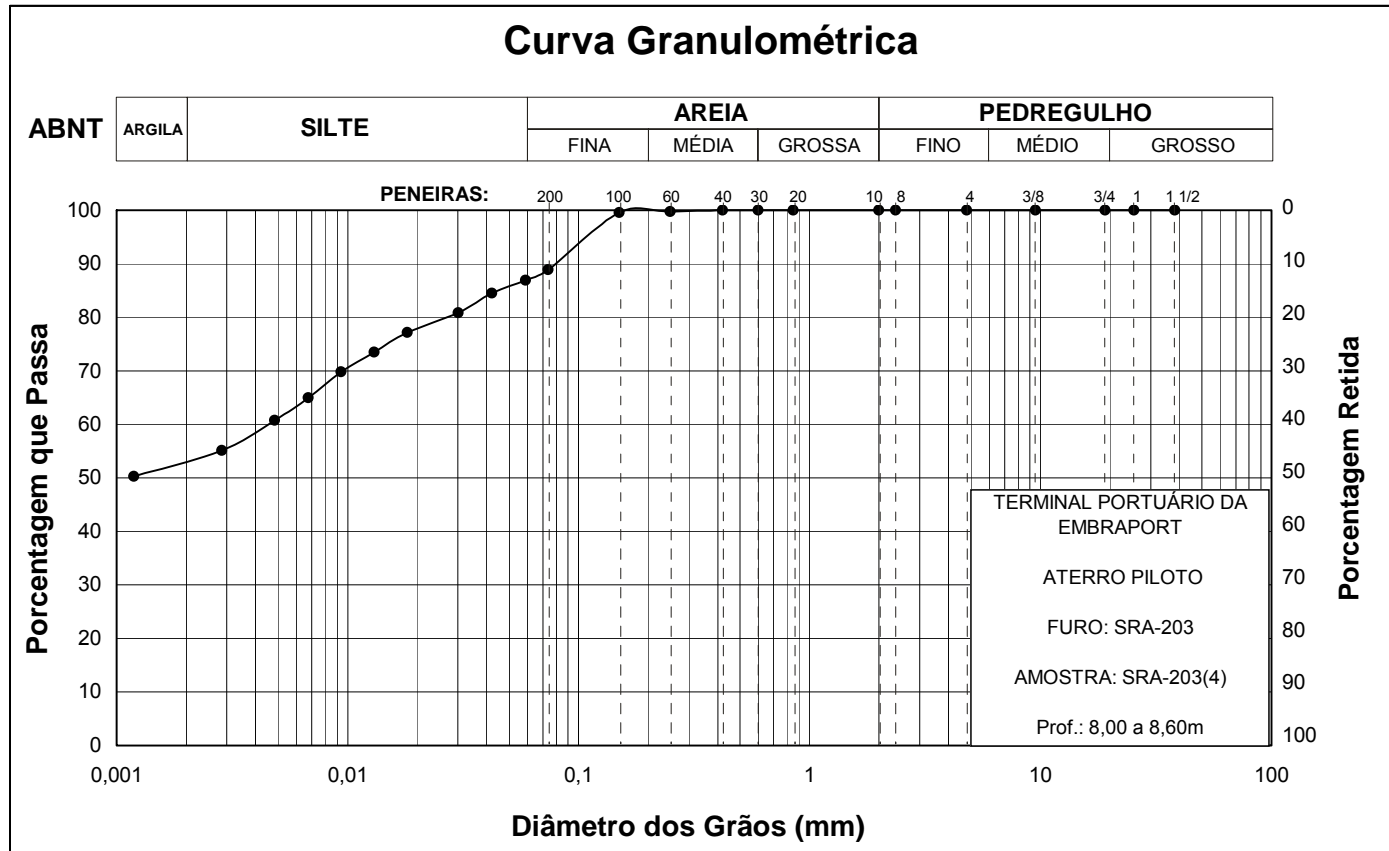
Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
12	19	65	3	1	0

Figura E.2: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(2)



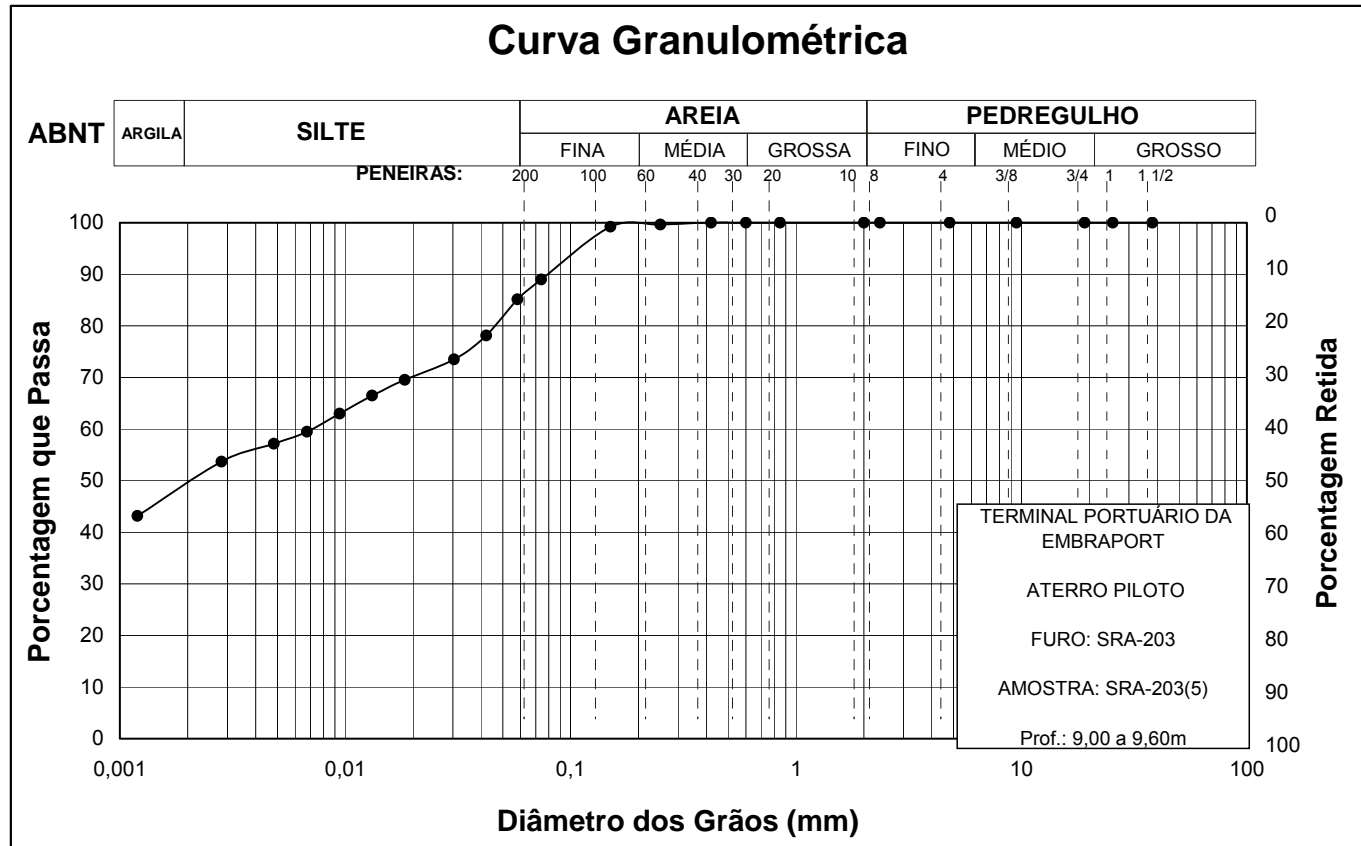
Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
31	25	43	1	0	0

Figura E.3: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(3)



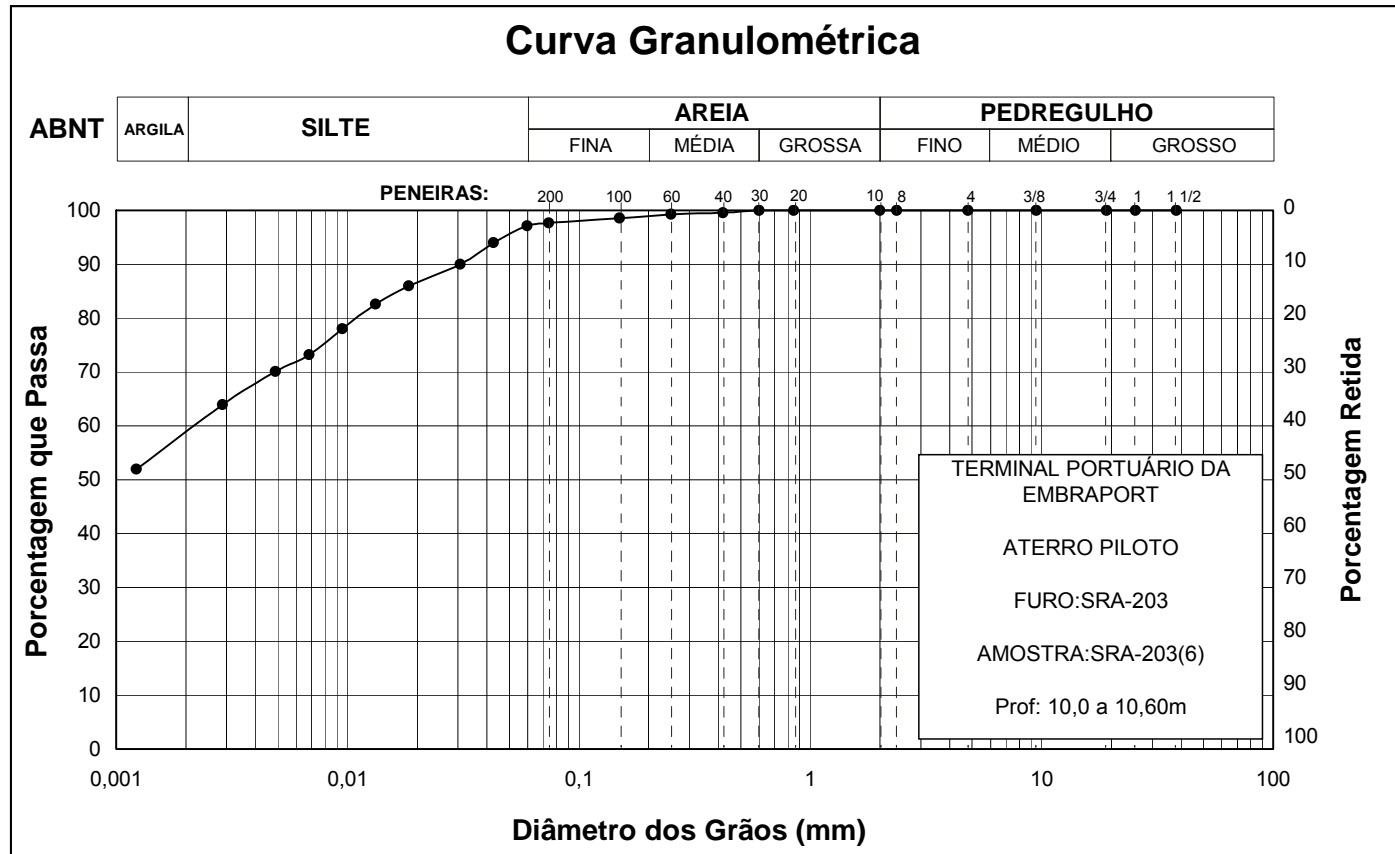
Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
53	34	13	0	0	0

Figura E.4: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(4)



Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
49	36	14	1	0	0

Figura E.5: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(5)



Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)					
Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
59	38	2	1	0	0

Figura E.6: Curva de distribuição granulométrica da amostra SRA203(6)

ANEXO F: Procedimento de Moldagem dos Corpos de Prova

A moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações de Ladd e Degroot (2003). Essas recomendações foram desenvolvidas com o intuito de reduzir os efeitos de amolgamento devido à extrusão da amostra do tubo amostrador.

Até o momento da moldagem dos corpos de prova, os tubos amostradores permaneceram na posição vertical dentro das caixas de madeiras dentro das quais foram transportados ao laboratório. As caixas de madeira ficaram armazenadas dentro da câmara úmida do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ.

Para moldagem dos corpos de prova, o tubo amostrador era retirado cuidadosamente da caixa de madeira e posicionado horizontalmente sobre rodízios fixados a uma prancha de madeira que ficava sobre uma bancada de concreto.

Retirava-se a lacragem externa da extremidade biselada do tubo amostrador e media-se a distância (folga) entre esta extremidade e a base da amostra no interior do tubo.

A figura F.1 (foto), a seguir, mostra o tubo apoiado sobre os rodízios.



Figura F.1: Tubo amostrador apoiado sobre rodízios já sem a lacragem externa

Em seguida, era cortado um segmento a partir desta extremidade com um comprimento tal que contivesse os primeiros 5 centímetros da amostra. Este material, por ser considerado impróprio para moldagem de corpos de prova de ensaios de adensamento, era ensacado pra ser utilizado nos ensaios de caracterização.

Após a eliminação dos primeiros 5 centímetros da amostra, cortava-se o primeiro segmento que daria origem aos corpos de prova de adensamento. Em geral, para moldagem de dois corpos de prova era cortado um segmento de 5 a 7,5 cm de comprimento do amostrador. Como eram moldados 4 corpos de prova, eram cortados 2 segmentos do tubo. O corte da parede do tubo amostrador era feito com uma serra e a amostra era cortada com um fio de aço.

A figura F.2 (foto), a seguir, apresenta o corte de um segmento do tubo amostrador para moldagem de corpos de prova para ensaio de adensamento.



Figura F.2: Corte de um segmento do tubo amostrador para moldagem de corpos de prova para ensaio de adensamento

Os rodízios sobre os quais o tubo era apoiado facilitavam o giro do tubo durante o corte.

A extremidade da amostra era protegida com membrana de PVC a fim de manter a umidade natural da mesma.

A figura F.3 (foto), a seguir, mostra a passagem do fio de aço para separação da amostra com a extremidade protegida com membrana de PVC.



Figura F.3: Passagem do fio de aço para separação da amostra

Uma vez desconectado o segmento, o fio de aço era passado 4 vezes ao longo da geratriz do mesmo. Este procedimento promovia o desprendimento da superfície lateral da amostra à superfície lateral interna do tubo amostrador.

A figura F.4 (foto), a seguir, mostra a passagem do fio de aço ao longo da geratriz do segmento desconectado.



Figura F.4: Passagem do fio de aço ao longo da geratriz do segmento desconectado.

Os corpos de prova eram moldados em anéis metálicos de aproximadamente 2cm de altura e 7cm de diâmetro. Para isso, o segmento do tubo desconectado era posicionado verticalmente e cravava-se estaticamente um anel metálico na extremidade superior da amostra. Em seguida, invertia-se a posição do segmento e cravava-se da mesma maneira um outro anel na outra extremidade do segmento. Os anéis tinham suas superfícies internas untadas com graxa de silicone a fim de diminuir o atrito entre a amostra e o anel durante a cravação na amostra e durante o ensaio de adensamento.

Após a cravação dos anéis na amostra, o fio de aço era passado novamente ao longo da geratriz do segmento do tubo. Em seguida, toda a amostra era extraída do segmento por extrusão.

Os corpos de prova eram esculpidos com fio de corte. O material restante da escultura dos corpos de prova era colocado em cápsulas para determinação da umidade.

A figura F.5 (foto), a seguir, apresenta a escultura de um corpo de prova com o fio de corte e preenchimento das cápsulas para determinação da umidade natural.



Figura F.5: Escultura do corpo de prova com o fio de corte e preenchimento das cápsulas para determinação da umidade natural

Finalmente, o corpo de prova era pesado e, em seguida, posicionado na célula de adensamento para ser colocado na prensa de adensamento.

A figura F.6, a seguir, ilustra o posicionamento dos corpos de prova esculpidos nas amostras indeformadas extraídas e ensaiadas.

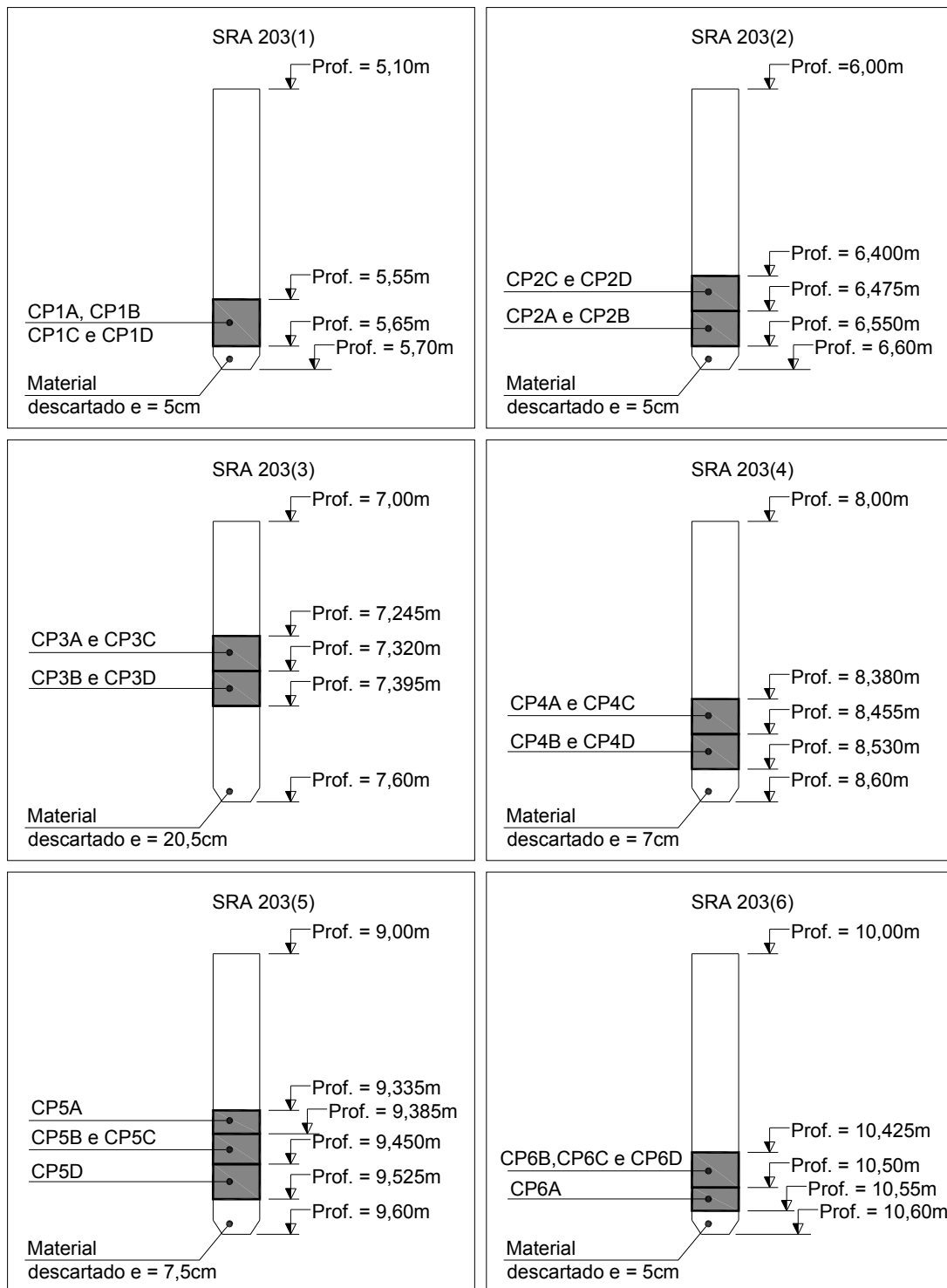


Figura F.6: Posicionamento dos corpos de prova esculpidos nas amostras indeformadas extraídas e ensaiadas.