

## 7 Compressibilidade

A avaliação da colapsibilidade e expansão de solos não saturados em laboratório é realizada, normalmente, por meio de ensaios edométricos. Esses ensaios também são utilizados na obtenção de parâmetros de deformabilidade ( $E_{oed}$ ,  $C_c$  ou  $\lambda$ ,  $C_s$  ou  $\kappa$ ) e a tensão de escoamento ( $\sigma_{vm}$ ) a serem utilizados em modelos constitutivos, bem como para a identificação das deformações específicas de colapso ( $\varepsilon_c$ ) ou expansão ( $\varepsilon_e$ ). Esses parâmetros, nos solos residuais, podem ser mascarados por características como cimentação e estrutura.

Buscando-se entender a história de tensões e avaliar parâmetros de compressibilidade dos solos residuais, os trabalhos de laboratório contemplaram a execução de ensaios de adensamento com corpos de prova indeformados inundados nos solos ao longo do perfil e não saturados no Solo Marrom. Nos próximos itens esses ensaios são apresentados e discutidos.

### 7.1. Ensaio de Adensamento Inundado em Amostras Indeformadas

A realização dos ensaios de adensamento inundado faz parte da tese de Ligocki (2008), onde os parâmetros de compressibilidade e demais informações sobre os solos Branco, Amarelo, Laranja e Vermelho podem ser encontrados. No presente trabalho os resultados são apresentados com o objetivo de se identificar a tensão de cedência dos solos. Ainda o comportamento observado no ensaio com o solo Marrom inundado será comparado com o comportamento de compressibilidade do mesmo solo não-saturado.

Os ensaios foram conduzidos em células de adensamento do tipo anel fixo, com drenagem dupla. As prensas utilizadas, procedentes do fabricante italiano *Controls*, possuem um sistema de carregamento frontal, sendo possível executar ensaios com pressões de até 9060 kPa (corpos de prova de 50 mm de diâmetro). Uma vista geral das prensas utilizadas nesta pesquisa está na Figura 7.1.



Figura 7.1 – Vista geral das prensas de adensamento.

Neste trabalho as amostras indeformadas foram carregadas em estágios de 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560 e 5120 kPa. Os corpos de prova foram inundados imediatamente após a aplicação da pré-carga de 10 kPa. Todos os estágios dos ensaios foram mantidos por no mínimo 24 horas. Esse período mostrou-se suficiente para o desenvolvimento do adensamento primário dos corpos de prova. As leituras da variação de altura foram efetuadas em relógios comparadores, nos tempos de 8 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 5 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h e 24 h após a aplicação da carga. Após a pressão máxima ter sido alcançada, procedeu-se ao descarregamento em estágios de 2560, 1280 e 320 kPa. Apenas para o solo Vermelho o ensaio atingiu 1280 kPa e o descarregamento foi realizado nos estágios de 640, 320, 160 e 80 kPa.

Na Tabela 7.1 são apresentados dados dos corpos-de-prova ensaiados. Os índices físicos dos corpos-de-prova estão condizentes com os resultados obtidos da caracterização das amostras.

Tabela 7.1 – Parâmetros obtidos dos ensaios de adensamento inundado em amostras indeformadas.

<b>Parâmetros / Amostra</b>	<b>Branco 2.4202.05</b>	<b>Amarelo 2.4021.05</b>	<b>Laranja 2.4017.05</b>	<b>Vermelho 2.4047.07</b>	<b>Marrom 2.4117.05</b>
<b>Densidade inicial (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,69	1,68	1,58	1,63	1,64
<b>Densidade seca inicial (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,55	1,43	1,16	1,29	1,32
<b>Índice de vazios inicial (e<sub>0</sub>)</b>	0,69	0,89	1,37	1,13	1,05
<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,70	2,71	2,74	2,73	2,70
<b>Teor de umidade inicial (%)</b>	7,3	17,3	36,6	26,5	24,6
<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	27,8	52,8	73,5	64,3	64,1
<b>Índice de compressão C<sub>c</sub></b>	0,12	0,27	0,73	0,45	0,60
<b>Índice de expansão C<sub>s</sub></b>	0,02	0,04	0,04	0,003	0,07

A Figura 7.2 apresenta a relação entre o índice de vazios e o logaritmo da pressão efetiva dos ensaios de adensamento. As curvas dos corpos de prova indeformados apresentam um trecho inicial em que o comportamento do material é mais rígido. À medida que a tensão vertical aumenta, ocorre uma transição em direção a um possível trecho de carregamento virgem.

A diferença entre os valores de índice de vazios inicial prejudica a análise conjunta dos dados, por isso na Figura 7.3 os resultados são apresentados em função da deformação volumétrica normalizada, que é definida por:

$$\varepsilon_{vN} = \frac{\Delta e / (1 + e_0)}{e_0 / (1 + e_0)} = \frac{\Delta e}{e_0} \quad \text{(Equação 7.1)}$$

Observa-se que o solo que apresenta menor variação volumétrica normalizada é o solo Branco. Os demais solos apresentam comportamento similar. Apesar do solo Vermelho não ter sido carregado até pressões maiores, o início da sua curva é bastante parecida com a curva do solo Laranja. Esses dois solos são os que apresentam uma quebra de rigidez mais acentuada, a qual se manifesta logo no início da curva. O solo Marrom apresenta uma queda acentuada somente após 1.000 kPa. Os solos Branco e Amarelo têm comportamento mais linear, sem uma mudança de comportamento brusca, fato característico de solos menos intemperizados. Provavelmente a reta virgem desses dois materiais não foi alcançada com o nível de tensão aplicado no ensaio.

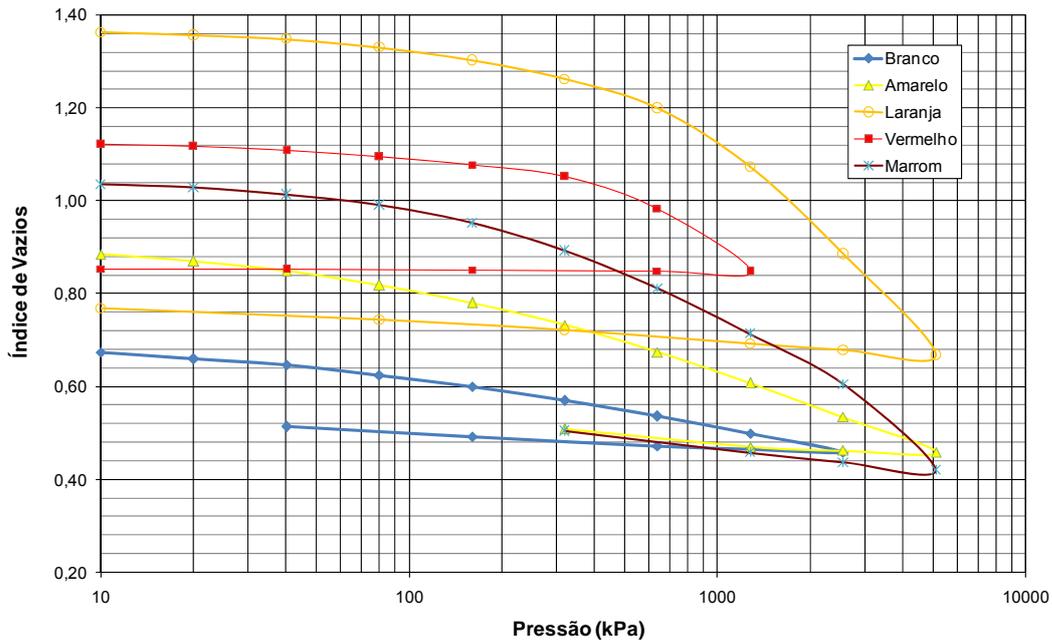


Figura 7.2 – Amostras indeformadas. Índice de vazios *versus* log pressão efetiva. Ensaio inundado.

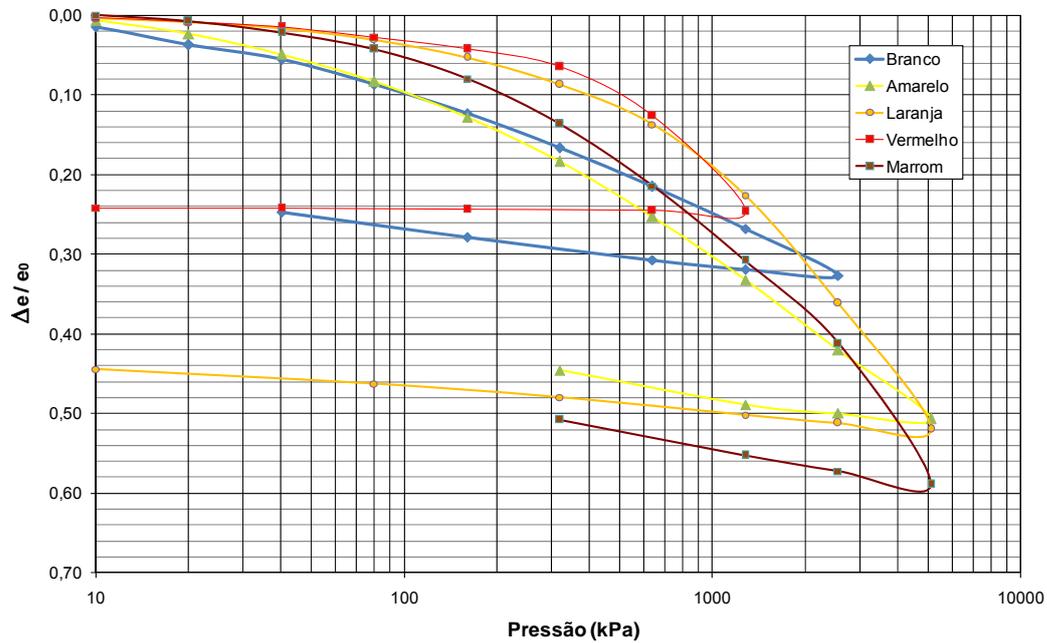


Figura 7.3 – Amostras indeformadas. Deformação volumétrica normalizada *versus* log pressão efetiva. Ensaio inundado.

O índice de compressão dos solos é maior para o solo Laranja, que apresenta um  $C_c$  de 0,73. O menor índice de compressão é do solo Branco, com  $C_c$  igual a 0,12, seguido do solo Amarelo com um  $C_c$  de 0,266. O solo Vermelho e o solo Marrom apresentam índices de compressão iguais a 0,451 e 0,6, respectivamente. Ou seja, há um aumento claro da rigidez com a profundidade.

O índice de expansão  $C_s$  (ou de descompressão) foi calculado com base na pressão máxima e no último estágio do descarregamento. Esse parâmetro é igual a 0,02 para o solo Branco e aumenta com o intemperismo, sendo igual a 0,07 para o solo Marrom. Esse fato mostra-se condizente com a mineralogia dos materiais. O solo Vermelho, no entanto, não apresentou expansão após o alívio de carga, o que pode estar relacionado a uma quebra da estrutura. Não observa-se relação entre os parâmetros de compressão e expansão.

Futai (2002) realizou ensaios de compressão edométrica em um perfil de solos residuais de gnaiss migmatizados, coletados na Bacia do Rio Maracujá (Ouro Preto, MG). Os parâmetros de compressão e expansão obtidos por esse pesquisador estão listados na Tabela 7.2. Apesar da variação do índice de vazios, que interfere na interpretação dos resultados, observa-se um aumento da rigidez com a profundidade, com exceção para o solo de 7 metros de profundidade. Os valores de  $C_c$  de Futai (2002) apresentam menor variação do que os valores obtidos no presente trabalho, mas a ordem de grandeza do parâmetro é comparável. Também nestes dados não há uma relação clara entre o índice de compressão e o de expansão dos solos.

Tabela 7.2 – Parâmetros de compressão edométrica (Futai, 2002).

<b>Prof. (m)</b>	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>C_s</math></b>	<b><math>e_0</math></b>
<b>exposto</b>	0,33	0,03	1,25
<b>1</b>	0,44	0,03	1,34
<b>2</b>	0,41	0,05	1,02
<b>3</b>	0,27	0,05	0,88
<b>4</b>	0,29	0,04	0,93
<b>5</b>	0,30	0,05	0,88
<b>6</b>	0,28	0,03	0,90
<b>7</b>	0,42	0,04	1,05

As curvas de compressibilidade obtidas por Futai (2002) encontram-se reproduzidas juntamente com as curvas do presente trabalho na Figura 7.4. Os resultados de Futai (2002) estão traçados em preto e referem-se aos solos de profundidades 2, 4, 6 e 7 m, e exposto. Apesar da grande diferença entre os índices de vazios iniciais dos corpos-de-prova, observa-se que, de modo geral, os solos de Ouro Preto são menos rígidos que os da presente tese e a inflexão da curva ocorre para valores de pressão também inferiores.

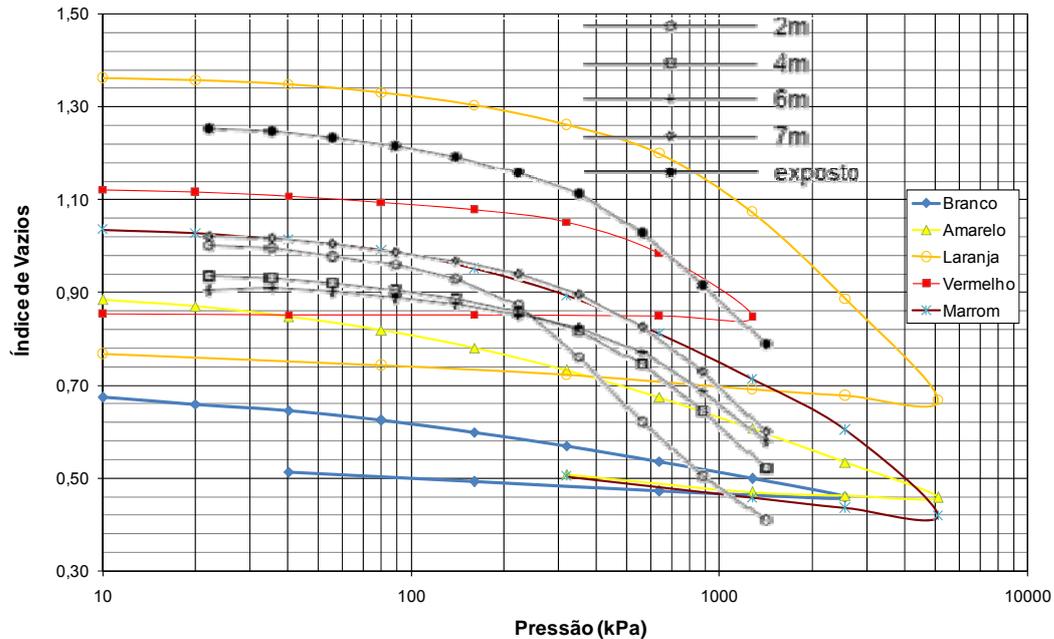


Figura 7.4 – Comparação entre as curvas de compressão obtidas no presente trabalho e as curvas obtidas de um perfil de solos residuais de gnaiss de Ouro Preto-MG (Futai, 2002).

A Figura 7.5 mostra curvas de compressão de um mesmo perfil de solo residual gnaiss de Machados-PE, designado por Espinhaço da Gata, obtidas por Souza Neto (1998 *apud* Futai, 2002), juntamente com as curvas do presente trabalho. Souza Neto apresenta três curvas, sendo o solo menos profundo (1,9 m) maduro e os outros dois (5,6 m e 8,7 m), jovens. As tensões de cedência desses solos de Pernambuco, assim como dos solos de Ouro Preto, são inferiores aos dos solos aqui estudados.

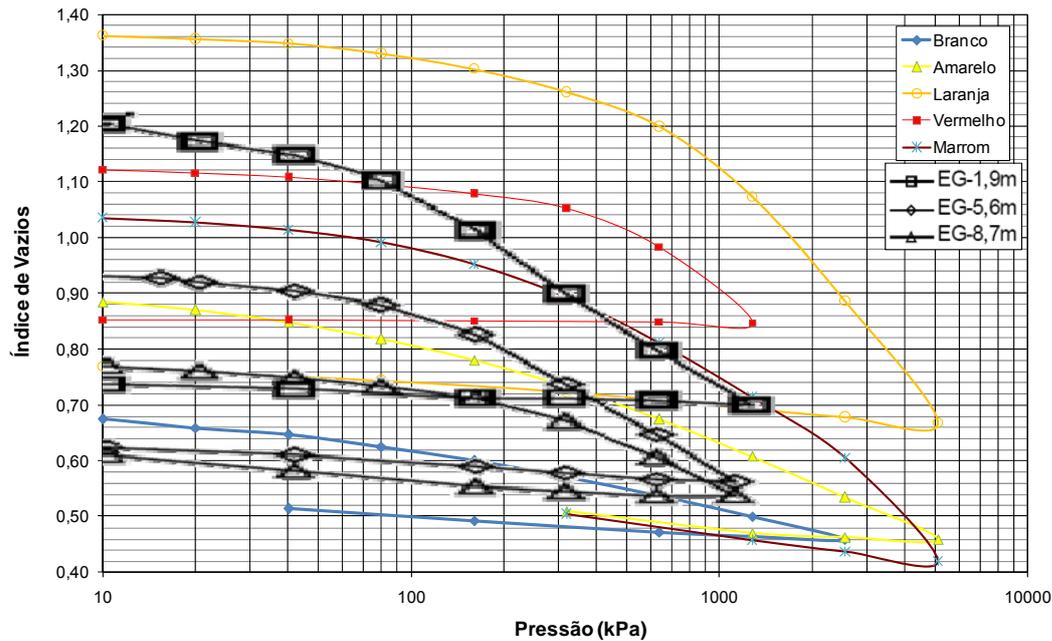


Figura 7.5 – Comparação entre as curvas de compressão obtidas no presente trabalho e as curvas obtidas de um perfil de solos residuais de gnaiss de Espinhaço da Gata-PE (Souza Neto, 1998 *apud* Futai, 2002).

Em relação à compressão dos solos, alguns pesquisadores citam correlações aceitáveis entre o índice de compressão e o índice de vazios inicial, para solos de mesma origem (Sowers, 1963; Souza Pinto *et al.*, 1993, *apud* Souza Neto *et al.*, 2001, Futai, 2002). A Figura 7.6 apresenta a relação entre o índice de vazios inicial e o índice de compressão dos corpos-de-prova ensaiados. O fator de correlação resultou igual a 0,878.

Futai (2002) reuniu valores de índice de compressão e índice de vazios de ensaios edométricos dos solos de origem Gnáissica (GN-), Granítica (GR-) e Liptinítica (LP-) de Ouro Preto (OP), Espinhaço da Gata (EG), Madureira (MA) e Morro Dona Marta-RJ (DM- sendo alguns “coluvionares” (-C) ou saprolíticos (-S). Esses dados estão representados juntamente com os dados do presente trabalho na Figura 7.7. Aparentemente não há uma tendência definida para a variação do coeficiente de compressibilidade,  $C_c$ , de acordo com a gênese dos solos, sendo que o mesmo mostra apenas uma tendência geral de aumentar com o índice de vazios inicial. Mas, a linha de tendência observada por Futai (2002), em preto na figura, não representa bem a variação encontrada para os solos deste trabalho.

A mudança de rigidez dos solos residuais é função da resistência entre partículas do solo e da interligação dos minerais (Futai, 2002). E, nos solos residuais, é possível ajustar duas retas definindo patamares de escoamento na

curva índice de vazios versus logaritmo da pressão, justificadas pela influência da estrutura (Futai, 2002). Nas figuras 7.8 a 7.12 são apresentadas as curvas de índice de vazios *versus* pressão vertical obtidas do ensaio edométrico com a identificação dos pontos onde se iniciam patamares lineares. Esses pontos são indicados por setas vermelhas.

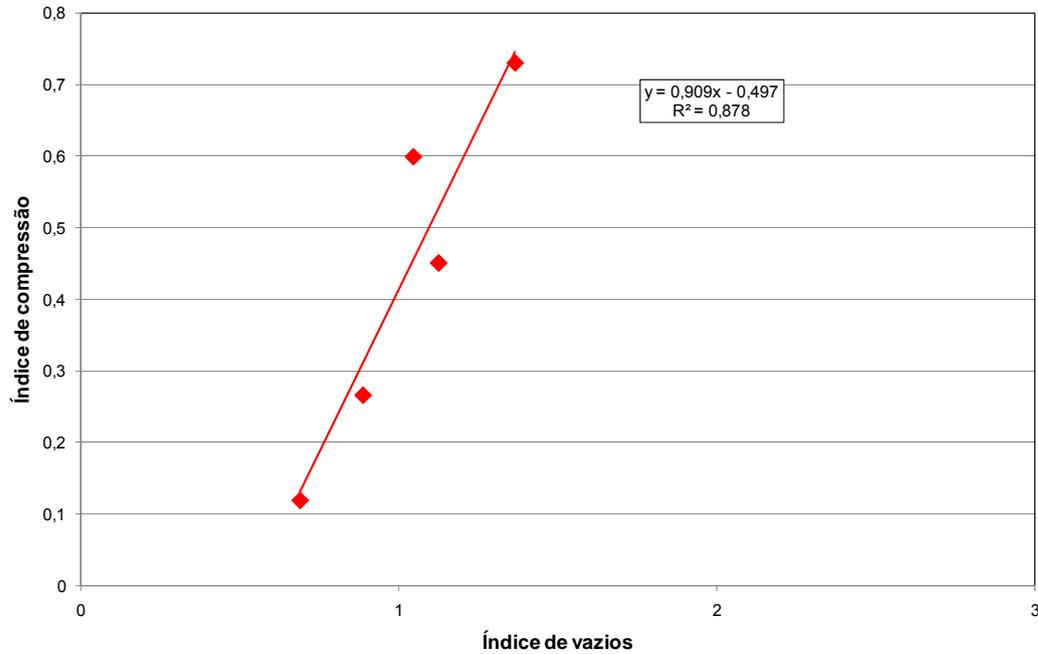


Figura 7.6 – Relação entre o índice de vazios inicial dos corpos-de-prova e o índice de compressão.

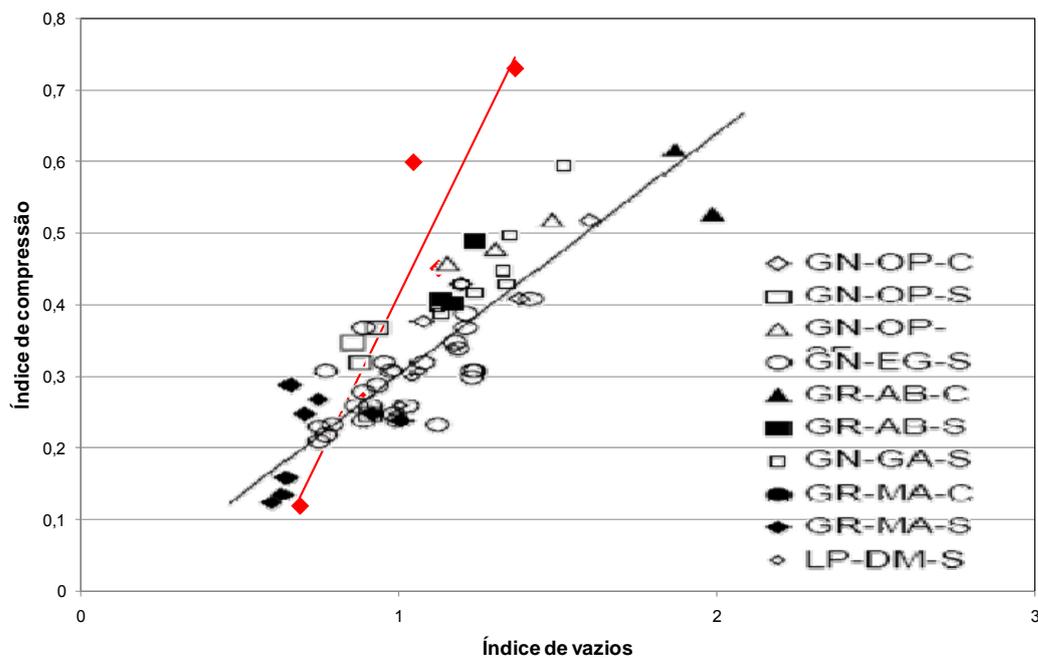


Figura 7.7 – Correlação geral entre o índice de compressão e o índice de vazios (Futai, 2002).

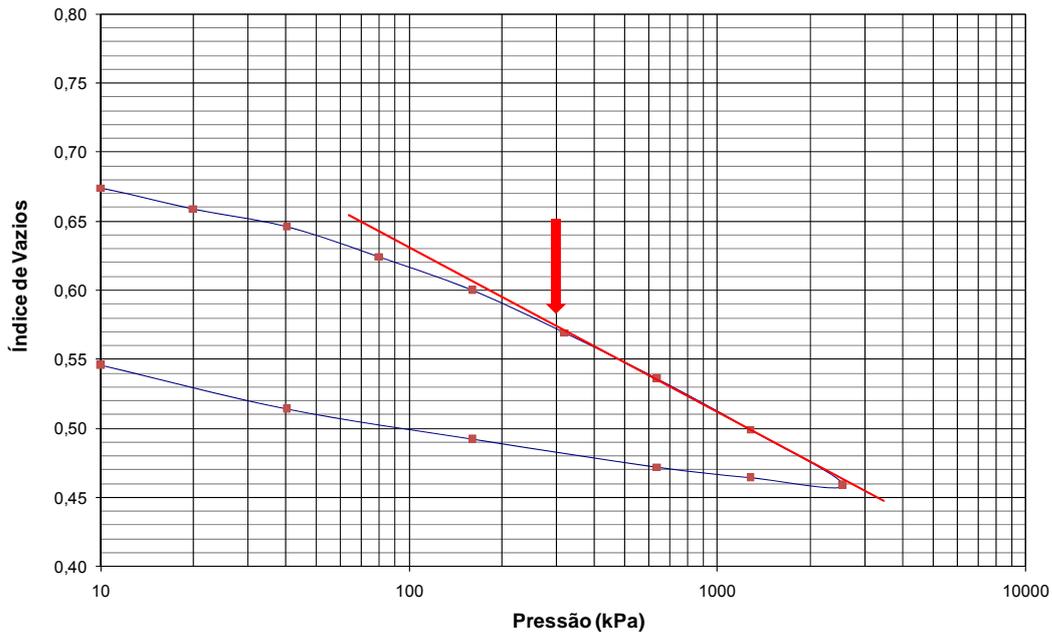


Figura 7.8 – Pontos de escoamento do solo Branco.

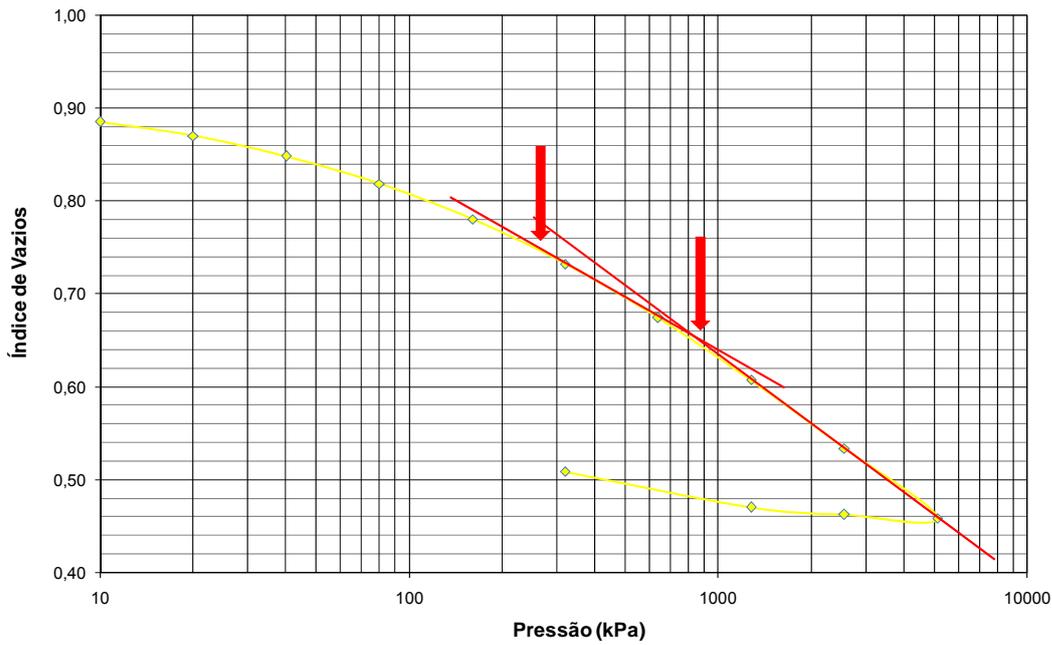


Figura 7.9 – Pontos de escoamento do solo Amarelo.

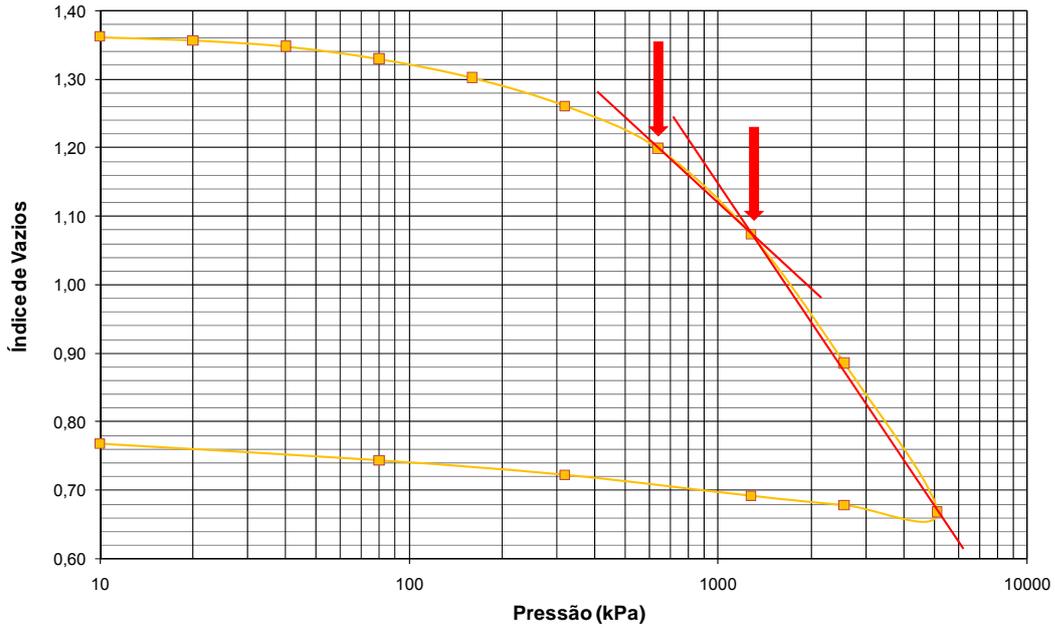


Figura 7.10 – Pontos de escoamento do solo Laranja.

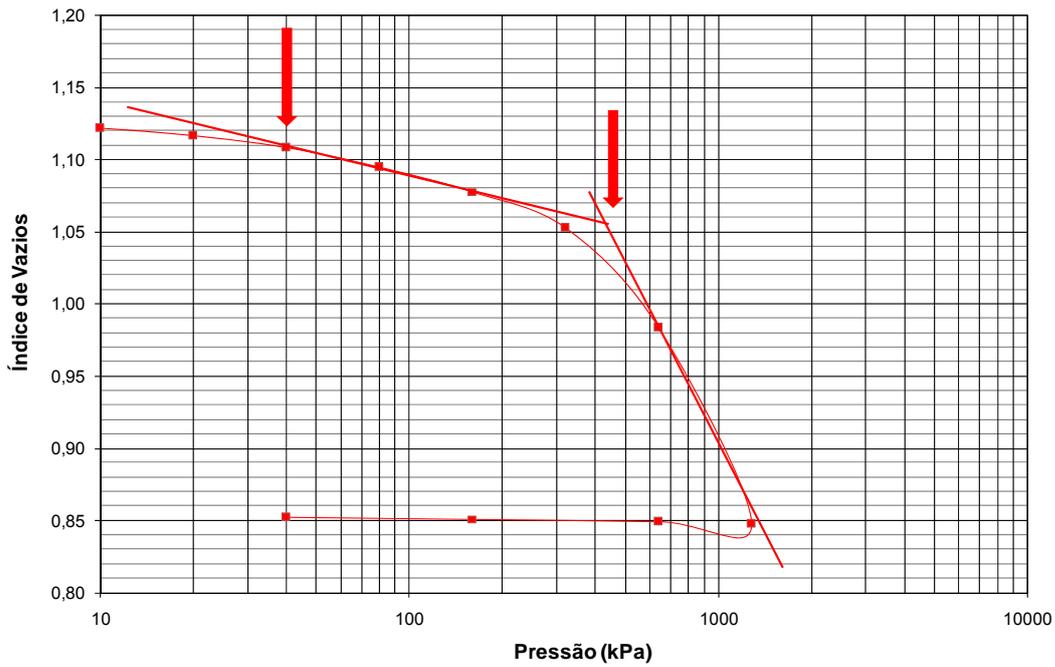


Figura 7.11 – Pontos de escoamento do solo Vermelho.

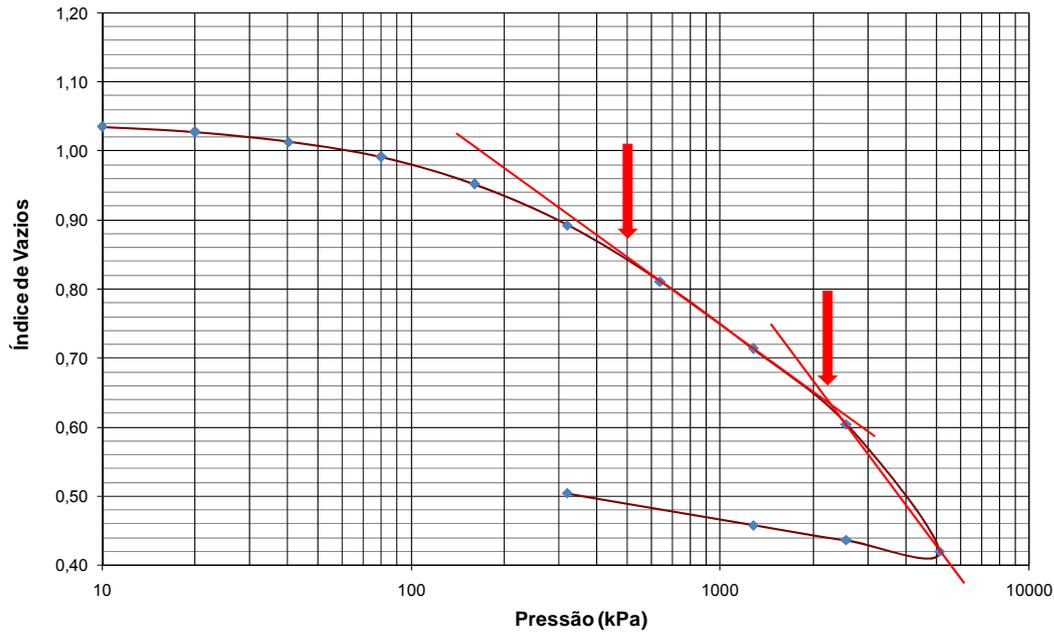


Figura 7.12 – Pontos de escoamento do solo Marrom.

A Tabela 7.3 resume os dados obtidos dos gráficos de índice de vazios versus pressão vertical dos solos estudados. Estão listados na tabela os valores de tensão de cedência determinados pelo Método de Pacheco Silva e os pontos de inflexão mostrados nos gráficos pelas setas vermelhas, mencionados na tabela como “primeiro patamar linear” e “segundo patamar linear”. Para os níveis de tensão investigados, a tensão de cedência determinada pelo Método de Pacheco Silva apresenta a tendência de crescimento com o aumento do intemperismo. No entanto, o formato das curvas de índice de vazios x logaritmo da pressão indica que a reta virgem talvez não tenha sido alcançada para os solos menos intemperizados (e.g. Branco e Amarelo).

Tem-se ainda que os solos estudados neste trabalho parecem apresentar dois patamares lineares entre o índice de vazios e o logaritmo da tensão vertical. Esses patamares situam-se entre 220 e 600 kPa e entre 900 e 2000 kPa. Para o solo Vermelho e para o solo Branco, os quais foram carregados até a pressão de 2560 kPa, não foi possível determinar o segundo patamar linear.

Tabela 7.3 – Início da reta virgem e ponto de escoamento dos solos indeformados.

<b>Solo</b>	<b>Tensão de cedência por Pacheco Silva (kPa)</b>	<b>Início do primeiro patamar linear (kPa)</b>	<b>Início do segundo patamar linear (kPa)</b>
<b>Marrom</b>	900	500	2000
<b>Vermelho</b>	450	40/400	Não definido
<b>Laranja</b>	800	600	1100
<b>Amarelo</b>	200	220	900
<b>Branco</b>	70	300	Não definido

## 7.2. Ensaio de Adensamento em Amostras Desestruturadas

Ensaio de compressão unidimensional foram realizados em amostras desestruturadas dos solos estudados, com o objetivo de comparar o efeito da estrutura na compressibilidade do material indeformado.

Os corpos-de-prova foram preparados a partir de amostras destorroadas manualmente, sem secagem prévia, com água destilada sendo adicionada ao solo até a obtenção de uma pasta homogênea. Com o auxílio de uma espátula, o solo foi colocado diretamente nos anéis metálicos da célula edométrica, sendo a superfície rasada com uma régua. A Tabela 7.4 apresenta os dados obtidos nos ensaios realizados com as amostras desestruturadas. Todos os corpos-de-prova foram preparados em teores de umidade acima do limite de liquidez.

Os ensaios foram realizados na condição inundada, com os incrementos de tensão sendo aplicados a cada 24 horas. A tensão vertical inicial foi de 5 kPa até o máximo de 2560 kPa para os solos Marrom e Vermelho e 5120 kPa para os solos Branco, Amarelo e Laranja.

Na Figura 7.13 e na Figura 7.14 são apresentadas as variações de índice de vazios em função do logaritmo da pressão vertical e as variações da deformação volumétrica normalizada em função do logaritmo da pressão vertical. Na Figura 7.14 observa-se que o comportamento das amostras Amarela e Laranja é praticamente igual, mas as amostras Branca, Marrom e Vermelha apresentam uma variação de volume muito mais apreciável. Os valores de índice de compressão e índice de expansão estão resumidos na Tabela 7.4. Os menores  $C_c$  são apresentados pelos solos Branco e Amarelo, enquanto que o maior  $C_c$  é o do solo Vermelho. Observa-se que o índice de expansão corresponde a aproximadamente 10% do índice de compressão dos solos.

Nas figuras 7.15 a 7.19 apresentam-se as curvas dos solos indeformados traçadas juntamente com as curvas dos solos desestruturados. Como previsto, as curvas dos solos indeformados tem maior rigidez que a curva dos solos desestruturados. A única exceção é para o solo Amarelo, onde o solo indeformado apresenta menor rigidez, embora a diferença seja muito pequena entre os dois comportamentos (Figura 7.16). Embora os corpos-de-prova sejam originários da mesma amostra (2.4021.05), o corpo-de-prova indeformado possivelmente envolve a presença de minerais mais compressíveis do que o corpo-de-prova do solo desestruturado. Dentre os solos desestruturados, o Amarelo e o Laranja são os menos compressíveis. Na Figura 7.17, que apresenta a comparação entre o solo indeformado e desestruturado Laranja, para a pressão de 5120 kPa o solo indeformado tem maior deformação que o solo desestruturado. Este fato também deve ser decorrente de diferentes mineralogias das amostras. Esses comportamentos díspares, decorrentes da heterogeneidade do material, dificultam a análise do seu comportamento. Entretanto, deve-se notar que tal diversidade não é encontrada apenas em laboratório, devendo ser levada em consideração em qualquer análise de solos residuais. Dentre os solos Branco, Vermelho e Marrom, o que apresentou maior diferença entre os estados indeformado e desestruturado foi o solo Vermelho.

Pode-se concluir que a influência da estrutura na rigidez dos materiais é maior nos solos mais intemperizados. Para os solos pouco intemperizados, como é o caso dos solos Branco e Amarelo, a granulometria parece ter maior influência na rigidez dos corpos.

Tabela 7.4 – Parâmetros obtidos dos ensaios de adensamento inundado em amostras desestruturadas.

<b>Parâmetros / Amostra</b>	<b>Branco 2.4126.05</b>	<b>Amarelo 2.4021.05</b>	<b>Laranja 2.4043.05</b>	<b>Vermelho 2.4401.07</b>	<b>Marrom 2.4495.05</b>
<b>Limite de liquidez (%)</b>	32	35	36	44	47
<b>Densidade inicial (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,82	1,94	1,90	2,12	1,93
<b>Densidade seca inicial (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,29	1,40	1,29	1,37	1,17
<b>Índice de vazios inicial (e<sub>0</sub>)</b>	1,08	0,88	1,18	0,92	1,31
<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,682	2,630	2,800	2,630	2,700
<b>Teor de umidade inicial (%)</b>	41,3	38,2	48,1	54,8	65,5
<b>Grau de saturação inicial (%)</b>	100	100	100	100	100
<b>Índice de compressão</b>	0,27	0,26	0,33	0,41	0,33
<b>Índice de expansão</b>	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03

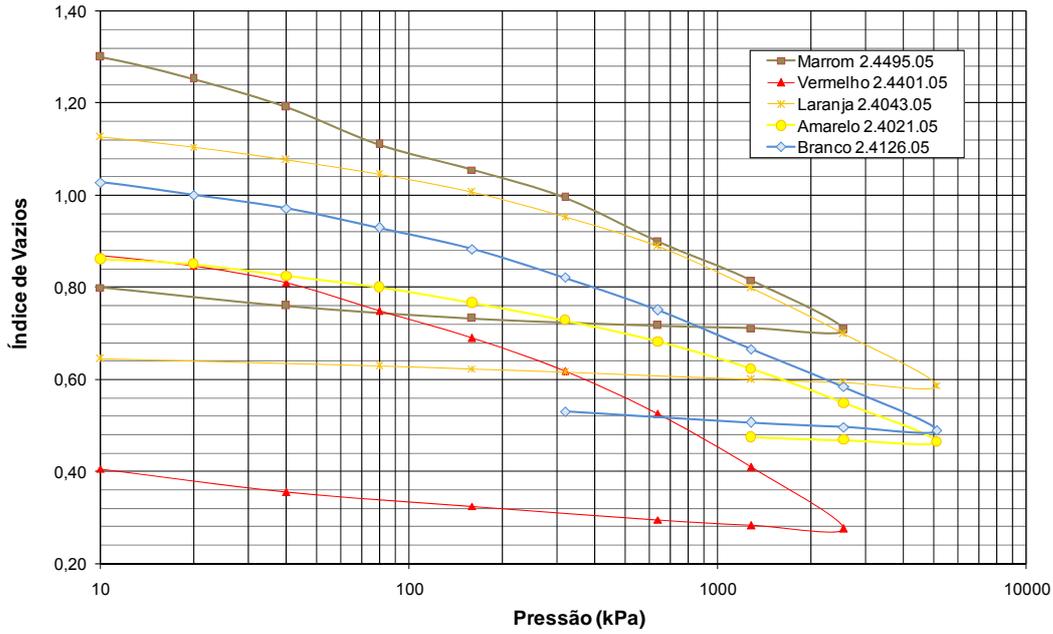


Figura 7.13 – Amostras desestruturadas. Índice de vazios *versus* log pressão efetiva. Ensaio inundado.

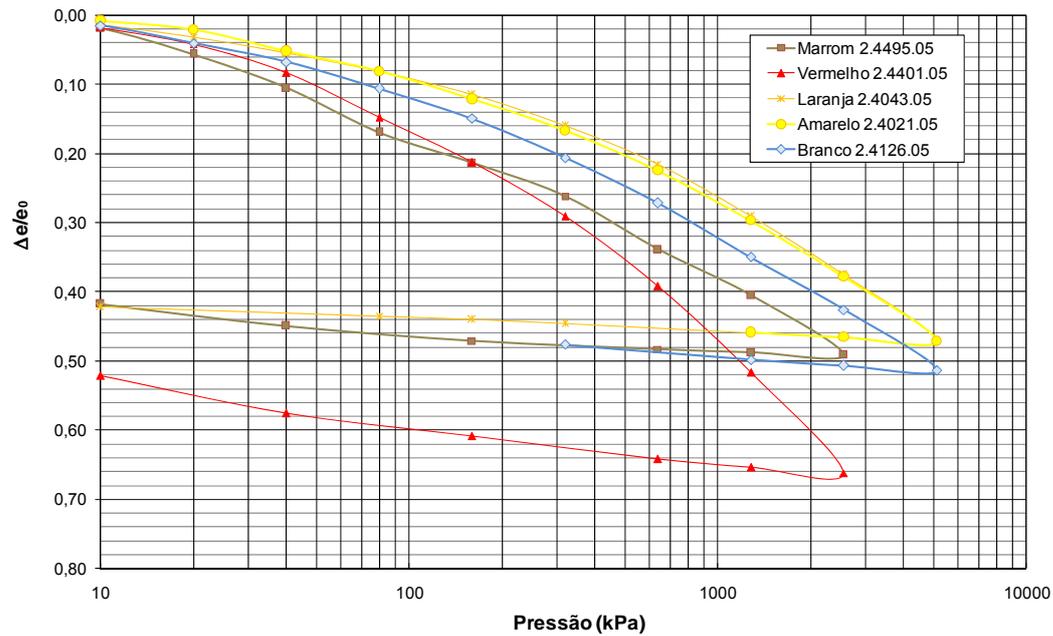


Figura 7.14 – Amostras desestruturadas. Deformação volumétrica normalizada *versus* log pressão efetiva. Ensaio inundado.

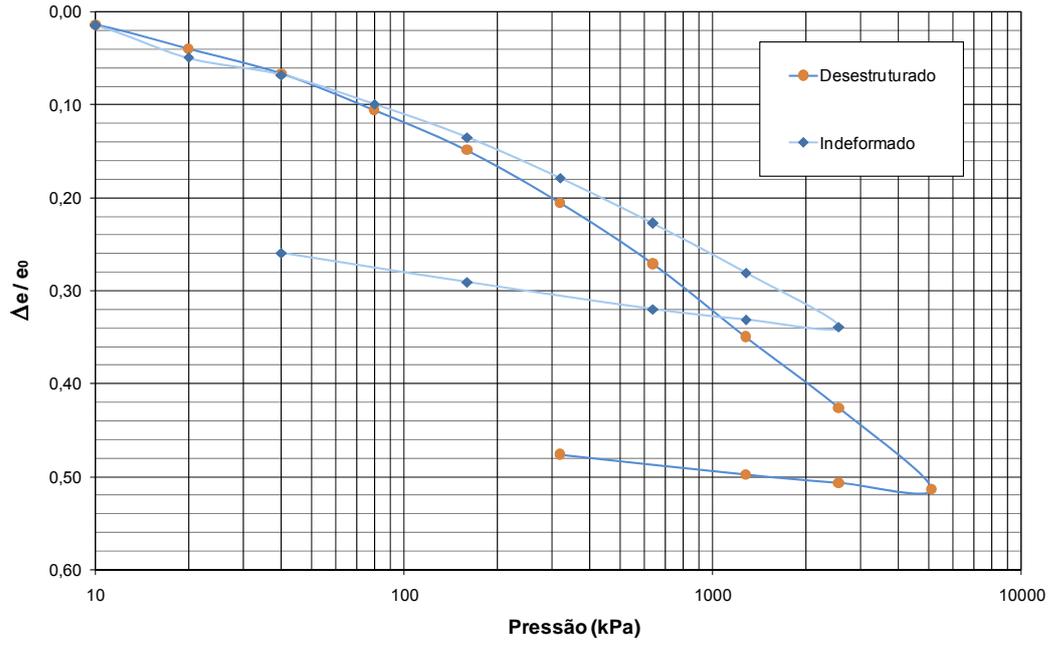


Figura 7.15 – Solo Branco. Comparação entre curvas do solo desestruturado e solo indeformado.

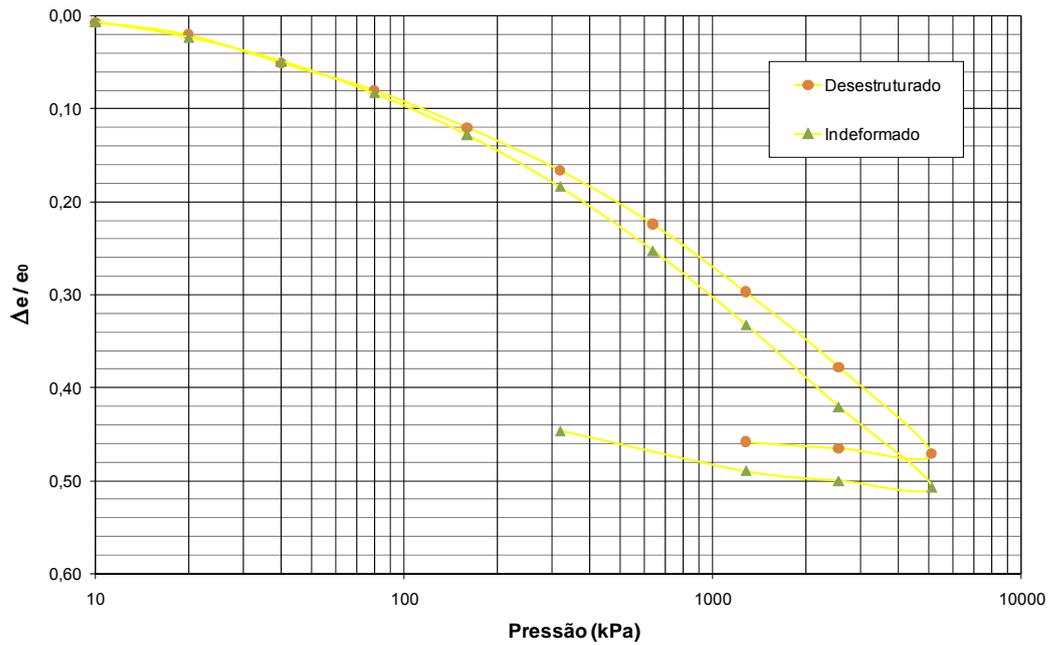


Figura 7.16 – Solo Amarelo. Comparação entre curvas do solo desestruturado e solo indeformado.

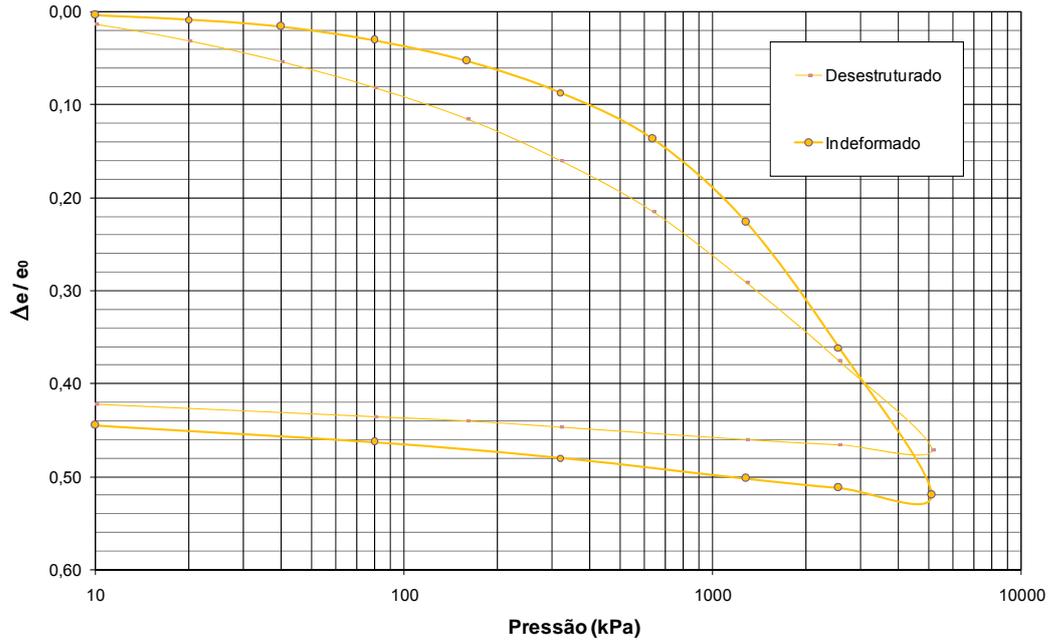


Figura 7.17 – Solo Laranja. Comparação entre curvas do solo desestruturado e solo indeformado.

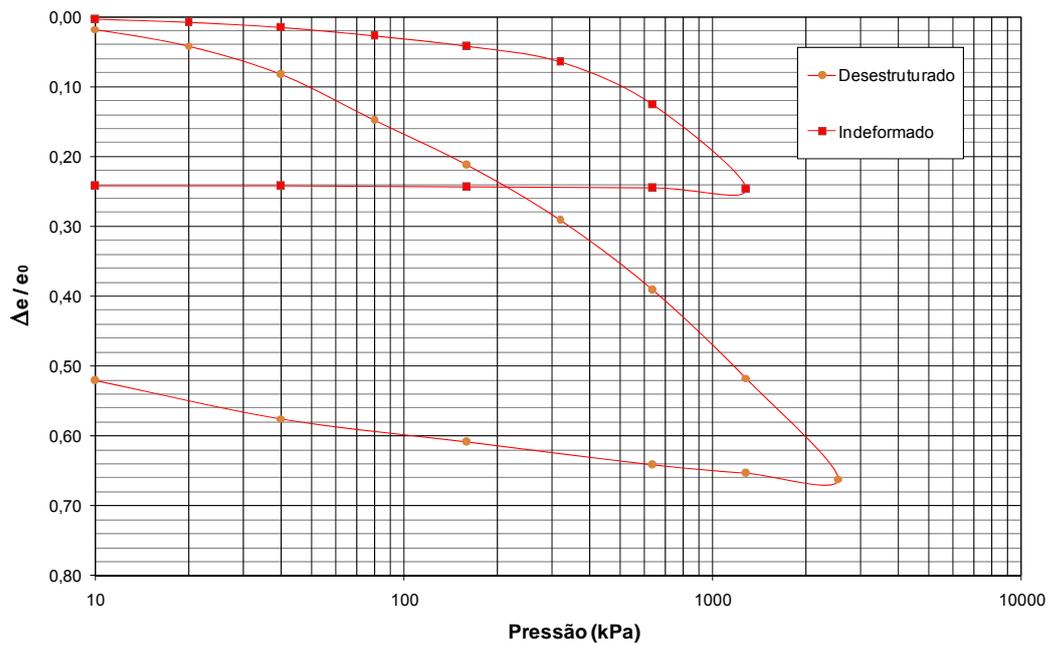


Figura 7.18 – Solo Vermelho. Comparação entre curvas do solo desestruturado e solo indeformado.

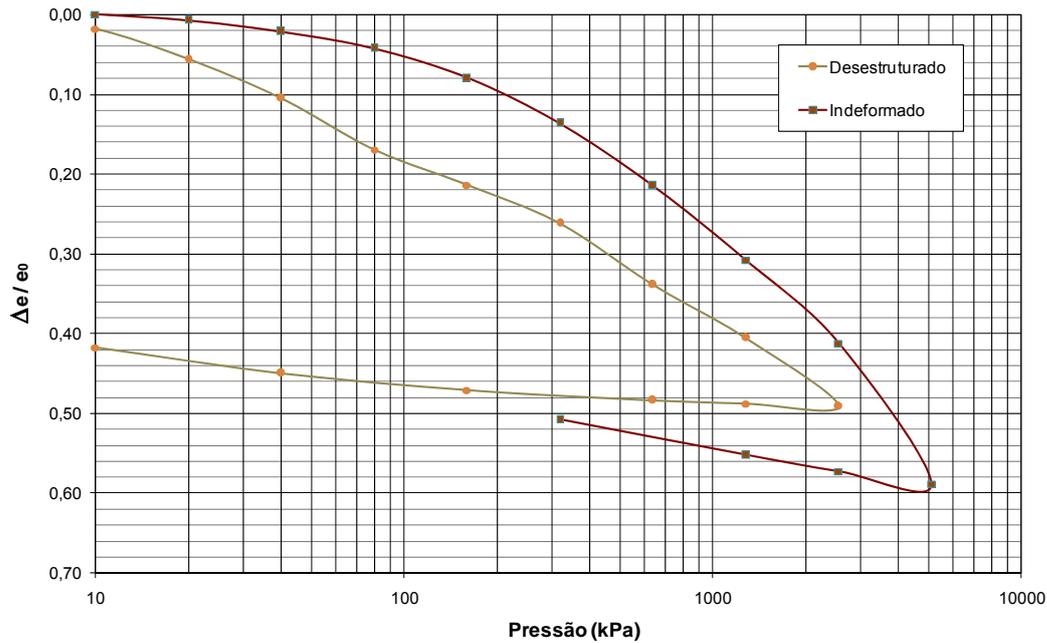


Figura 7.19 – Solo Marrom. Comparação entre curvas do solo desestruturado e solo indeformado.

### 7.3. Ensaio de Adensamento Não-Saturado em Amostras Indeformadas do Solo Marrom

Dada a condição parcialmente saturada do solo estudado, desenvolveu-se uma célula para estudo da sua compressibilidade não saturada. O sistema em questão permite executar, em laboratório, ensaios de adensamento com sucção controlada, aplicando-se a técnica de imposição e de controle de sucção através da translação de eixos. As pressões de ar e de água na amostra de solo são controladas independentemente. O sistema está conectado a uma linha de pressão de 600 kPa, onde as pressões de água e ar são ajustadas com uma precisão de 1 kPa. A pressão de ar é aplicada no topo da amostra e a pressão de água é aplicada na base da amostra com o auxílio de uma pedra porosa de cerâmica com alto valor de pressão de entrada de ar, instalada na base da célula de adensamento. Devido à configuração da célula, a pressão de ar coincide com a pressão interna da célula (pressão confinante). Transdutores de pressão convencionais são utilizados para medição da pressão de água e a medição da pressão de ar é feita com o auxílio de manômetros. O corpo-de-prova tem 70 mm de diâmetro e 20 mm de altura. A célula edométrica está assentada em uma prensa edométrica convencional, onde as cargas são aplicadas através de

pesos e um braço de alavanca. O monitoramento das deformações é realizado mediante a utilização de defletômetros.

Um esquema do equipamento desenvolvido é apresentado na Figura 7.20. Na Figura 7.21 uma vista geral da célula de adensamento desenvolvida sendo utilizada em duas prensas *Pavitest* produzidas pela *Contenco*.

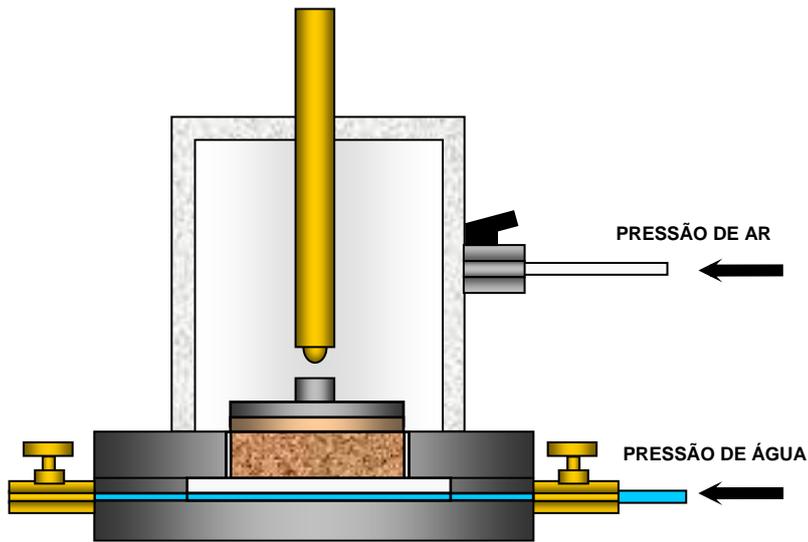


Figura 7.20 – Esquema da célula edométrica e da aplicação de pressões.



Figura 7.21 – Vista geral de dois equipamentos edométricos com sucção controlada em funcionamento.

Foram realizados ensaios com sucção constante de 50 kPa e os carregamentos aplicados seguiram os mesmos valores do ensaio inundado. A aplicação de sucção nos corpos-de-prova foi feita previamente ao ensaio, através de soluções salinas em dessecadores (Figura 7.22). Este procedimento permitia que os corpos-de-prova estivessem com umidades muito próximas ao desejado quando da montagem nas células edométricas.

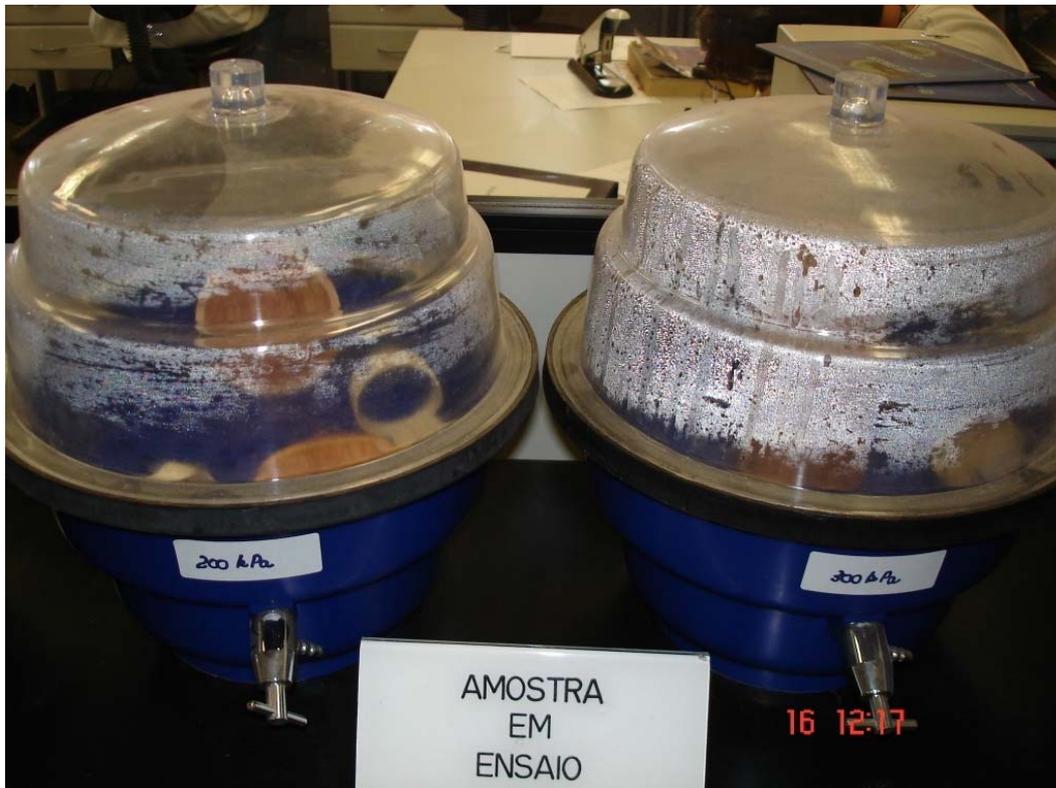


Figura 7.22 – Utilização de dessecadores para a aplicação de valores de sucção nos corpos-de-prova.

Na Tabela 7.5 são apresentados os dados dos corpos-de-prova ensaiados. Os ensaios foram realizados em três amostras: 2.4499.05, 2.4021.07 e 2.3022.07. No estado natural, o peso específico dos corpos-de-prova varia entre 13,54 kN/m<sup>3</sup> e 14,55 kN/m<sup>3</sup> e o teor de umidade entre 26,2% e 29,3%. A amostra 2.4499.05 exibe um índice de vazios inicial igual a 0,999. A amostra 2.4021.07 apresenta índice de vazios de 0,917 e a amostra 2.4022.07 possui um índice de vazios médio de 0,892. Os dois corpos-de-prova dessa última amostra apresentaram porosidades bastante distintas.

Os corpos-de-prova foram ensaiados com sucção constante de 50 kPa, sendo que a pressão de ar aplicada foi de 100 kPa e a pressão de água de 50 kPa. Os corpos-de-prova foram moldados a partir de blocos retirados de 2 m

de profundidade, coletados de um poço no topo do talude. Os mesmos foram classificados como solo Marrom.

A sucção imposta ao corpo-de-prova manteve praticamente inalterado o teor de umidade, do início ao final do ensaio. O tempo total do experimento foi de 10 dias. No entanto, o valor do teor de umidade do solo e a sucção imposta no ensaio não são iguais aos valores de sucção e teor de umidade da curva característica determinada para o solo Marrom. Conforme já comentado em capítulos anteriores, os solos estudados apresentam grande heterogeneidade, o que dificulta, em parte, a determinação de propriedades características.

Os índices de compressão e expansão foram determinados para os quatro corpos-de-prova utilizando sempre os dois últimos pontos do carregamento para o índice de compressão. No caso do índice de expansão, considerou-se o último ponto do carregamento e o último ponto do descarregamento. O valor médio do índice de compressão é igual a 0,4. Os dois ensaios que sofreram descarregamento apresentaram valores de  $C_s$  de 0,07 e 0,04.

Tabela 7.5 – Parâmetros obtidos dos ensaios de adensamento não saturado com sucção de 50 kPa.

<b>Parâmetros / Amostra</b>	<b>2.4499.05</b>	<b>2.4021.07</b>	<b>2.4022.07a</b>	<b>2.4022.07b</b>
<b>Densidade inicial (<math>kN/m^3</math>)</b>	17,38	17,87	17,55	18,37
<b>Densidade seca inicial (<math>kN/m^3</math>)</b>	13,54	13,87	13,57	14,55
<b>Índice de vazios inicial (<math>e_0</math>)</b>	0,999	0,917	0,958	0,826
<b>Massa específica Real (<math>g/cm^3</math>)</b>	2,707	2,658	2,658	2,658
<b>Teor de umidade (%)</b>	28,4	28,9	29,3	26,2
<b>Grau de saturação (%)</b>	76,93	83,80	81,3	84,29
<b>Sucção matricial (kPa)</b>	50	50	50	50
<b>Índice de compressão <math>C_c</math></b>	0,42	0,51	0,34	0,35
<b>Índice de expansão <math>C_s</math></b>	0,07	-	-	0,04

A Figura 7.23 apresenta a relação entre o índice de vazios e o logaritmo da pressão efetiva dos ensaios de adensamento com sucção de 50 kPa. As curvas dos corpos de prova indeformados apresentam um trecho inicial em que o comportamento do material é mais rígido. Somente a partir de 200 kPa é que os solos começam a apresentar alguma deformação.

A variação dos valores de índice de vazios inicial dificulta a comparação entre as curvas. Por esse motivo, são apresentadas na Figura 7.24 as curvas de adensamento com o índice de vazios normalizado. Deve-se notar que os corpos-de-prova 2.4022.07 a e b têm um comportamento muito semelhante. Os corpos-

de-prova 2.4021.07 e 2.4499.05 apresentam uma deformação maior a partir da tensão de 200 kPa e, a partir de 800 kPa, o corpo-de-prova de 2.4021.07 apresenta novamente uma maior deformação.

Nas figuras 7.16 a 7.18 são apresentadas as curvas de compressibilidade com a indicação dos pontos notáveis na curva de  $e$  x  $\log p$ . Esses pontos estão resumidos na Tabela 7.6, juntamente com a pressão de cedência determinada pelo Método de Pacheco Silva.

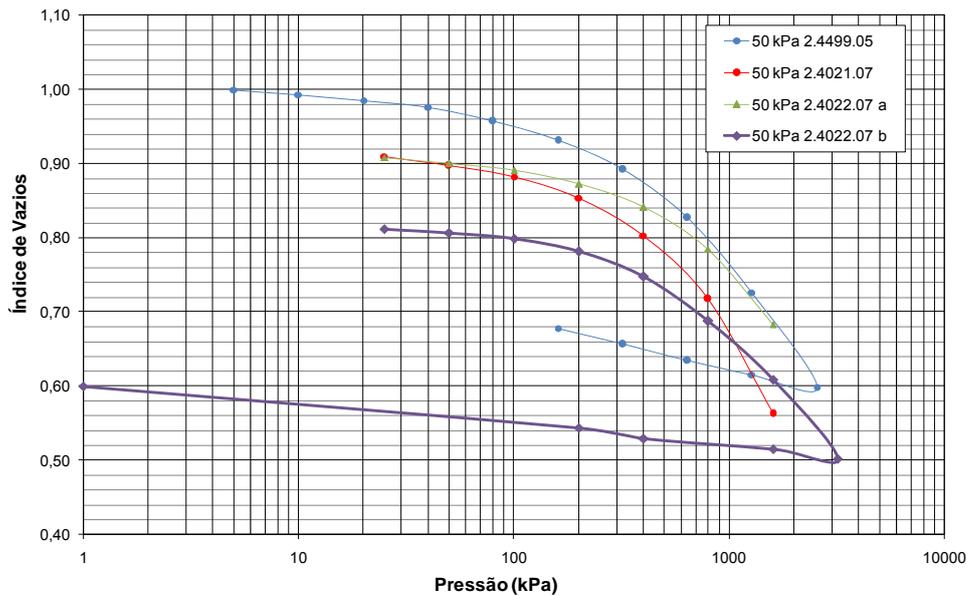


Figura 7.23 – Índice de vazios *versus* log pressão efetiva. Ensaio não saturado. Sucção de 50 kPa

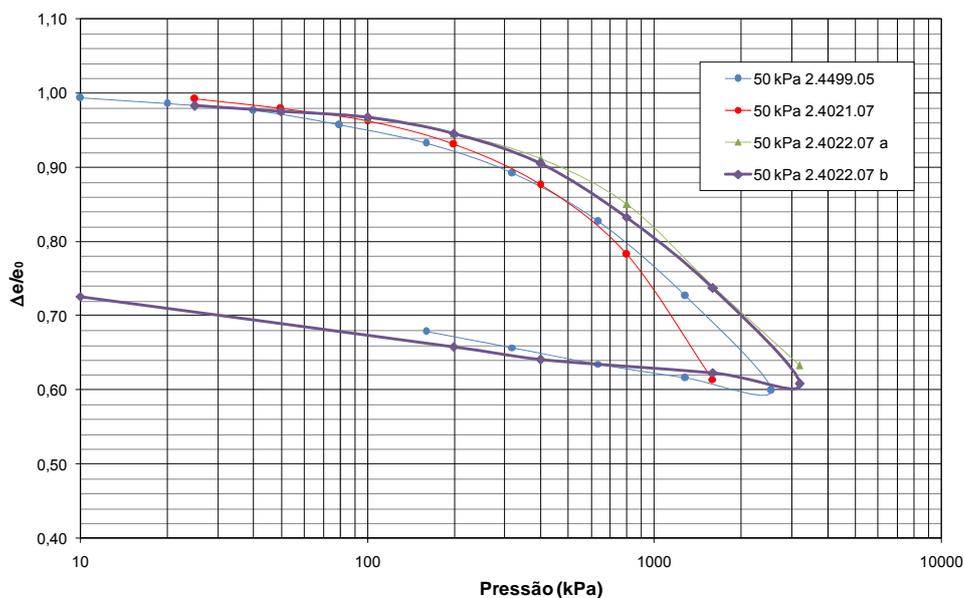


Figura 7.24 – Deformação volumétrica normalizada *versus* log pressão efetiva. Ensaio não saturado. Sucção de 50 kPa.

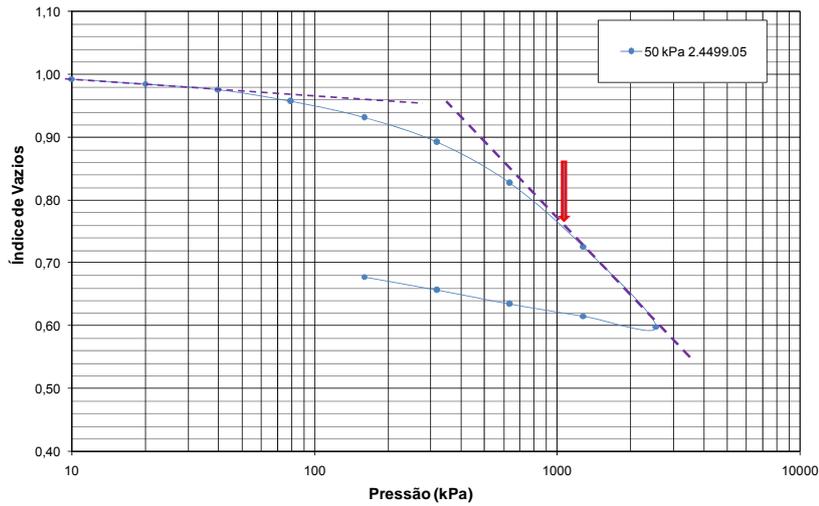


Figura 7.25 – Pontos de escoamento da amostra 2.4499.05 na sucção de 50 kPa.

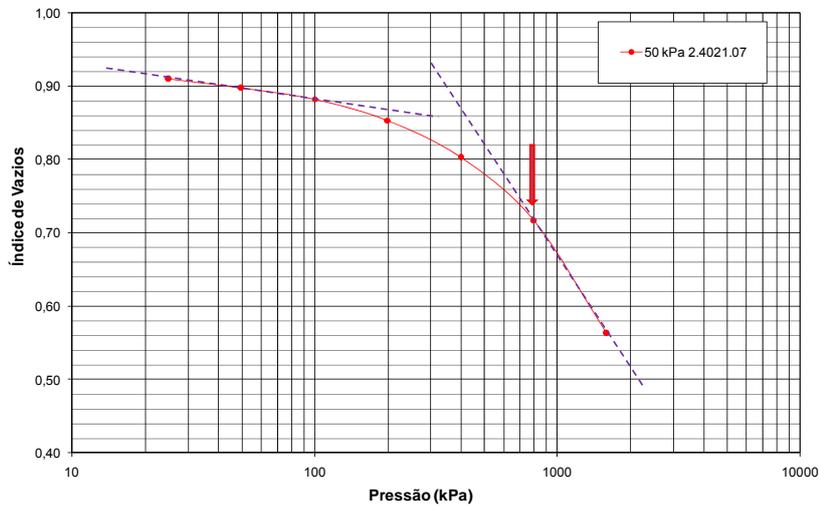


Figura 7.26 – Pontos de escoamento da amostra 2.4021.07 na sucção de 50 kPa.

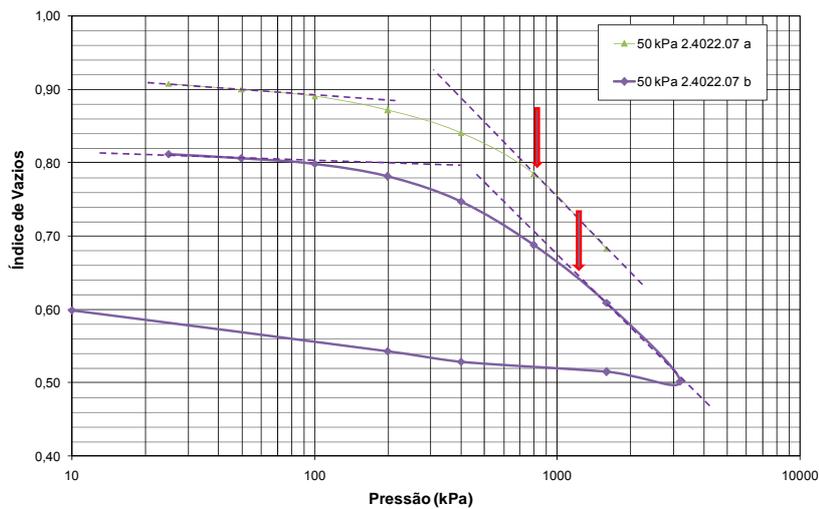


Figura 7.27 – Pontos de escoamento da amostra 2.4022.07 na sucção de 50 kPa.

Tabela 7.6 – Início da reta virgem e pontos de escoamento dos solos indeformados com sucção de 50 kPa.

<b>Solo</b>	<b>Tensão de cedência por Pacheco Silva (kPa)</b>	<b>Início da reta virgem</b>
<b>50 kPa – 2.4499.05</b>	500	1000
<b>50 kPa – 2.4021.07</b>	500	800
<b>50 kPa – 2.4022.07 a</b>	500	800
<b>50 kPa – 2.4022.07 b</b>	600	1000

Em uma primeira análise, observa-se que tanto a tensão de cedência quanto o início da reta virgem, para os corpos-de-prova ensaiados com sucção constante de 50 kPa, são inferiores à tensão de cedência e ao início da reta virgem determinados para o solo Marrom indeformado (Tabela 7.3). A tensão de cedência do solo indeformado é de 900 kPa e ele apresenta dois patamares lineares na curva “índice de vazios versus logaritmo da pressão”, sendo o primeiro iniciando em 500 kPa e o segundo iniciando em 2000 kPa.

No entanto, os ensaios realizados nos solos não saturados não alcançaram a mesma tensão do solo inundado, fato que interfere na determinação da tensão de cedência pelo Método de Pacheco Silva. Se a tensão de cedência for calculada para o ensaio inundado desconsiderando-se o último carregamento, obtém-se o valor de 350 kPa, neste caso inferior aos valores de 500 kPa e 600 kPa obtidos para os ensaios com sucção controlada.

A Figura 7.28 apresenta as curvas obtidas nos ensaios com sucção controlada e a curva obtida do ensaio inundado. Apesar da variação de comportamento dos ensaios não saturados, principalmente para tensões superiores a 200 kPa, nota-se a maior rigidez dessas curvas em comparação com o ensaio inundado, principalmente até a tensão de 1000 kPa. Após esse valor, os solos não saturados apresentam maior deformação, fato que se reflete no índice de compressão dos materiais. Para o solo inundado o índice de compressão é igual a 0,33, inferior aos determinados para os solos com sucção de 50 kPa (Tabela 7.6).

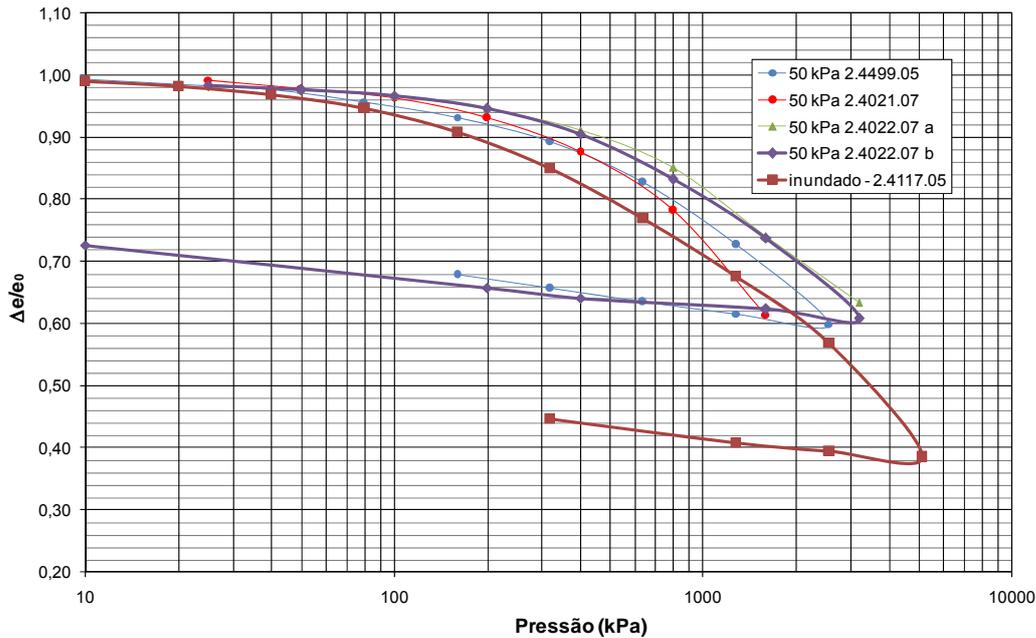


Figura 7.28 – Comparação entre ensaio inundado e ensaios de sucção 50 kPa.

#### 7.4. Conclusões

Foram apresentados resultados de ensaios edométricos em amostras de solos do perfil estudado no estado indeformado e desestruturado. Pôde-se observar que o comportamento de compressibilidade dos solos é função da estrutura e do grau de intemperismo dos solos. Os ensaios inundados executados nos solos indeformados foram conduzidos até a pressão de 5120 kPa. As tensões de cedência desses materiais mostraram-se bastante altas e, para os solos menos intemperizados essa tensão não foi suficiente para que a reta virgem pudesse ser bem definida. Para os solo Marrom e Laranja que tiveram suas curvas de índice de vazios *versus* logaritmo da pressão bem definidas a tensão de cedência é em torno de 800-900 kPa.

O índice de compressão dos solos indeformados varia entre 0,12, para o solo Branco, e 0,73 para o solo Laranja. Os solos mais intemperizados tendem a apresentar um comportamento mais compressivo. A faixa de valores de índice de compressão obtida é mais dilatada que as encontradas na literatura para o mesmo tipo de solo.

Na comparação do comportamento dos solos indeformados com os solos desestruturados, observou-se que a estrutura dos solos mais intemperizados é

mais influente no comportamento compressivo do que a estrutura dos solos menos intemperizados.

Foram executados ensaios de adensamento com sucção controlada em amostras do solo Marrom. Embora os ensaios com sucção tenham sido conduzidos a níveis de tensão inferiores aos ensaios inundados, foi observada uma maior rigidez dos solos não saturados em relação ao solo inundado. Esse comportamento foi observado para níveis de tensão inferiores a 2000 kPa. Para tensões acima deste limite o comportamento compressivo do material tende a convergir.