

7 COMPRESSIBILIDADE DO SOLO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios de adensamento.

7.1. Ensaio de Adensamento Edométrico

Foram realizados seis ensaios de adensamento edométrico, identificados conforme indicado na Tabela 7.1. As metodologias e os procedimentos adotados em cada um desses ensaios encontram-se descritos no capítulo 5 e os resultados individuais de cada ensaio encontram-se disponíveis no Anexo III.

Tabela 7.1 – Identificação dos ensaios de adensamento edométrico

Ensaio	Tipo de amostra	Nomenclatura adotada	Estágios
Convencional	Indeformada	AEI-1	Estágios de 24 horas
	Amolgada	AEA-1	Estágios de 24 horas
	Amolgada	AEA-2	Estágios de 24 horas
Com medida de creep	Indeformada	AEI-2	Estágios de 72 horas
Com medida de permeabilidade	Indeformada	AEI-3	Estágios de 24 horas
	Indeformada	AEI-4	Estágios encerrados quando a taxa de variação de altura do c.p. ficasse constante no tempo

As características iniciais dos corpos de prova ensaiados encontram-se agrupadas na Tabela 7.2. Todos foram moldados a partir de amostras da profundidade de 3,50 a 4,00 metros.

Tabela 7.2 – Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento edométricos

Ensaio	Amostra	G _s	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w _o (%)	e ₀	S _o (%)
AEI-1	AM-1	2,62	13,69	6,17	121,69	3,16	100
AEA-1	AM-14	2,60	12,55	4,41	184,31	4,77	100
AEA-2	AM-14	2,60	12,51	4,40	184,42	4,79	100
AEI-2	AM-1	2,62	13,47	5,96	125,92	3,31	100
AEI-3	AM-1	2,62	13,75	6,18	122,41	3,24	100
AEI-4	AM-7	2,62	13,81	5,99	130,40	3,41	100

Os resultados dos ensaios realizados com corpos de prova indeformados apresentaram uma mesma tendência de comportamento da curva tensão-deformação, como pode ser visto na Figura 7.1. Porém, esta tendência não é observada para os ensaios realizados em corpos de prova amolgados, como pode ser verificado na Figura 7.2, onde estão apresentadas as curvas dos ensaios de adensamento AEI-1, AEA-1 e AEA-2.

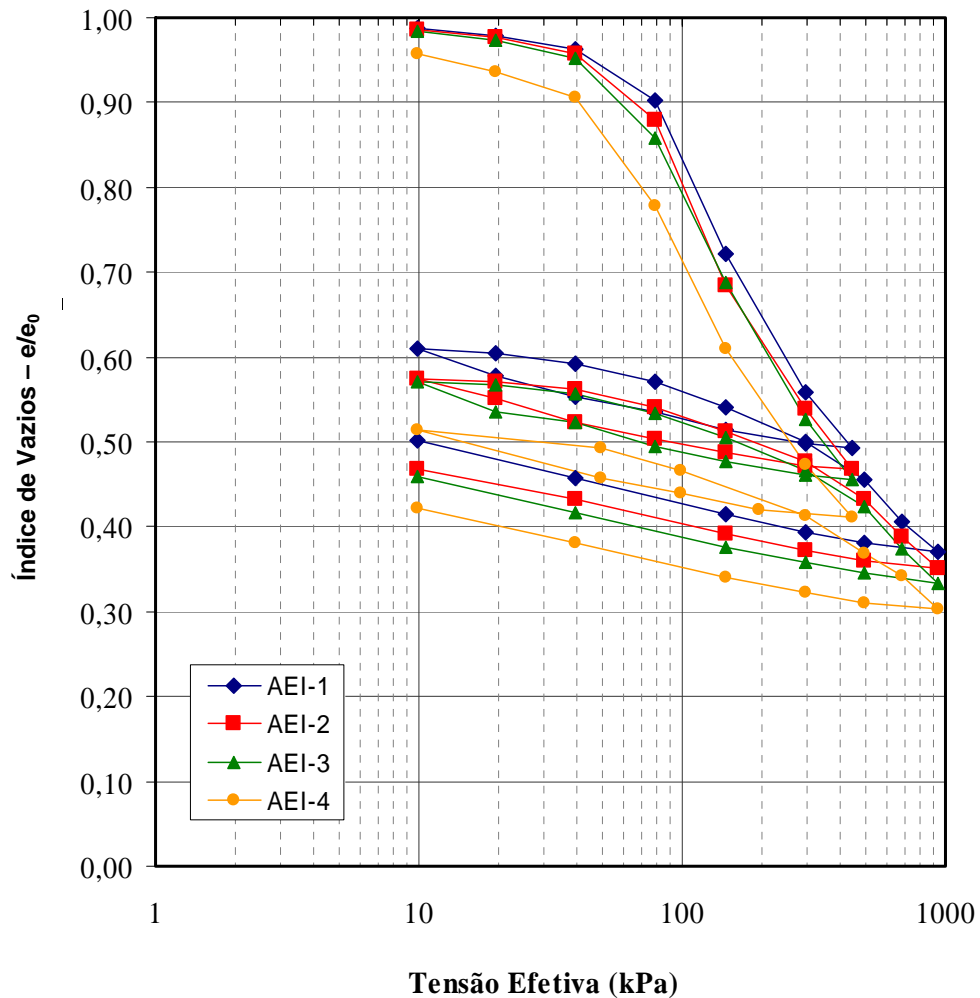


Figura 7.1 – Comparação curvas $\log \sigma' \times e/e_0$ para os ensaios edométricos

Observa-se na Figura 7.1 que, apesar das curvas tensão-deformação apresentarem uma mesma tendência de comportamento, estas se encontram deslocadas praticamente paralelamente umas das outras. Tal fato ocorre devido aos diferentes tempos de estágios adotados para cada ensaio, evidenciando a influência do tempo de carregamento na variação de volume do solo. Entretanto,

a diferença observada no ensaio EAI-4 parece indicar uma influencia do índice de vazios inicial do corpo de prova na curva.

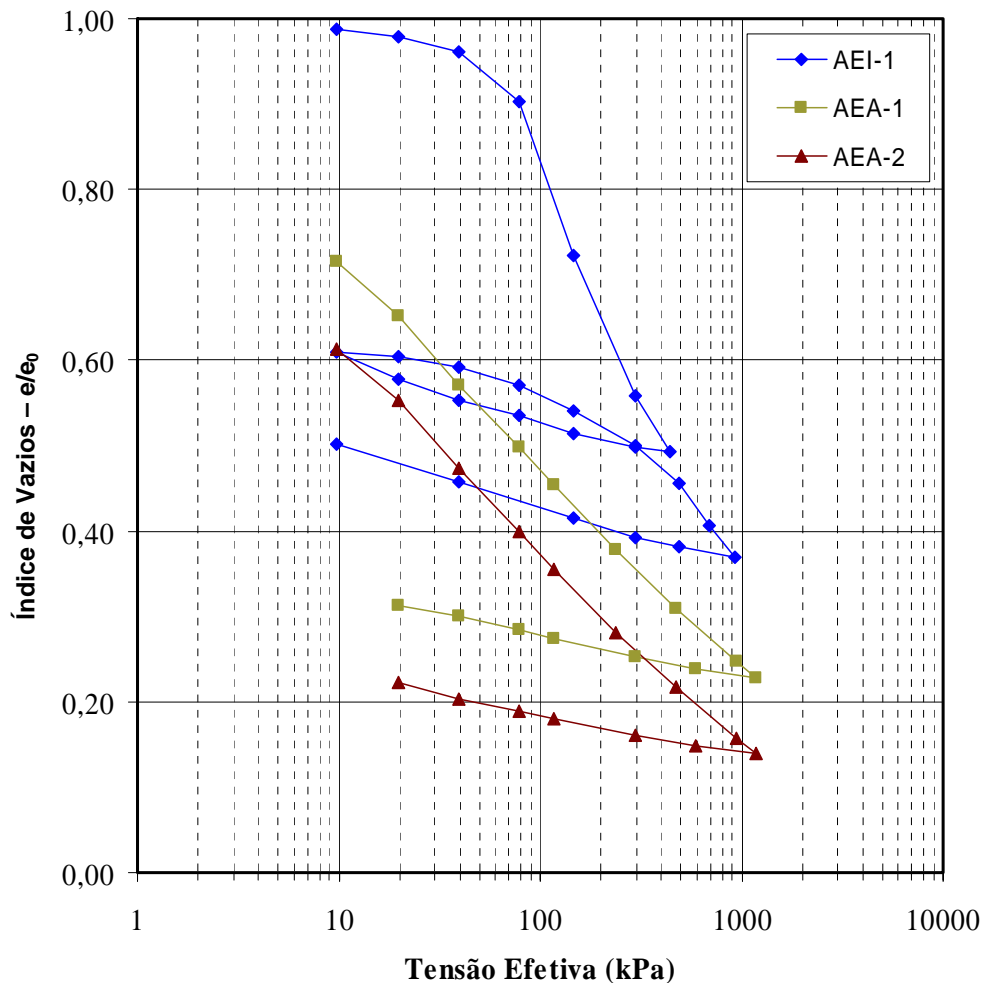


Figura 7.2 - Curva $\log \sigma' \times e/e_0$ dos ensaios de adensamento AEI-1, AEA-1 e AEA-2

Como era de se esperar, as curvas da Figura 7.2 mostraram um comportamento bem distinto para os três ensaios. O ensaio realizado com corpo de prova indeformado apresentou o trecho virgem curvilíneo indicando que a amostra era de boa qualidade. Essa não linearidade do trecho de compressão virgem não é observada nas amostras amolgadas. Estas, apesar de possuírem características iniciais semelhantes (ver Tabela 7.2), revelam que o solo quando amolgado pode se comportar de maneiras bem diferentes. Observa-se que a amostra amolgada que, naturalmente, não tem definido um trecho de recompressão, apresenta uma menor compressibilidade no domínio de compressão virgem.

O fato do trecho de compressão virgem na curva considerada de boa qualidade não ser reto traz, à primeira vista, uma certa dificuldade para a obtenção da tensão de pré-adensamento do solo. Entretanto, conforme sugerido por Martins & Lacerda (1994), esta pode ser facilmente obtida através da curva $\sigma' \times (1+e)$ com os dois eixos na escala logarítmica. A figura 7.3 ilustra o gráfico do ensaio AEI-1 com os dois eixos nessa escala.

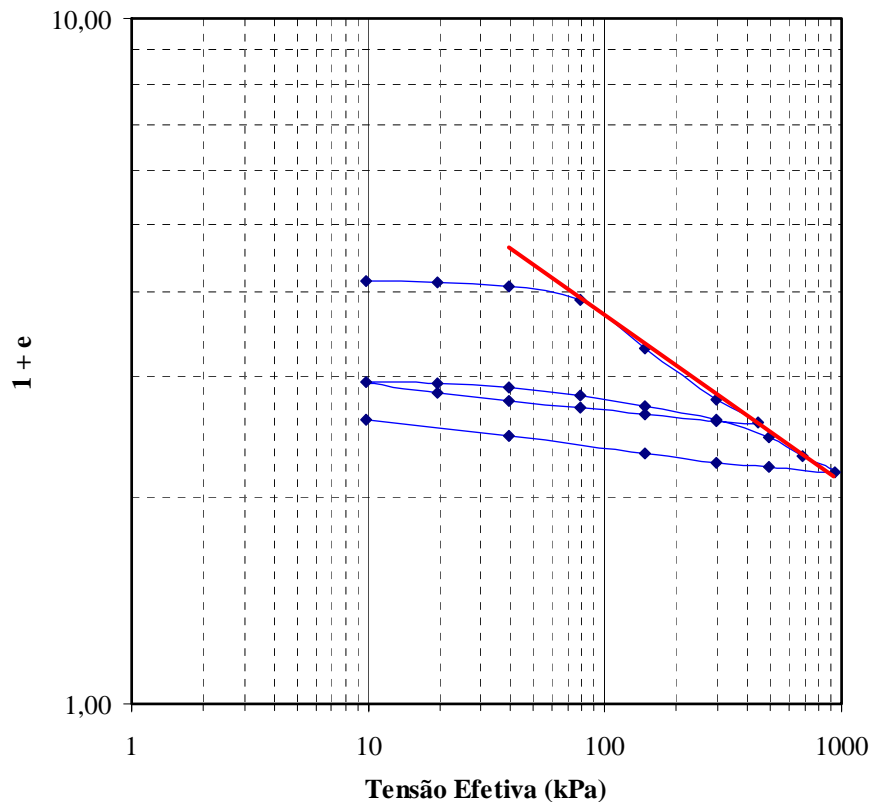


Figura 7.3 - Curva $\log \sigma' \times \log (1+e)$ do ensaio de adensamento AEA-1

Da Figura 7.3 obteve-se a tensão de pré-adensamento do solo na profundidade de 3,50 a 4,00 metros, pelo Método de Pacheco Silva, de 78 kPa, à qual corresponde um OCR de 1,95 e um índice de vazios de 2,80.

Este leve pré-adensamento também é observado em outras regiões da Baixada Fluminense, como por exemplo, em Sarapuí (Almeida *et al.*, 2005), e pode estar associado a diversos fatores, tais como:

- História geológica dos depósitos;
- Efeitos de envelhecimento, associados à compressão secundária;

- Ressecamento, associado a variações climáticas ou do nível d'água.

A mesma dificuldade que existe em se estimar a tensão de pré-adensamento para ensaios de boa qualidade é observada para a obtenção do índice de compressão. Neste trabalho, os índices de compressão foram obtidos desconsiderando os últimos pontos da curva $\log \sigma' \times e$.

A Tabela 7.3 apresenta os parâmetros de compressibilidade obtidos dos ensaios edométricos, sendo c_r o índice de recompressão, c_c o índice de compressão e c_e o índice de expansão.

Tabela 7.3 – Parâmetros de compressibilidade dos ensaios de adensamento edométrico

Ensaio	e_0	c_r	c_c	c_e	$CR = \frac{c_c}{1 + e_0}$	$\frac{c_e}{c_c}$
AEI-1	3,16	0,16	1,87	0,24	0,45	0,13
AEA-1	4,77	-	1,14	0,26	0,20	0,23
AEA-2	4,79	-	1,12	0,24	0,19	0,21
AEI-2	3,31	0,13	1,89	0,22	0,44	0,12
AEI-3	3,24	0,17	1,91	0,20	0,45	0,10
AEI-4	3,41	0,27	1,96	0,22	0,45	0,11

Comparando os resultados, constata-se o paralelismo das curvas dos ensaios realizados em corpos de prova indeformados, como já observado visualmente na Figura 7.1. O índice de compressão normalizado pelo índice de vazios, CR, apresenta-se o mesmo para esses ensaios.

Já os CRs das amostras amolgadas encontram-se inferiores ao dos demais corpos de prova, indicando que ensaios realizados em amostras amolgadas não permitem uma adequada determinação dos parâmetros de compressibilidade e da tensão de pré-adensamento. Esses ensaios são, entretanto, importantes para uma análise comparativa da qualidade dos ensaios realizados em amostras indeformadas de um mesmo solo.

O comportamento tensão deformação de um solo submetido ao ensaio de adensamento também pode ser descrito pelo coeficiente de variação volumétrica, m_v . A Figura 7.4 apresenta a variação do coeficiente de variação volumétrica em relação à tensão efetiva para os ensaios de adensamento edométricos realizados em corpos de prova indeformados. Com exceção do ensaio AEI-4, as tendências das curvas foram semelhantes, com o m_v

aumentando para pressões inferiores à tensão de pré-adensamento, e diminuindo sensivelmente para as pressões correspondentes ao trecho de compressão virgem. Comportamento semelhante ao apresentado no presente trabalho foi reportado por Martins & Lacerda (1994) para argilas normalmente adensadas.

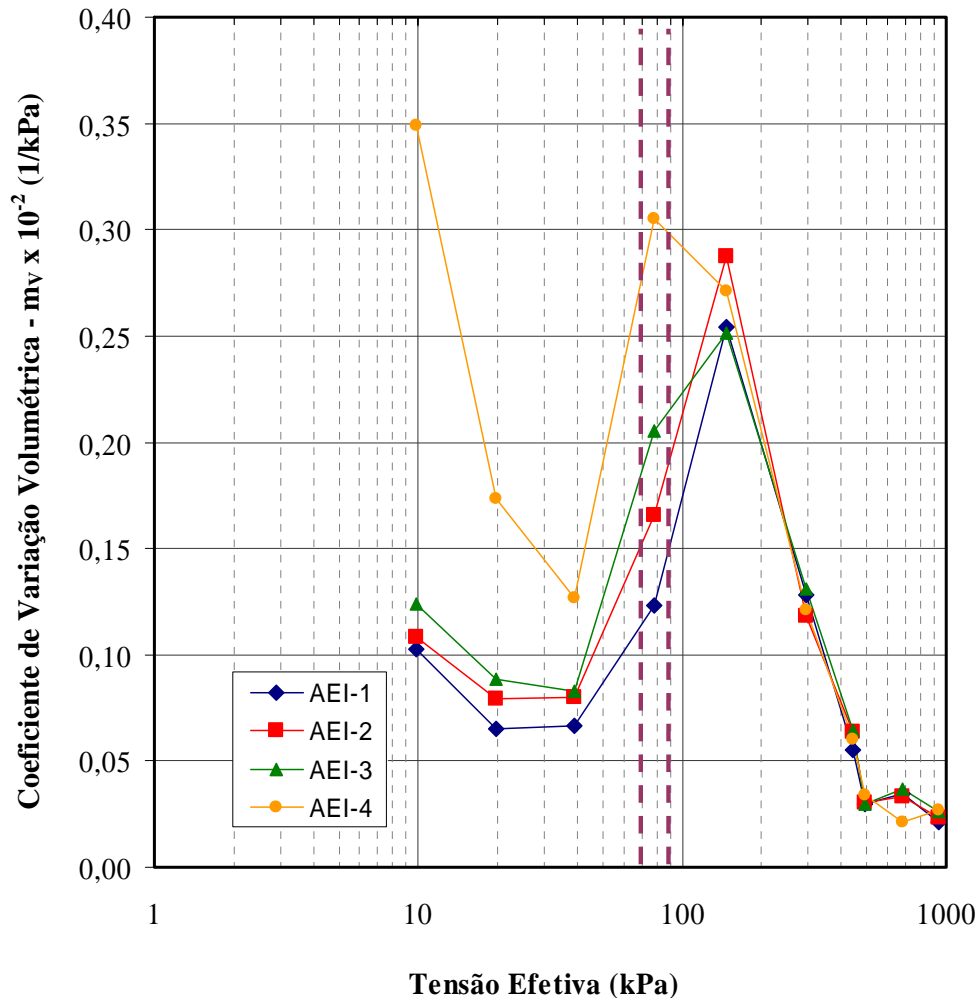


Figura 7.4 - Curvas $\log \sigma' \times m_v$ dos ensaios de adensamento edométrico

A faixa destacada na Figura 7.4 indica a região em que se encontra a tensão de pré-adensamento. Este mesmo destaque será apresentado nas figuras subsequentes.

Os coeficientes de adensamento, c_v , foram determinados para os ensaios AEI-1, AEI-2, AEI-3 e AEI-4 pelo Método de Taylor. A Figura 7.5 mostra as tendências obtidas para esses ensaios em relação à tensão efetiva. As curvas se iniciam

com valores mais elevados de c_v , que decresceram rapidamente até ficarem constantes. Observou-se que uma relativa constância dos valores de c_v é atingida no trecho de compressão virgem, após a tensão de pré-adensamento.

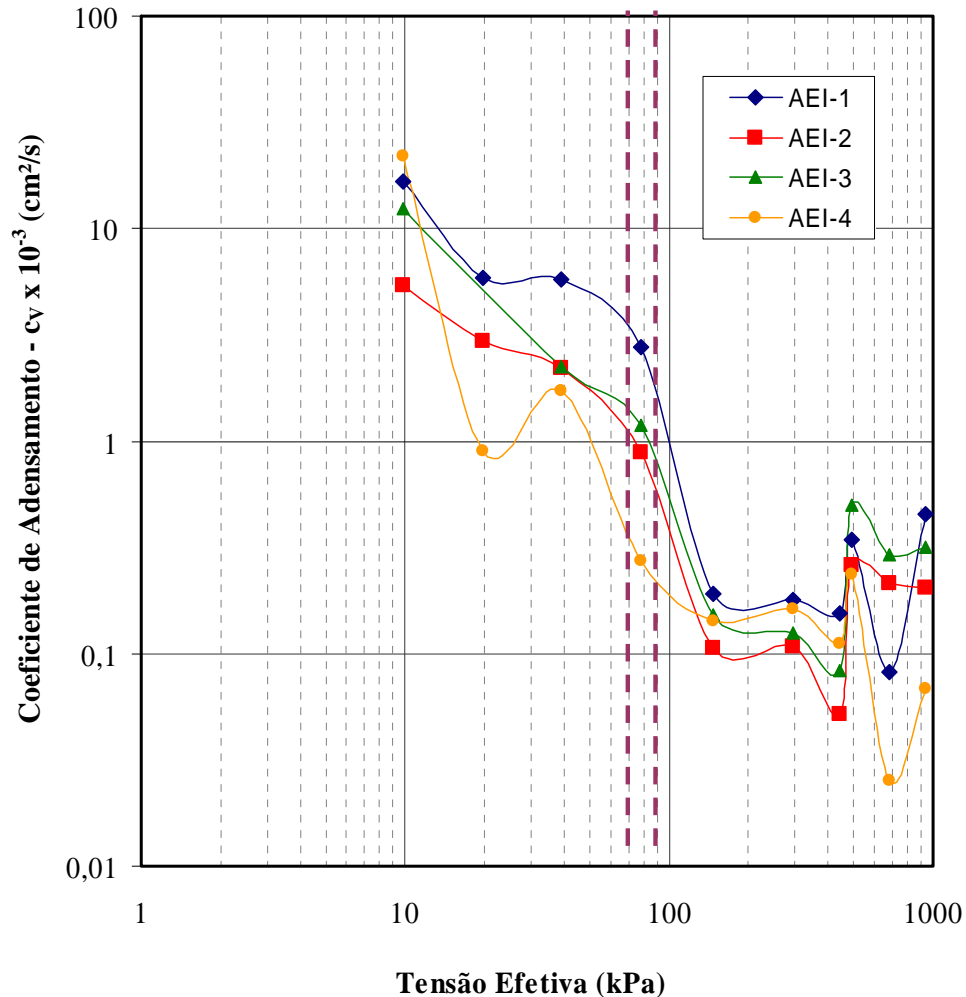


Figura 7.5 – Curvas $\log \sigma' \times c_v$ dos ensaios de adensamento edométrico.

O coeficiente de compressão secundária, c_α , foi determinado somente para o ensaio AEI-2, cujos estágios de carregamento foram de 72 horas. Este parâmetro foi obtido a partir da curva *tempo x deformação*, pela inclinação da reta após o final do adensamento primário. Seu comportamento em relação à tensão efetiva está mostrado na Figura 7.6. Percebe-se neste gráfico que o c_α inicialmente aumenta com as tensões até atingir um máximo próximo à tensão de pré-adensamento, decrescendo em seguida para um valor aproximadamente constante. Tal tipo de comportamento também foi observado por outros autores, como por exemplo Ladd (1973) e Coutinho & Lacerda (1994).

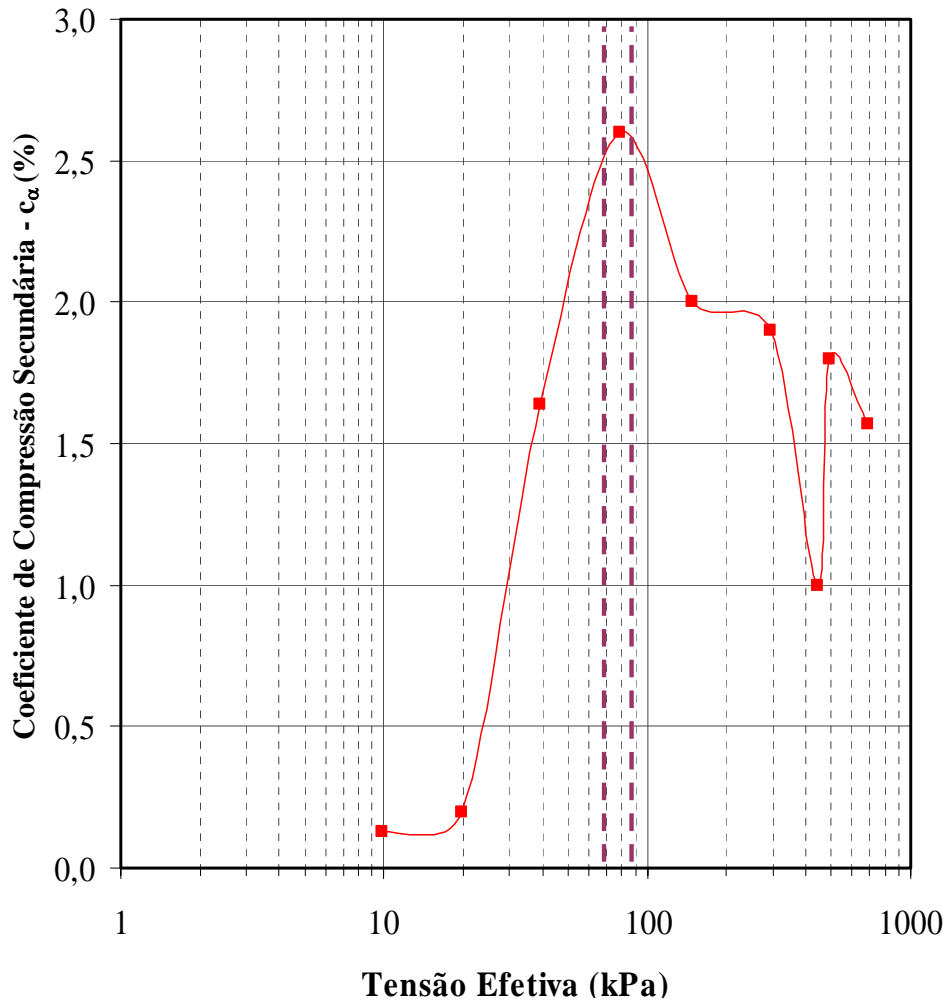


Figura 7.6 –Curva $\log \sigma' \times c_{\alpha}$ do ensaio de adensamento AEI-2

A permeabilidade do depósito de argila mole foi determinada a partir dos ensaios de adensamento AEI-3 e AEI-4 de duas maneiras distintas: por cálculo indireto obtendo-se o coeficiente de permeabilidade a partir de outros parâmetros do ensaio de adensamento de acordo com a teoria de Terzaghi, e pela medida direta dos ensaios de permeabilidade de carga constante que foram executados ao final de determinados estágios de carga.

A seguinte expressão propicia a determinação do coeficiente de permeabilidade pela teoria de Terzaghi:

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w,$$

sendo k o coeficiente de permeabilidade do solo;

c_v o coeficiente de adensamento;

m_v o coeficiente de variação volumétrica;

γ_w o peso específico da água

A Figura 7.7 mostra a variação dos coeficientes de permeabilidades, calculados e medidos, com a tensão efetiva.

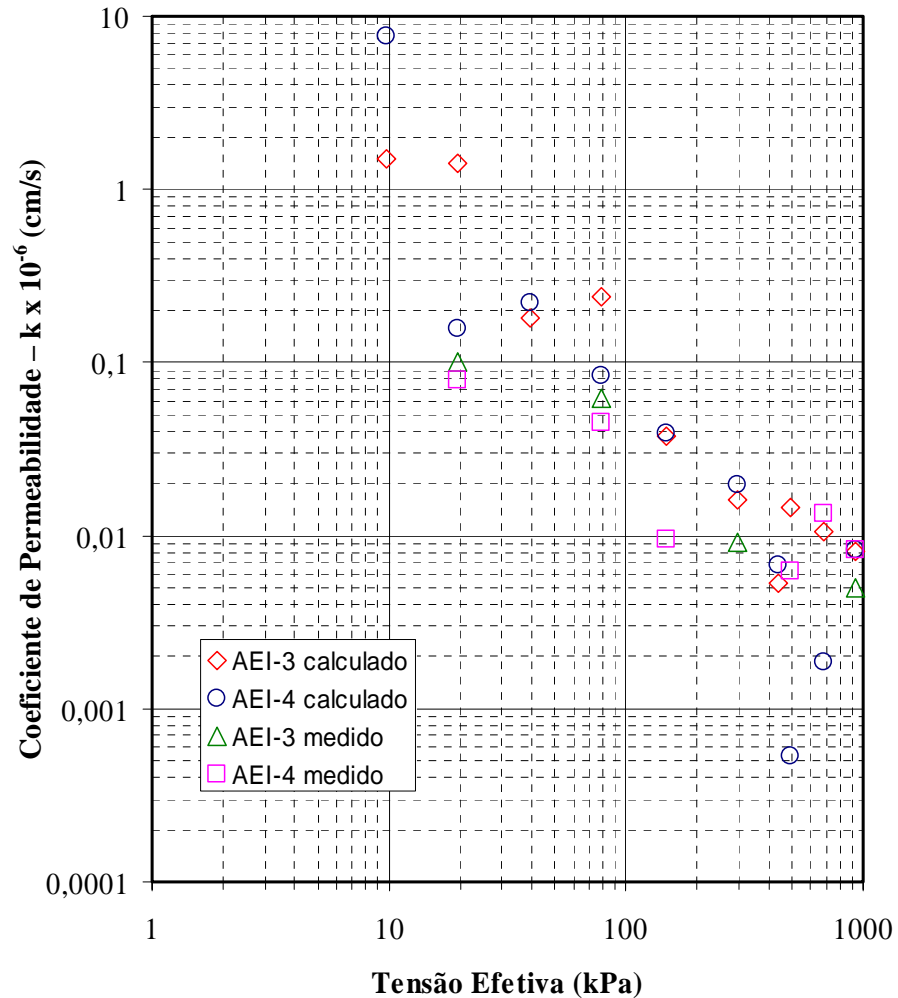


Figura 7.7 – Gráfico $\sigma' \times k$ dos ensaios de adensamento AEI-3 e AEI-4

Observou-se uma tendência de diminuição da permeabilidade com o aumento do nível de tensões, sendo que, para uma mesma tensão efetiva, os valores de permeabilidade muitas vezes encontram-se dispersos (com variações de até uma ordem de grandeza). Analisando a permeabilidade em função dos índices de vazios, conforme a Figura 7.8, verificou-se uma melhor relação, que é dada por $e = 0,57 \cdot \ln(k) + 4,12$, com um coeficiente de correlação de 0,85.

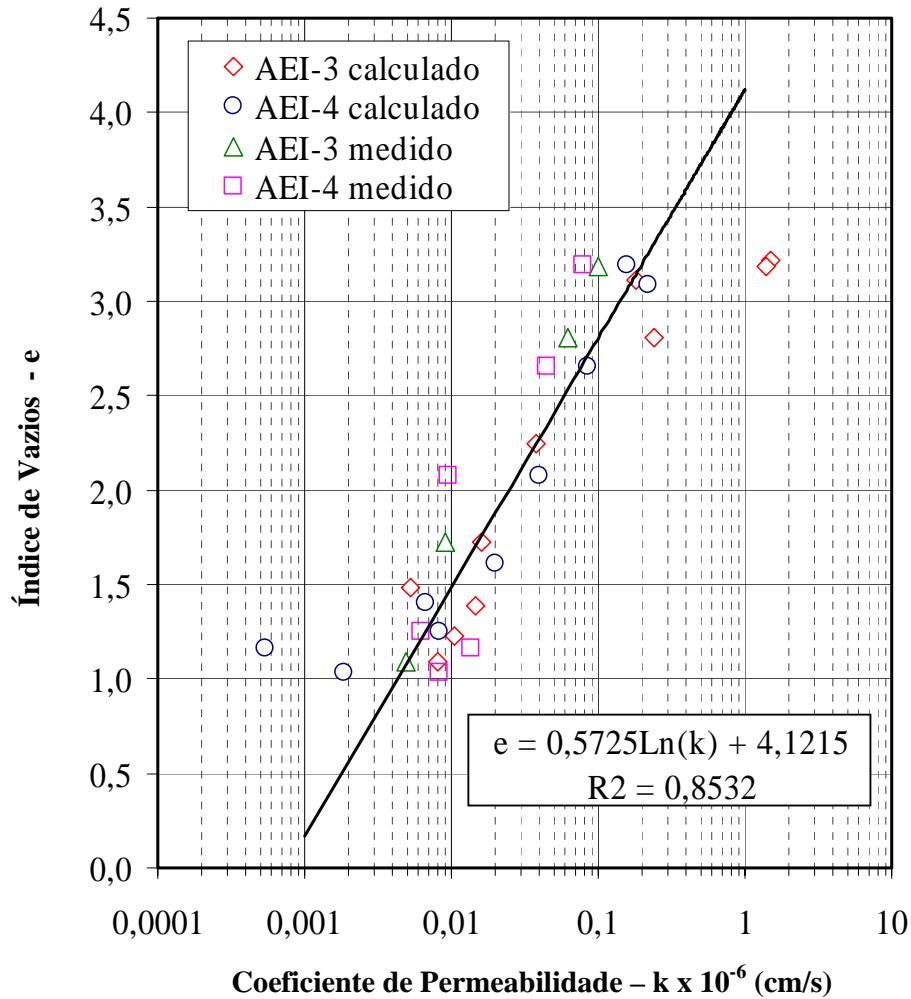


Figura 7.8 - Gráfico k x e dos ensaios de adensamento AEI-3 e AEI-4

7.2.

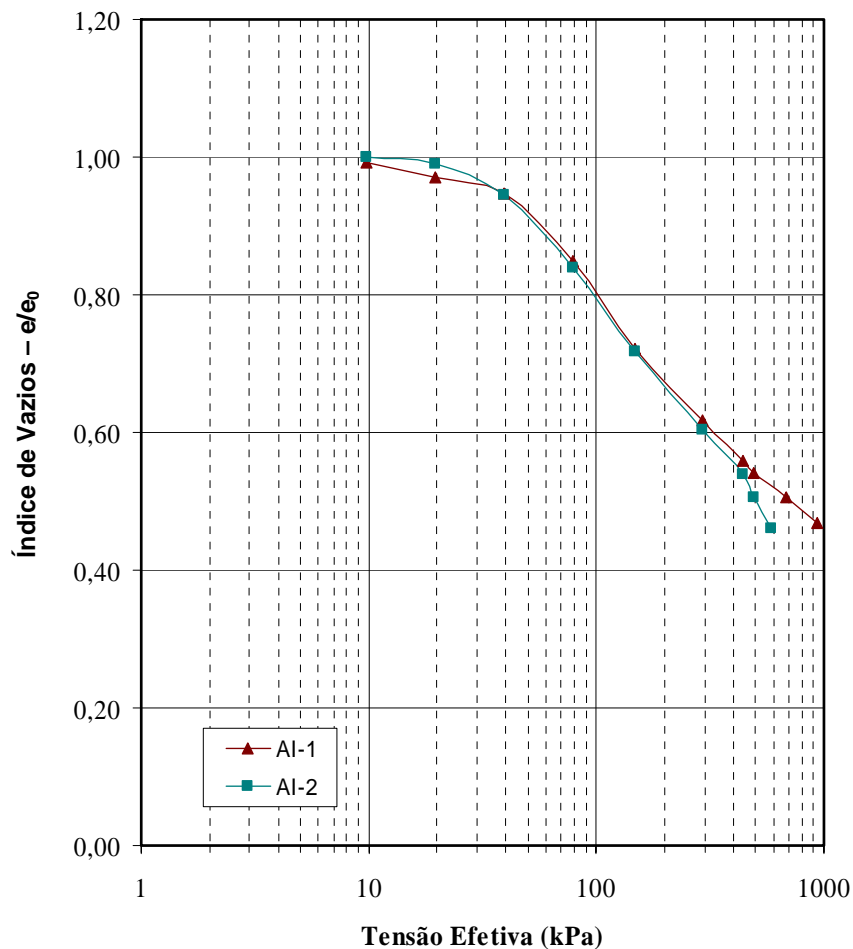
Ensaios de Adensamento Hidrostático

Os ensaios de adensamento hidrostático tiveram, como principal objetivo, propiciar informações quanto à velocidade de acréscimo de tensões a ser utilizada nos ensaios de adensamento anisotrópico, cujas análises encontram-se no Apêndice I, além de potencialmente contribuir para uma elaboração futura de um modelo de comportamento do depósito de solo mole estudado. Foram realizados dois ensaios, denominados de AI-1 e AI-2, cujas características iniciais dos seus corpos de prova encontram-se resumidas na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento hidrostático

Ensaio	Amostra	Gs	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w ₀ (%)	e ₀	S ₀ (%)
AI-1	AM-1	2,62	12,45	5,57	123,65	3,62	89,61
AI-2	AM-15	2,60	12,19	5,35	128,01	3,80	87,58

As curvas tensão-deformação ($\log \sigma' \times e$) desses ensaios estão apresentadas na Figura 7.9.

Figura 7.9 – Curvas $\log \sigma' \times e$ dos ensaios de adensamento hidrostático

Cabe ressaltar que se optou, no segundo ensaio, pela utilização de dreno lateral para acelerar a dissipação de poropressão no corpo de prova, entretanto, os resultados não incluem as correções decorrentes do uso do dreno lateral. A Figura 7.9 sugere que tal correção não seja necessária, já que as curvas apresentam-se praticamente coincidentes.

O comportamento dessas curvas foi semelhante ao dos ensaios edométricos, com o trecho de compressão virgem não retilíneo, indicando que as amostras ensaiadas eram de boa qualidade.

Verifica-se, para o segundo ensaio, AI-2, que após a pressão de 400kPa a curva apresenta um comportamento não esperado. Acredita-se que tal resultado possa ser devido a algum problema, não identificado, de medição de variação de volume, como por exemplo um vazamento ou interferências de origem elétrica no LGMA.

A Tabela 7.5 mostra os parâmetros de compressibilidade dos ensaios AI-1 e AI-2. O primeiro apresenta um CR com valor inferior ao observado nos ensaios de adensamento edométrico realizados em corpos de prova indeformados, enquanto que no ensaio AI-2, este parâmetro encontra-se bem mais próximo dos valores apresentados anteriormente.

Tabela 7.5 – Parâmetros de compressibilidade dos ensaios de adensamento hidrostático

Ensaio	e_0	c_c	$CR = \frac{c_c}{1 + e_0}$
AI-1	3,62	1,26	0,27
AI-2	3,80	1,66	0,36

A tensão de pré-adensamento estimada para os dois ensaios, pelo Método de Pacheco Silva, foi de 50 kPa para a amostra AI-1 e de 48kPa para a amostra AI-2. Estes valores, apesar de serem semelhantes, não confirmam o resultado obtido pelos ensaios edométricos.

A variação volumétrica em função do nível de tensões está apresentada na Figura 7.11. As curvas, apesar de terem um comportamento diferente no início, apresentam a mesma tendência observada nos ensaios edométricos, com o m_v aumentando para pressões inferiores à tensão de pré-adensamento, e diminuindo sensivelmente para as pressões correspondentes ao trecho de compressão virgem. A região destacada nesta figura representa a faixa onde se encontra a tensão de pré-adensamento calculada pelos ensaios de adensamento hidrostático.

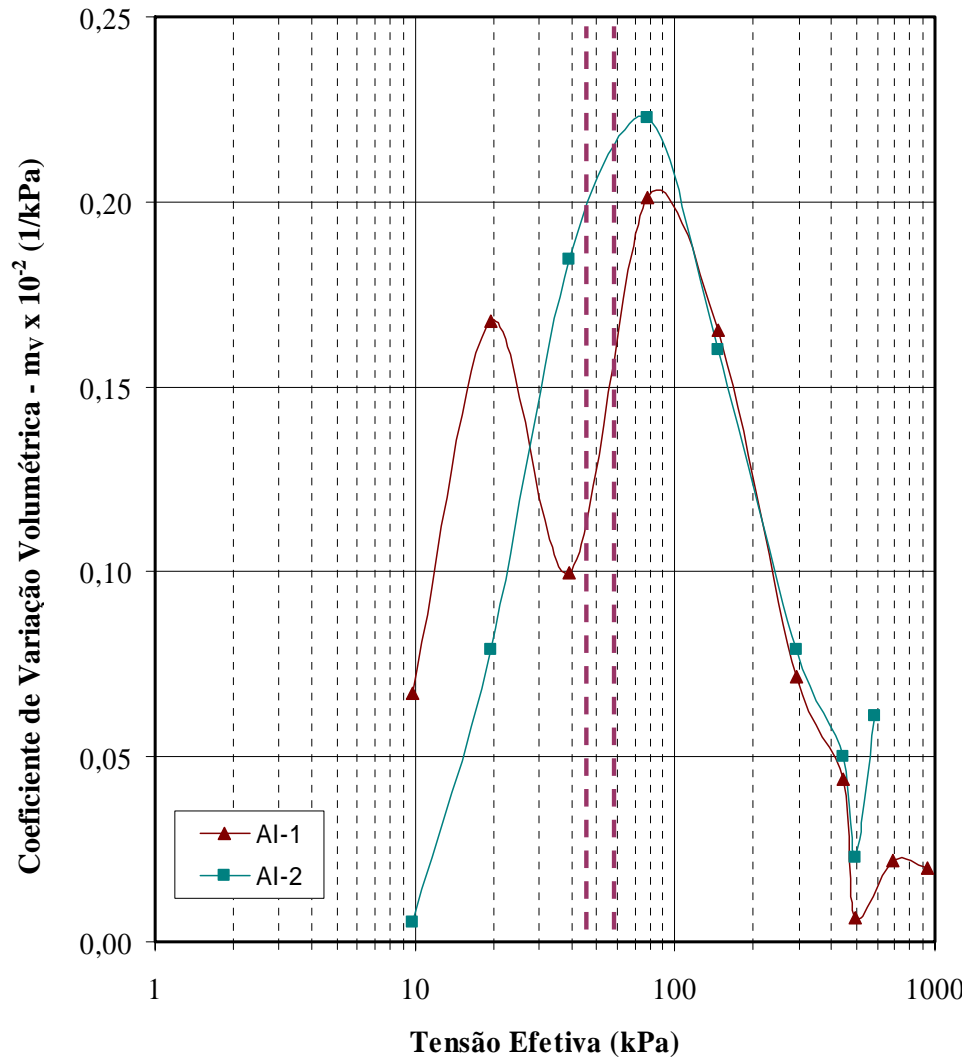


Figura 7.10 - Curvas $\log \sigma' \times m_v$ dos ensaios de adensamento hidrostático

Notou-se nestes ensaios, a enorme variação de volume que os corpos de prova sofreram ao longo dos ensaios, como pode ser observado pela variação do diâmetro da amostra e pela membrana, mostradas na Figura 7.12. Ao final da pressão de 500kPa, os corpos de prova apresentavam deformações volumétricas de aproximadamente 42%.

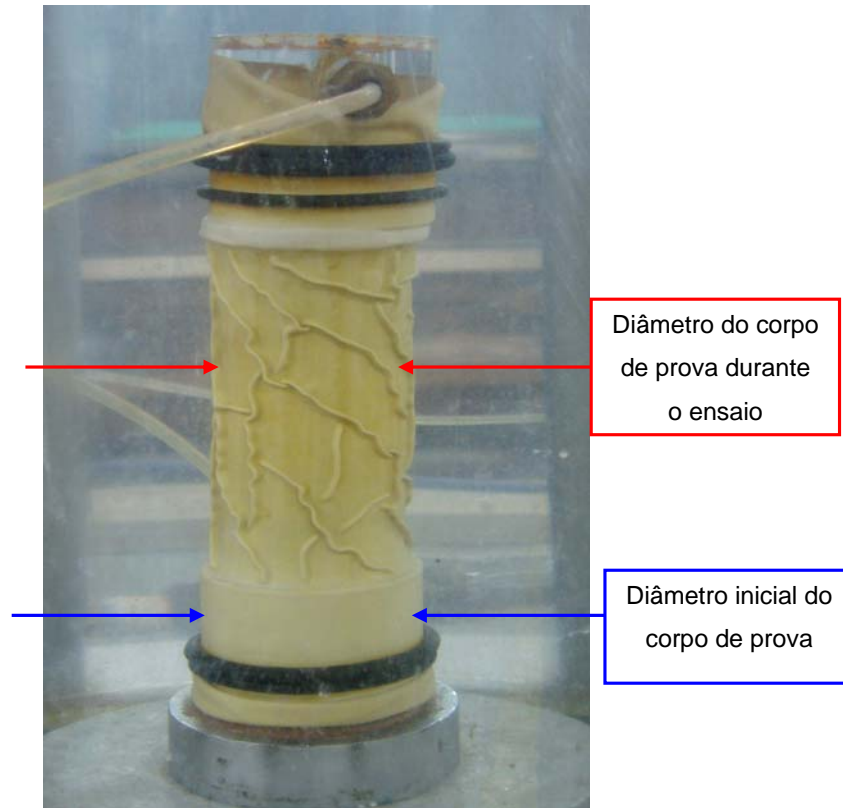


Figura 7.11 – Corpo de prova durante o ensaio de adensamento hidrostático

7.3. Ensaio de Adensamento Anisotrópico

Os ensaios de adensamento anisotrópico foram realizados com o intuito de contribuir para uma futura implementação de um modelo de comportamento do depósito de solo mole estudado.

Esses ensaios consistiram em adensar o corpo de prova com diversas relações

$K = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ constantes, controladas ao longo do ensaio. Após a fase de adensamento, as amostras foram submetidas ao cisalhamento não drenado, porém, esses dados não serão apresentados por fugirem do escopo do presente trabalho.

As características iniciais dos corpos de prova encontram-se apresentadas na Tabela 7.6 e os resultados individuais de cada ensaio encontram-se no Anexo V.

Os ensaios, cujos corpos de prova foram envolvidos com dreno lateral, não tiveram seus resultados corrigidos pelo uso do dreno.

Tabela 7.6 - Características dos corpos de prova dos ensaios de adensamento anisotrópicos

Ensaio	Amostra	G _s	γ _t (kN/m ³)	γ _d (kN/m ³)	w ₀ (%)	e ₀	S ₀ (%)
K=1,0 sem dreno	AM-3	2,53	12,89	5,53	132,87	3,47	96,57
K=1,0 com dreno	AM-6	2,65	13,22	5,83	126,83	3,45	97,22
K=0,9	AM-3	2,53	12,81	6,06	111,57	3,08	91,20
K=0,8	AM-4	2,51	13,26	5,93	123,79	3,15	98,53
K=0,8 repetido	AM-15	2,60	13,10	5,81	125,40	3,39	96,24
K=0,7	AM-4	2,51	12,98	5,72	127,12	3,30	96,48
K=0,6	AM-4	2,51	13,07	5,88	122,33	3,18	96,31
K=0,6 repetido	AM-7	2,62	13,40	6,49	106,50	2,95	94,32
K=0,5	AM-5	2,45	12,71	5,95	113,42	3,03	91,61
K=0,5 repetido	AM-15	2,60	13,49	6,28	114,68	3,08	97,30

As curvas $s' \times v$ obtidas nos ensaios de K constante estão apresentadas na Figura 7.12. Deve-se notar que optou-se por apresentar tais curvas em um gráfico onde se tem o volume específico, v , no eixo vertical. Tal variável, amplamente utilizada na modelagem do comportamento de solos, é definida como:

$$v = 1 + e,$$

onde v é o volume específico e e o índice de vazios do solo.

Novamente observa-se um paralelismo entre as curvas, que é confirmado pelos índices de compressão, apresentados na Tabela 7.7. Comparando-se estes parâmetros com os das Tabela 7.3, percebe-se que os valores de CR encontram-se bem próximos para os ensaios de adensamento edométrico e os anisotrópicos.

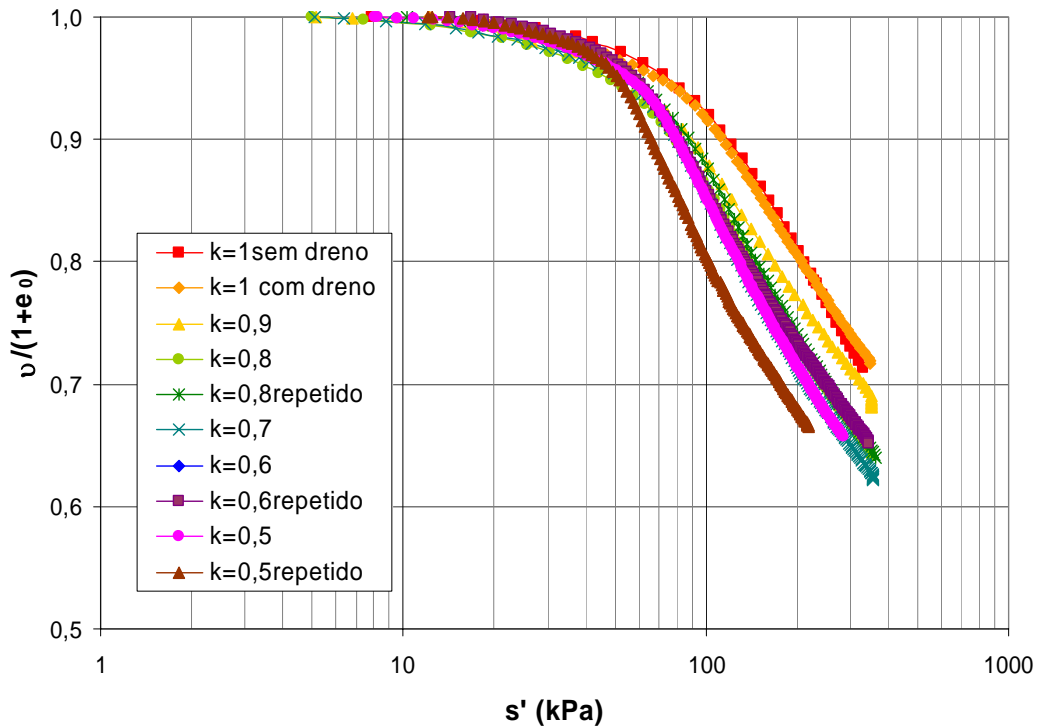


Figura 7.12 – Curvas tensão-deformação dos ensaios de adensamento anisotrópicos

Tabela 7.7 – Parâmetros de compressibilidade dos ensaios anisotrópicos

Ensaio	e_0	c_c	$CR = \frac{c_c}{1 + e_0}$
K=1,0 sem dreno	3,47	1,78	0,40
K=1,0 com dreno	3,45	1,56	0,35
K=0,9	3,08	1,49	0,36
K=0,8	3,15	1,66	0,40
K=0,8 repetido	3,39	1,93	0,44
K=0,7	3,30	1,80	0,42
K=0,6	3,18	1,66	0,52
K=0,6 repetido	2,95	1,53	0,39
K=0,5	3,03	1,82	0,45
K=0,5 repetido	3,08	1,76	0,43

Outra observação em relação à Figura 7.10 é que todos os trechos de compressão virgem dos ensaios estão situados à esquerda das curvas dos ensaios hidrostáticos. Deve-se notar que a reta formada pelo trecho de compressão virgem dos ensaios hidrostáticos possui um significado especial, ela separa o estado possível, à sua esquerda, do impossível, à sua direita (Atkinson & Bransby, 1978, pág. 129).

Os caminhos de tensões efetivas seguidos em cada ensaio estão mostrados na Figura 7.13, onde $s' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2}$ e $t = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$. Conforme o esperado, a inclinação das curvas formadas pelos caminhos aumentou conforme o K diminuía. Nota-se, nesta Figura, que a condição de K constante só foi efetivamente alcançada, em todos os ensaios, para valores de s' maiores que cerca de 100kPa, ou seja, quando as amostras se encontravam em um domínio correspondente ao do material normalmente adensado. Nota-se, também, uma aparente não repetibilidade de caminhos de tensões nos ensaios com $K = 0,6$ e $0,8$, repetibilidade esta conseguida nos ensaios com $K = 1,0$ e $0,5$. Nenhuma justificativa razoável para as faltas de repetibilidade observadas foi conseguida, sendo, portanto, necessárias investigações adicionais que possibilitem avaliar se as mesmas decorreram de eventuais aspectos relativos ao controle dos ensaios ou a características iniciais dos corpos de provas ensaiados.

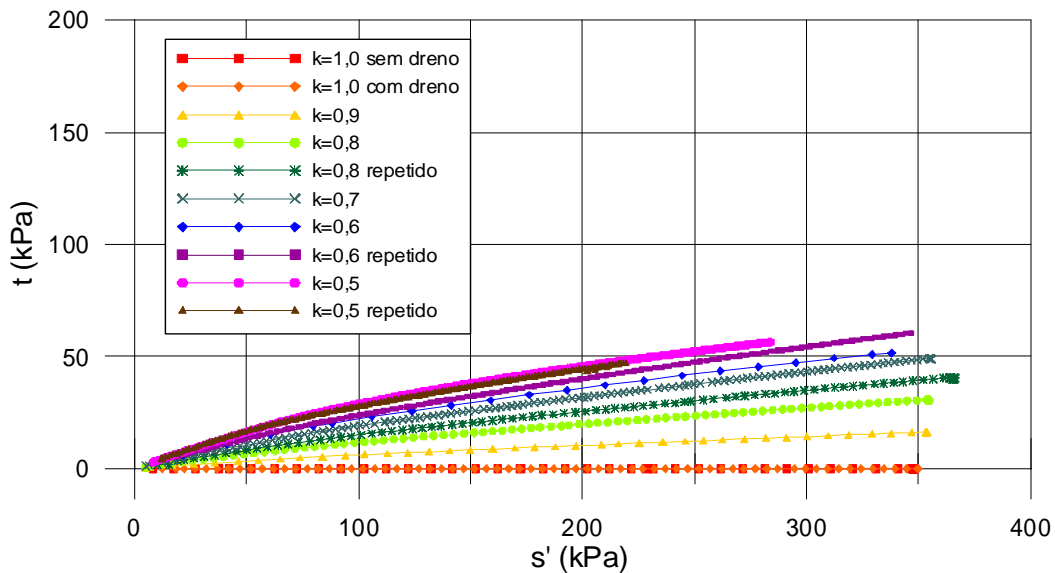


Figura 7.13 – Caminhos de tensões efetivas dos ensaios anisotrópicos

Analisando as deformações radiais desses ensaios, tentou-se estimar o coeficiente de empuxo em repouso, K_0 , do solo em sua condição normalmente adensada. No gráfico *deformação axial x deformação radial*, da Figura 7.14, nota-se que os ensaios realizados com $K=0,5$ apresentam uma deformação radial negativa ao longo de todo o ensaio, e que os realizados com $K=0,6$ têm inicialmente uma deformação radial positiva, que posteriormente decresce até ficar negativa e assim permanece até o final do ensaio. Esses resultados sugerem que o K_0 se encontra entre 0,5 e 0,6.

Neste gráfico, verifica-se também que o ensaio realizado com $K=0,7$ não está apresentando bons resultados. Provavelmente o mesmo foi iniciado sem que o *top cap* estivesse totalmente encostado no corpo de prova.

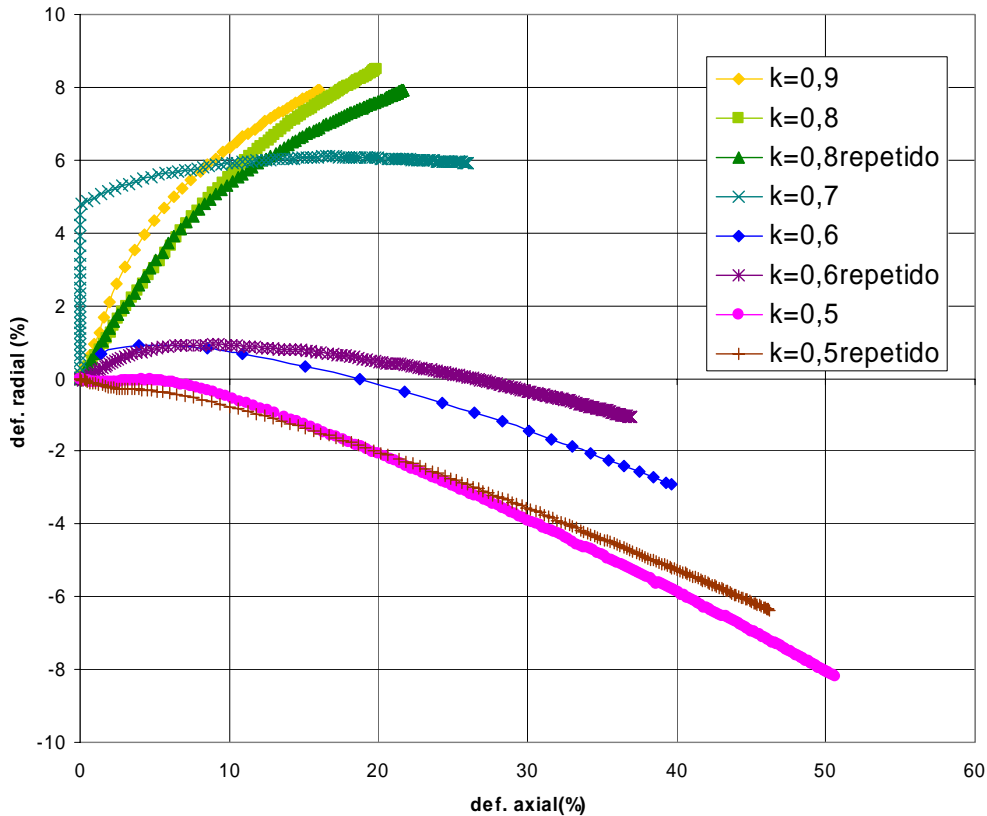


Figura 7.14 – Curva *deformação axial x deformação radial* dos ensaios anisotrópicos

Na tentativa de estimar o K_0 utilizou-se, da Figura 7.14, os pontos do gráfico onde a deformação radial era nula. Com os seus respectivos s' e t traçou-se uma “envoltória” correspondente ao K_0 , obtendo um valor de $K_0=0,62$ (Figura 16).

Outra maneira usual de se obter o K_0 é a partir da correlação $K_0 = (1 - \sin \phi')$ proposta por Jaky (1944), onde ϕ' é o ângulo de atrito do solo obtido pela envoltória de resistência. Apesar de não estarem apresentados no presente trabalho, por fugirem do seu escopo, foram realizados, em amostras de solo da profundidade de 3,50 a 4,00 metros, ensaios triaxiais não drenados (CIU). Estes foram executados em corpos de prova com 38,2mm de diâmetro, na mesma prensa triaxial dos ensaios de adensamento hidrostático, descrita no Capítulo 5, com medida de poropressão na base.

A Figura 7.15 mostra os caminhos de tensão efetiva e a envoltória dos ensaios CIU, que apresentou coesão nula e ângulo de atrito de aproximadamente $26,3^\circ$. Pela correlação $K_0 = (1 - \sin \phi')$ se obteve um K_0 de 0,56.

É importante destacar que esses resultados estão corrigidos pelos efeitos de membrana e do dreno lateral, de acordo com Henkel & Gilbert (1954).

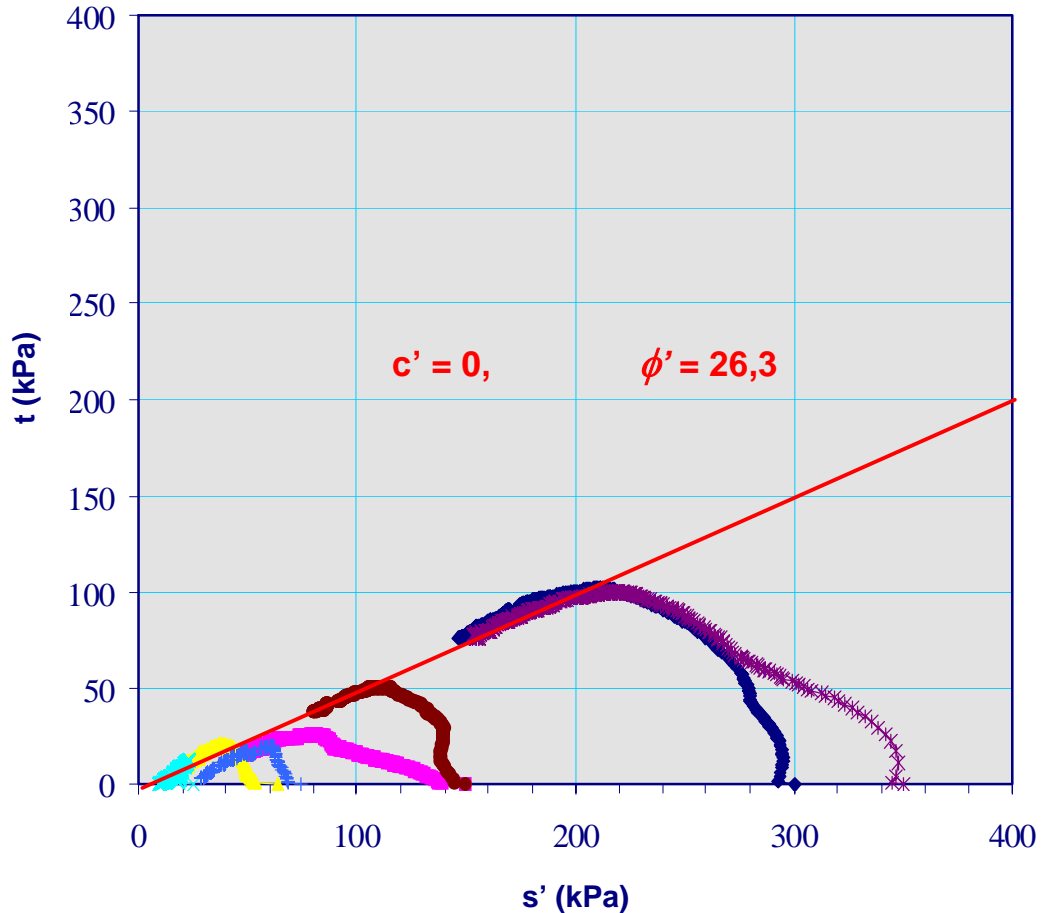


Figura 7.15 – Envoltória de resistência dos ensaios CIU

A Figura 7.16 mostra os dois caminhos K_0 estimados, juntamente com as envoltórias obtidas nos ensaios de adensamento anisotrópico.

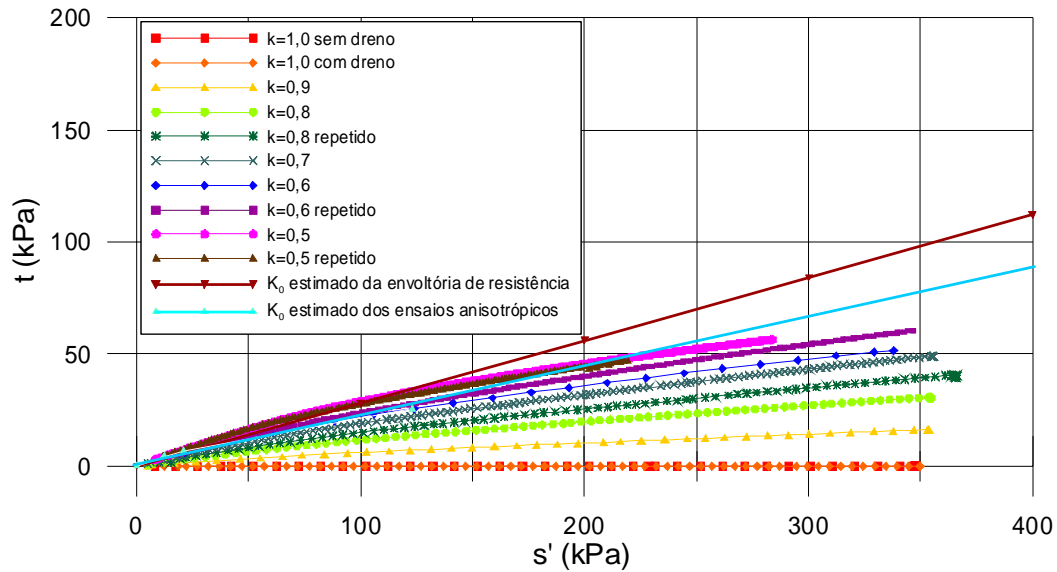


Figura 7.16 – Caminhos de tensão efetiva incluindo as estimativas de K_0

7.4. Discussão e Comparação de Resultados

7.4.1. Efeitos de Amostragem

Conforme mencionado no capítulo 2 desta dissertação, a qualidade dos processos de amostragem tem sido motivo de muita preocupação no meio geotécnico. Diversos estudos mostram a influência de uma amostra de má qualidade nos resultados dos ensaios de adensamento, e indicam que o uso desses dados pode levar a erros de projeto.

Diante desse fato, houve no presente trabalho a preocupação em se obter amostras e, conseqüentemente resultados, de boa qualidade. Além dos cuidados no processo de amostragem, adotou-se o procedimento sugerido por Ladd & DeGroot (2004) para extrair o solo do shelby no laboratório.

Foi realizada uma avaliação da qualidade das amostras, baseada no critério primeiramente proposto por *Lunne et al.* (1997), posteriormente adaptado para o caso de solos moles brasileiros por Oliveira (2002). Este critério, que está apresentado na Tabela 7.8, é proposto para amostras de ensaios edométricos e

utiliza a relação $\frac{e_{v_0} - e_o}{e_o}$, onde e_{v_0} é o índice de vazios corresponde à tensão

efetiva de campo e e_o é o índice de vazios inicial do corpo de prova.

Tabela 7.8 - Critério de avaliação de qualidade de amostras (Oliveira, 2002)

	Muito Boa a Excelente	Boa a Regular	Pobre	Muito Pobre
$\frac{e_{v0} - e_0}{e_0}$	< 0,05	0,05 – 0,08	0,08 – 0,14	>0,14

As amostras avaliadas foram as dos ensaios de adensamento edométrico AEI-1, AEI-2, AEI-3 e AEI-4. Como o critério proposto por Oliveira (2002) é baseado em ensaios com estágios de 24 horas, obteve-se o e_{v0} de curvas tensão-deformação plotadas considerando o índice de vazios final de cada estágio como o correspondente ao de 24 horas. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Classificação da qualidade das amostras

Ensaio	e_0	e_{v0}	$\frac{\Delta e}{e_0}$	Classificação
AEI-1	3,16	3,10	0,02	Muito boa a excelente
AEI-2	3,31	3,18	0,04	Muito boa a excelente
AEI-3	3,24	3,14	0,03	Muito boa a excelente
AEI-4	3,41	3,09	0,09	Pobre

De acordo com o critério de avaliação utilizado, as amostras dos ensaios AEI-1, AEI-2 e AEI-3 são de boa qualidade. Entretanto, a do ensaio AEI-4 é considerada pobre. Como os procedimentos de retirada das amostras no campo e a preparação dos corpos de prova no laboratório foram os mesmos, e as características das amostras ensaiadas eram bem semelhantes, acredita-se que a classificação de má qualidade do ensaio AEI-4 seja uma particularidade deste corpo de prova. A aparente má qualidade desta amostra justifica os comportamentos observados nas curvas do ensaio EAI-4 apresentadas nas Figuras 7.1 e 7.4 quando comparados com os dos demais ensaios.

Segundo Martins & Lacerda (1994), outra maneira de avaliar a qualidade da amostra é observar se o trecho de compressão virgem na curva $\sigma' \times e$ e não se apresenta retilíneo. Essa tendência foi observada para todos os ensaios, como se pode verificar nas Figuras 7.1, 7.9 e 7.12.

Correia & Lacerda (1982) mencionaram a influência do amolgamento na curva $m_v \times \log \sigma'_v$. Esta curva apresenta um pico na região na tensão de pré-adensamento, e quanto menor a perturbação da amostra, mais pronunciado é o máximo desta curva. Os autores também sugerem que, em amostras de boa qualidade, uma estimativa da tensão de pré-adensamento seria utilizar a pressão

correspondente ao ponto médio entre o ponto de inflexão e o ponto máximo da curva $m_v \times \log \sigma'_v$. A Figura 7.3 ilustra essa tendência para o ensaio AEI-1, sendo que todos os demais ensaios mostraram essa mesma resposta.

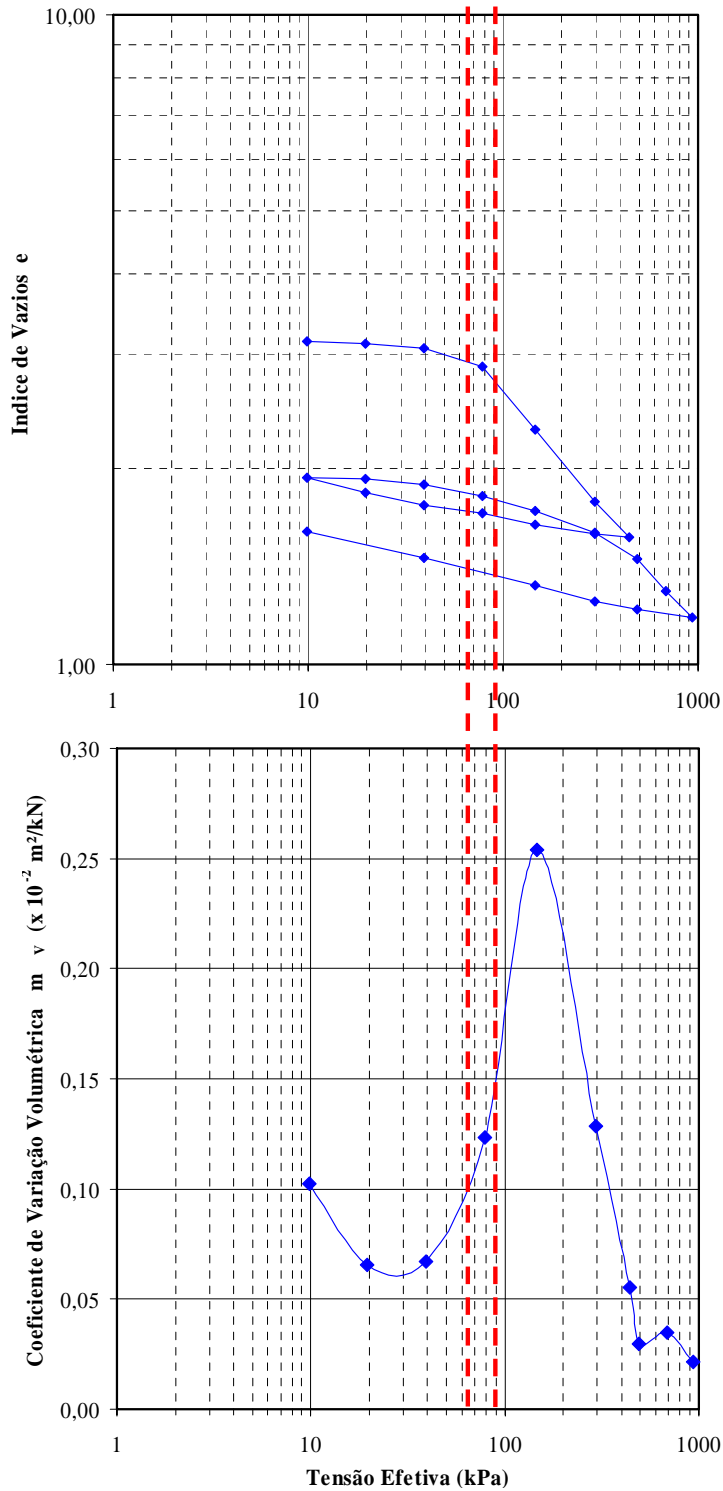


Figura 7.17 – Comparação das curvas $\log \sigma'_v \times e$ e $\log \sigma'_v \times m_v$

Diante da compatibilidade dos resultados obtidos com as avaliações de qualidade de amostras propostas na literatura, considerou-se, com exceção do ensaio EAI-4, que todas as amostras ensaiadas presentes nesta dissertação são de boa qualidade.

Esta análise da qualidade das amostras mostrou-se importante para o presente trabalho, já que os procedimentos de amostragem no campo e de extrusão das amostras no laboratório adotados não foram convencionais. Com os resultados obtidos verificou-se também a importância de seguir os cuidados recomendados por Ladd & DeGroot (2004).

7.4.2.

Características de Adensamento e Permeabilidade

O depósito de argila mole estudado, para a profundidade investigada, apresentou-se levemente pré-adensado, com uma tensão de pré-adensamento da ordem de 78 kPa e um OCR de 1,95. Santos (2004) também observou em seu trabalho um OCR próximo de 2 para a profundidade de 2 metros.

Conforme mencionado anteriormente, este leve pré-adensamento também foi observado em outras regiões da Baixada Fluminense, como por exemplo em Sarapuí (Almeida *et al.*, 2005), e pode estar associado a diversos fatores, tais como:

- História geológica dos depósitos;
- Efeitos de envelhecimento, associados à compressão secundária;
- Ressecamento, associado a variações climáticas ou do nível d'água.

O solo estudado apresenta, para a profundidade de 3,50 a 4,00 metros, um coeficiente de adensamento, c_v , de $5,75 \times 10^{-3}$ cm²/s. Este valor quando comparado com os estudos de Aragão (1975) e Santos (2004) mostra-se próximo do encontrado por Santos, que variou de $6,25 \times 10^{-3}$ a $8,0 \times 10^{-3}$ cm²/s para a profundidade de 2 metros, entretanto diferente do encontrado por Aragão (1975), que foi de $2,7 \times 10^{-4}$ cm²/s para uma profundidade próxima da do presente trabalho.

Aragão, observou em sua pesquisa uma razoável dispersão nos valores de c_v ao longo da profundidade, e a relaciona aos diferentes graus de pré-adensamento

ao longo da camada, o que implicaria em diferentes efeitos de amolgamento durante a extração e manuseio das amostras. Essa pode ser uma explicação para os diferentes valores de c_v observados no presente trabalho e o obtido por Aragão (1975).

Este parâmetro, quando comparado com os dos demais locais da Baixada Fluminense, apresentados na Tabela 2.3 do Capítulo 2, encontra-se na média.

A permeabilidade média obtida dos ensaios de adensamento edométricos com medida de permeabilidade, AEI-3 e AEI-4, para a profundidade em estudo, foi de $2,0 \times 10^{-9}$ m/s. Comparando com os obtidos por Santos (2004), de $6,2 \times 10^{-9}$ e $8,8 \times 10^{-9}$ m/s, verifica-se que os valores encontram-se na mesma ordem de grandeza de 10^{-9} m/s. Estes ainda encontram-se dentro da gama de valores encontrada por Almeida *et al.* (2005) para a argila de Sarapuí, que apresentou valores variando de 24×10^{-8} m/s a 3×10^{-9} para a região sobreadensada.

7.4.3. Características de Compressibilidade

Os parâmetros de compressibilidade obtidos no presente trabalho estão comparados, na Tabela 7.10, com os obtidos por Aragão (1975) e Santos (2004) para a região de Santa Cruz e por Almeida *et al.* (2005) para Sarapuí. Verifica-se uma compatibilidade nos valores de CR, com exceção do obtido por Santos (2004).

Tabela 7.10 – Comparação dos parâmetros de compressibilidade com dados da literatura

Parâmetro	Presente trabalho	Aragão (1975)	Santos (2004)	Almeida <i>et al.</i> (2005)
c_c	1,87	1,70	0,75 a 0,84	1,3 a 3,2
c_e	0,24	0,15	0,10	-
$CR = \frac{C_c}{(1+e_0)}$	0,44	0,40	0,25	0,41
c_e/c_c	0,13	0,09	0,12	0,12

Os valores correspondentes ao trabalho de Aragão foram obtidos diretamente das curvas apresentadas em sua pesquisa, para uma profundidade de aproximadamente 3,75 metros.

7.4.4. Estimativas de Recalque

Os parâmetros de compressibilidade apresentados na Tabela 7.10 podem ser utilizados para estimar o recalque primário do depósito de argila mole estudado. Para tal estimativa, considerou-se que os parâmetros obtidos para a profundidade de 3,50 a 4,00 metros podem ser extrapolados para o meio da camada de argila, ou seja, a 7,5 metros.

A Figura abaixo representa as condições do depósito argiloso antes e após a implantação da camada de aterro. Considerou-se nos dois casos que o nível d'água está no topo da camada de argila.

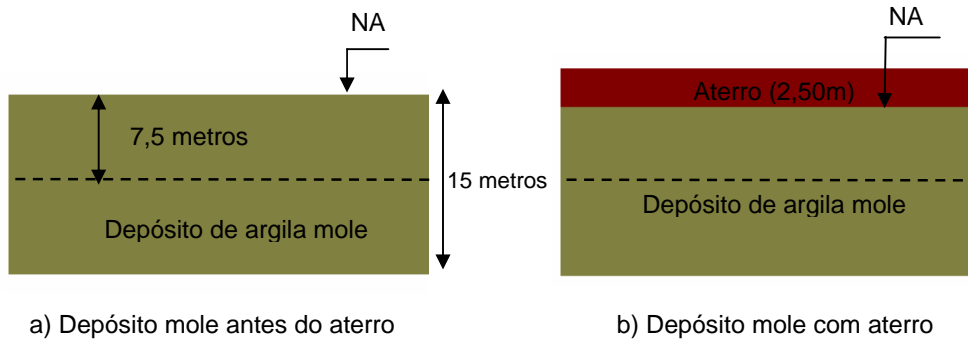


Figura 7.18 - Condições do depósito argiloso antes e após a implantação da camada de aterro

Adotando o peso específico do depósito mole de 13,13 kN/m³ e do aterro de 20 kN/m³, conforme indicado no capítulo 6, as tensões efetivas a 7,5 metros de profundidade são de 26 kPa e 76 kPa, respectivamente antes e depois do carregamento do aterro.

O recalque primário foi obtido pela formulação $\rho = \frac{c_c}{1+e} \cdot H \cdot \log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)$, onde H

corresponde à espessura da camada de solo mole e σ_1 e σ_2 correspondem, respectivamente, às tensões efetivas atuantes no solo antes e após o carregamento.

Desse modo, o recalque primário, ρ , foi estimado em 3,07 metros.

Já o recalque final por compressão secundária, segundo Sandroni (2006), pode ser estimado para carregamentos que ultrapassem a pressão de pré-adensamento, ou seja, que estejam normalmente adensados, através da seguinte formulação:

$$\varepsilon_{af} = \left(\frac{c_c}{1+e} \cdot (1-N) \cdot \log OCR_f \right),$$

onde ε_{af} é a deformação específica secundária final e $N = c_r/c_c$.

Sandroni (2006), baseado em dados experimentais, recomenda valores de N de 0,13 e um OCR_f de 1,5. Observa-se que os valores recomendados encontram-se próximos dos obtidos neste trabalho.

Para a estimativa do recalque secundário do depósito mole em estudo, adotou-se a média dos parâmetros obtidos dos ensaios de adensamento edométrico realizados em corpos de prova indeformados do presente trabalho, ou seja:

- $\frac{c_c}{1+e}$ de 0,45,
- N de 0,16
- OCR de 1,95

Desse modo, obteve-se uma deformação específica secundária de 11%. Considerando a espessura do depósito argiloso de 15 metros, o recalque secundário estimado é de 1,65 metros.

Considerando os recalques primário e secundário calculados, o recalque total a ser esperado para a camada de argila mole, estimado a partir dos dados de laboratório, é de 4,72m.

De acordo com laudo de sondagens SPT realizado na década de 70 na área da Subestação, que se encontra apresentado no Capítulo 3 do presente trabalho, o depósito argiloso possuía uma espessura de aproximadamente 15 metros. Novas investigações realizadas nesta área em 2005 (de Campos *et al.*, 2005) informaram que esta espessura estaria hoje em torno de 11 metros.

Partindo do pressuposto que as estimativas de recalque estão corretas, e considerando as informações de campo mencionadas, supõe-se que a camada de argila mole, na área investigada, pode ter sofrido até o momento um recalque

da ordem de 4m, é de se esperar que ainda deva ocorrer nesta camada um recalque de origem secundária da ordem de 0,50m.