

7

Compressibilidade

7.1.

Introdução

A resposta de solos residuais quando submetidos à compressão está intrinsicamente ligada à estrutura e ao grau de intemperismo, como exposto no capítulo 2. Desta forma, ensaios de compressão unidimensional em amostras indeformadas e reconstituídas e de adensamento isotrópico foram executados com o objetivo de avaliar a influência das componentes do solo (e.g. mineralogia, arranjo, cimentação) em seu comportamento e determinar propriedades do solo tais como índices de compressibilidade e tensão de cedência.

Dentre os ensaios de carregamento unidimensional, o ensaio de adensamento edométrico é o mais conhecido e empregado mundialmente. No entanto, o longo tempo de duração fez com que fosse testada uma das técnicas baseada no carregamento contínuo do solo.

O ensaio de adensamento com velocidade de “deformação” controlada (CRS) foi concebido por Hamilton e Crawford (1959) com o intuito de diminuir o tempo para obtenção da tensão de pré-adensamento em solos argilosos. Desde então, diversas técnicas, equipamentos e métodos para cálculos de parâmetros para este ensaio foram desenvolvidos (Wahls, 1969; Wissa *et al.*, 1971 e Gorman *et al.*, 1978), com a padronização do mesmo em alguns países como Suécia e Noruega.

A metodologia do ensaio CRS é relativamente simples. Uma tensão vertical é aplicada gradualmente através do deslocamento axial constante do corpo de prova. A drenagem é permitida apenas pelo topo, sendo a outra face mantida sob condições não drenadas de forma a possibilitar a medida de poropressão gerada pelo carregamento. Além do tempo requerido, este método ainda tem como vantagem a aquisição contínua de dados, possibilitando a obtenção da curva e $x \log \sigma'_v$ bem definida.

Para interpretar os resultados, Wissa *et al.* (1971) propõem uma fundamentação teórica supondo que as deformações sofridas pela amostra ensaiada são infinitesimais, por isso a denominação de deformação controlada.

Assim como na Teoria de Adensamento de Terzaghi, Wissa *et al.* (1971) consideram que o solo é homogêneo e saturado; as partículas sólidas e a água contida nos vazios são incompressíveis e a compressão e drenagem são unidimensionais (vertical). No entanto, as hipóteses de que há uma relação linear entre as variações de tensão efetiva e o índice de vazios, que certas propriedades do solo se mantêm constantes, assim como a tensão total ao longo do tempo, presentes na Teoria de Terzaghi, são desconsideradas.

Um dos principais problemas na execução deste ensaio está associado com a determinação da velocidade de “deformação” que deve ser adotada. Carvalho *et al.* (1993) destacam que o limite superior da velocidade deve corresponder à condição máxima de não uniformidade das tensões efetivas ao longo do corpo de prova. Já o limite inferior da velocidade relaciona-se com a necessidade da existência de um valor mínimo de poropressão na base que permita o cálculo com precisão de C_v e com o fato de que o ensaio não deve se estender por um tempo igual ou superior ao do ensaio convencional.

A norma ASTM (1998), que estabelece procedimentos para ensaios CRS, indica valores de velocidade de ensaio em função do limite de liquidez, com os valores de u_b/σ_v entre 3% e 30%. Alborta (1997) menciona que este limite é conservador, pois u_b/σ_v deve variar de acordo com o tipo de solo e com a história de tensões. Wissa *et al.* (1971), por outro lado, afirmam que se o valor desta relação for superior a 5%, a não uniformidade no corpo de prova pode ser excessiva. Smith e Wahls (1969) pregam que este quociente não deve ultrapassar 50%. Diversos outros autores têm abordado este tema ao longo dos anos sugerindo valores admissíveis para a relação u_b/σ_v e para a velocidade (Sällfors, 1975; Gorman *et al.*, 1978; Leroueil *et al.*, 1985; Carvalho *et al.* 1993; Leroueil e Hight, 2002; Spannenberg, 2003).

A partir de resultados de ensaios em solos argilosos, Wissa *et al.* (1971) demonstraram que há uma boa concordância entre a curva de compressão obtida através do ensaio CRS e os ensaios edométricos. Sällfors (1975), Carvalho (1989), Sheahan e Watters (1996), Alborta (1997), Baptista (1998), Spannenberg (2003) e Montemezzo (2005) também chegaram a mesma conclusão ao comparar resultados de ensaios CRS com os resultados de ensaios edométricos. No entanto, vale ressaltar que todos os estudos citados anteriormente foram baseados no comportamento de solos argilosos de baixa permeabilidade e alta compressibilidade, com exceção de Montemezzo (2005), que trabalhou, além de uma argila siltosa, com uma areia siltosa.

Pelas vantagens expostas acima, especialmente pela rápida execução e aquisição automática de dados, optou-se pelos ensaios CRS para avaliar a compressibilidade dos solos residuais de migmatito de Duque de Caxias tanto em amostras indeformadas como em reconstituídas. As amostras reconstituídas foram produzidas após secagem prévia e destorramento do solo, sendo moldadas próximo ao limite de liquidez, como recomendado por Burland (1990), ou, caso o solo não apresentasse tal limite, até se obter uma pasta.

A compressibilidade do solo de Tanguá foi obtida mediante a execução de ensaio edométrico convencional em amostras indeformadas e reconstituídas, tendo em vista que, durante a caracterização deste solo, o equipamento empregado no ensaio CRS encontrava-se em manutenção. As amostras reconstituídas foram produzidas com o teor de umidade natural e índice de vazios da amostra indeformada.

Por suspeitar que o método de saturação empregado nos ensaios CRS possa ter afetado a estrutura dos solos, optou-se por comparar o resultado do ensaio CRS, ao menos no solo cuja resistência seria avaliada (DC02), ao resultado de um ensaio edométrico executado posteriormente. Ainda, foi executado neste solo um ensaio com amostra reconstituída na umidade natural e com o mesmo índice de vazios da amostra indeformada.

Além dos ensaios de compressão uniaxial, os solos DC02 e o residual de rocha alcalina de Tanguá, cujo comportamento tensão-deformação-resistência é avaliado no capítulo seguinte, foram submetidos a ensaios de adensamento isotrópico. Estes ensaios tiveram como principal objetivo a caracterização do ponto de cedência da estrutura sob tais condições, importante para análise dos ensaios de resistência.

Tentou-se executar ensaios de adensamento anisotrópico com o intuito de determinar a superfície de plastificação da estrutura dos solos. Entretanto, ocorreram alguns problemas na execução dos mesmos, gerando resultados inconsistentes. Por isso, optou-se por não apresentar tais resultados.

Na Tabela 28 consta o programa de ensaios executados. Nos itens subseqüentes são apresentadas metodologias, resultados e discussões.

Tabela 28 - Programa de ensaios de compressão

Local	Solo	Adens. Isotrópico	Ensaio de Compressão Uniaxial			
			CRS Amostra Indef.	CRS Amostra Amolgada*	Edométrico Amostra Indeformada	Edométrico Amostra Reconstituída**
Duque de Caxias (Migmatito)	DC01	-	x	x	-	-
	DC02**	x	x	x	x	x
	DC03	-	x	x	-	-
	DC04	-	x	x	-	-
Tanguá (Solo residual de rocha alcalina)	T	x	-	-	x	x

* Seca ao ar e reconstituída próxima ao limite de liquidez ou sendo adicionada água até formar uma pasta

**Amostra moldada na umidade natural.

7.2. Metodologias

7.2.1. Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS)

7.2.1.1. Equipamento

Os ensaios foram executados em uma prensa de carregamento uniaxial da marca Testop do laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio, mostrada na Figura 141. A poropressão na base (u_b) foi medida com o auxílio de um transdutor da marca Keller de capacidade de 1034 kPa. Para medir o deslocamento vertical, um instrumento do tipo LVDT da marca Wykeham Farrance Ltda de 25,4 mm de capacidade e resolução de 0,01 mm encontrava-se fixo na haste de suporte da prensa. Uma célula de carga modelo STALC3-10kN da marca ELE foi empregada para medir a força vertical. Todos os instrumentos estavam conectados a um sistema de aquisição de dados com conversão analógica digital (Orion).

7.2.1.2. Moldagem e saturação dos corpos de prova e montagem dos ensaios

Para execução dos ensaios com amostras indeformadas, um anel biselado com cerca de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura era cravado cuidadosamente no bloco com auxílio de um estilete para desbastar as laterais. Este anel possuía o mesmo diâmetro e cerca de 1 cm de altura a mais que a

abertura da placa cilíndrica que acomoda o corpo de prova no equipamento utilizado para o ensaio CRS, indicada nas Figuras 141 e 142. A altura superior do anel possibilitava que, após o processo de saturação, descrito a seguir, fosse obtido o teor de umidade do corpo de prova.

Como uma das principais vantagens deste ensaio é a agilidade, pensou-se em adotar uma técnica de saturação que não tomasse muito tempo, tornando assim o ensaio como um todo rápido. O procedimento consistia em, após a moldagem do corpo de prova, colocá-lo em um dessecador sobre uma pedra porosa saturada, que, por sua vez, ficava em contato direto com água deaerada (ver Figura 142). Um papel filtro era posto sob o corpo de prova, sendo outro acomodado no topo servindo como indicativo do umedecimento do solo. Após a montagem do ensaio, uma leve sucção era aplicada e mantida durante um período mínimo de 1 hora. Em seguida, o corpo de prova era transferido para a placa cilíndrica do CRS com auxílio de uma haste de extremidade circular. Uma régua metálica rígida era empregada para regularizar as extremidades, sendo o excesso de solo utilizado para determinar a umidade.

A execução dos ensaios com amostra reconstituída era relativamente simples. Os corpos de prova foram preparados a partir de amostras secas ao ar destorroadas manualmente, com água destilada sendo adicionada ao solo. No caso dos solos que possuíam limites de consistência, as amostras foram moldadas com o teor de umidade próximo ao limite de liquidez, caso dos solos DC03 e DC04. Já para os solos DC01 e DC02, a quantidade de água a ser adicionada foi estimada a partir do peso específico saturado no estado indeformado, adicionando-se sempre um pouco mais de água que a calculada para garantir a saturação. Após misturar o solo com água, o mesmo era acomodado em um saco plástico vedado dentro de um isopor por um período de no mínimo 24 horas para homogeneização. Os corpos de prova foram moldados diretamente na placa cilíndrica pertencente ao equipamento usando apenas a pressão dos dedos (Figura 142 b).



Figura 141 – Prensa empregada para a execução dos ensaios CRS

Antes de acomodar o corpo de prova na prensa, a célula de adensamento era montada em um recipiente com água destilada para garantir a saturação completa do sistema de medição de poropressão. Além disso, após o término de cada ensaio, as pedras porosas da base e do topo eram saturadas novamente.

7.2.1.3. Determinação da velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento empregada inicialmente para impor o carregamento da amostra se baseou nas recomendações ASTM D4186/98. Para solos não plásticos ou com limite de liquidez inferior a 40%, a referida norma recomenda uma velocidade de deformação volumétrica equivalente a uma

velocidade de deslocamento de 0,008 mm/min. Já para solos com LL entre 40 e 60 %, esta velocidade cai para 0,002 mm/min. Um ensaio piloto foi realizado no solo DC02 (não plástico), com uma velocidade de 0,008 mm/min, mesmo sabendo que seria extremamente conservador, tendo em vista que esta velocidade é baseada essencialmente no comportamento de solos argilosos. Os resultados obtidos não foram satisfatórios, não havendo geração de poropressão na base e sem aumento significativo na tensão vertical em períodos de até 5 minutos.



Figura 142 – a) Processo de saturação dos corpos de prova para o ensaio CRS; (b) Placa do equipamento CRS onde o corpo de prova é acomodado.

Gorman *et al.* (1978), ao trabalhar com diferentes solos do estado de Kentucky (EUA), estabeleceu como limites de velocidade inferior e superior para amostras com 2 cm de altura 0,002 e 0,04 mm/min, respectivamente. Além disso, a relação u_b/σ_v não deveria ser superior a 32%. Montemezzo (2005), ao executar ensaios CRS em uma areia siltosa, adotou duas velocidades de ensaio, 0,0313 mm/min e 0,0625 mm/min, obtendo resultados compatíveis com o adensamento edométrico e não detectando influência das velocidades adotadas. Desta forma, um novo ensaio foi executado com o solo residual DC02 adotando-se uma velocidade de 0,03 mm/min. Neste ensaio, resultados coerentes foram obtidos, com a relação u_b/σ_v inferior a 5%. Esta velocidade foi adotada para os demais ensaios.

7.2.1.4. Generalidades

Os ensaios foram encerrados quando 80% da capacidade da célula de carga foi atingida. Apesar da aquisição de dados ser automática, o controle do

ensaio era feito manualmente. Desta forma, para descarregar e recarregar a amostra quando uma tensão de cerca de 1500 kPa era atingida, o ensaio era monitorado constantemente. Tensões efetivas superiores a 2000 kPa foram alcançadas.

7.2.2.

Ensaio de adensamento edométrico convencional

7.2.2.1.

Equipamento

Os ensaios foram conduzidos em prensas de adensamento tipo Bishop com drenagem dupla e anel fixo. Detalhes sobre o equipamento são encontrados em de Campos (2006).

7.2.2.2.

Moldagem dos corpos de prova

A amostra indeformada e a reconstituída no teor de umidade natural de cada solo foram moldadas simultaneamente. Os corpos de prova indeformados foram moldados mediante a cravação de um anel biselado de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura no bloco. O solo remanescente desta moldagem era destorroado manualmente e moldado imediatamente no anel de adensamento de forma estática com auxílio da pressão dos dedos e de acessório com superfície plana e circular de acrílico, adicionando-se o solo aos poucos, de modo a se obter o mesmo peso específico total da amostra indeformada. Quando o volume de solo era insuficiente, destorroava-se mais amostra do mesmo local do bloco.

7.2.2.3.

Generalidades

Os ensaios foram realizados na condição inundada, com incrementos de tensão vertical aplicados quando as deformações devido ao estágio de carregamento anterior se estabilizavam. No início do ensaio, uma carga de assentamento de 10 kPa era imposta, seguida da inundação do corpo de prova que era mantido sob estas condições por um período de 24 horas. O estágio seguinte foi de 25 kPa com os acréscimos subsequentes equivalentes ao dobro da carga anterior até uma tensão de cerca de 3000 kPa ser atingida. O período de duração de cada estágio não era superior a 1 dia.

7.2.3.

Ensaio de adensamento isotrópico

7.2.3.1.

Equipamento

Para a execução deste tipo de ensaio, foi empregada uma prensa tipo Bishop-Wesley fabricada pelo Imperial College, descrita no capítulo 4. Esta prensa é controlada pelo programa TRIAX, cuja versão utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Toll (2002). Este software permite monitorar os deslocamentos e pressões, controlar tensões e deformações, executar ensaios com deformação controlada e com tensão controlada.

7.2.3.2.

Moldagem e saturação dos corpos de prova e montagem dos ensaios

Os corpos de prova ensaiados possuíam 3,8 cm de diâmetro e cerca de 4 cm de altura, sendo moldados da mesma forma que em ensaios triaxiais convencionais.

A saturação dos corpos de prova foi efetuada aplicando-se sucção e contrapressão. Inicialmente, uma tensão confinante de apenas 10 kPa foi aplicada no corpo de prova. Uma bureta, ligada a uma das duas drenagens da base do corpo de prova, era posicionada de forma que a carga neste ponto da amostra fosse nula. A outra drenagem da base permanecia ligada ao sistema para possibilitar a aplicação de contrapressão posteriormente. Uma sucção baixa era então aplicada no topo para gerar um fluxo com um gradiente de 10. Após percolar ao menos duas vezes o volume de vazios, as drenagens eram fechadas e o parâmetro B era verificado aumentando-se a confinante em apenas 20 kPa. Em seguida, ajustava-se a contrapressão em 10 kPa e o processo de saturação prosseguia com o aumento simultâneo da tensão confinante e da contrapressão a uma taxa de 25 kPa/h, sendo mantida a tensão efetiva de 10 kPa. Ao atingir a tensão confinante de 300 kPa, a mesma era mantida por algumas horas ou até não haver mais fluxo de água para dentro do corpo de prova. Verificava-se então o parâmetro B, com um aumento de confinante nunca superior a 20 kPa. Caso este fosse inferior a 0,96, percolava-se novamente um volume de água igual a duas vezes o volume de vazios da amostra. Este procedimento foi viabilizado por meio da adaptação feita no equipamento mostrado no Capítulo 4, onde foi adicionada uma interface ar-água que possibilitava a aplicação de uma pressão

no topo diferente da base. Da mesma forma que no início do ensaio, um gradiente igual a 10 e uma tensão efetiva de mesmo valor eram impostos para gerar o fluxo. As drenagens eram então fechadas novamente e o parâmetro B medido aumentado-se a confinante em 20 kPa. Se, ainda assim o corpo de prova não estivesse com um grau de saturação correspondente ao parâmetro B igual ou superior a 0,96, mantinha-se as tensões até a entrada de água na amostra cessar.

Todo este processo para saturar os corpos de prova para baixas tensões de confinamento se deve ao fato do compressor que abastece o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC (LGMA) fornecer pressão de ar comprimido de até 850 kPa. O primeiro ensaio, realizado com o solo DC02, foi executado sob estas condições, sendo atingida uma tensão efetiva de apenas 550 kPa, insuficiente para a detecção da tensão de plastificação (cedência) deste solo.

Após saturar o corpo de prova, o adensamento isotrópico era então iniciado. Para tanto, a contrapressão foi mantida constante e a tensão confinante foi aumentada a uma taxa de 10 kPa/h. A variação de volume do corpo de prova era medida ao longo do ensaio por um MVV tipo *Imperial College*.

7.3.

Resultados e discussões

7.3.1.

Ensaio de adensamento com velocidade de deformação constante (CRS) – solos residuais do migmatito de Duque de Caxias

7.3.1.1.

Ensaio em amostras indeformadas

Os ensaios CRS em amostras indeformadas dos solos residuais de migmatito foram executados após a saturação dos corpos de prova, como descrito no 7.2.1. Os dados dos mesmos antes e após a saturação são apresentados na Tabela 29.

Nota-se um aumento do índice de vazios e, conseqüentemente, a diminuição do peso específico seco dos solos após o processo de saturação. Durante a execução dos ensaios, houve perda de solo, principalmente na parte inferior do anel metálico, causada pelo processo de saturação e pela transferência do corpo de prova do anel para a placa cilíndrica o que, provavelmente, é a principal responsável pela variação do índice de vazios. Outra justificativa poderia ser o não confinamento das extremidades dos corpos

de prova durante o processo de saturação. Os minerais presentes nos solos da feição leucocrática que poderiam causar um aumento de volume seriam os argilominerais, entretanto, além da baixa concentração de argila, não foi detectada presença de argilominerais expansivos nestes solos. No caso dos solos da feição melanocrática, a biotita intemperizada, assim como os argilominerais em geral, tendem a absorver água, no entanto, mais uma vez, não espera-se que tal comportamento gere um aumento expressivo de volume destes solos quando saturados em condições não confinada.

Tabela 29 – Dados dos corpos de prova e resultados dos ensaios CRS nos solos residuais de migmatito.

Solo	Antes da saturação				Após saturação					$\Delta \gamma_d$ (%)
	$e_{inicial}$	γ_d (kN/m ³)	w (%)	S (%)	e	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	w (%)	S (%)	
DC01	0,99	14,0	17,0	48,8	1,11	13,1	17,76	38,1	92,9	6,4
DC02	1,26	12,5	25,9	59,2	1,37	12,0	17,14	43,9	92,4	4,0
DC03	0,88	13,6	10,0	29,5	0,96	13,1	17,88	36,7	99,9	4,0
DC04	1,00	13,0	19,0	50,5	1,16	12,0	16,81	39,7	92,0	7,7

As curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva obtidas nos ensaios CRS em escala semilogarítmica são apresentadas na Figura 143. A grande variabilidade do índice de vazios inicial dificulta uma análise geral conjunta. Por isso, os resultados também são apresentados em função da deformação volumétrica normalizada ($\Delta e/e_0$) na Figura 144, como sugerido por Futai (2002) e Boszczowski (2008), para a.

O comportamento do solo DC01 observado nas Figuras 143 e 144 é caracterizado pela compressão progressiva do corpo de prova desde o início do ensaio, sem ser notada uma mudança de gradiente brusca na curva índice de vazios ou deformação volumétrica normalizada x log da tensão efetiva vertical. Este comportamento está de acordo com as características físicas, mineralógicas e micromorfológicas deste solo, que não possui agentes cimentantes evidentes, estando os pacotes de biotita alterada e os grãos de feldspato alterado, em sua maioria, em contato direto, sem formar grandes vazios. Possivelmente, a tensão efetiva aplicada no solo residual DC01 não foi suficiente para definir bem a reta de compressão deste material.

O solo DC02 possui, para baixas tensões, menor compressibilidade que o DC01 com uma mudança de rigidez devido à plastificação da estrutura mais acentuada. Este solo é composto principalmente por pacotes de biotita e feldspato mais intemperizados que o solo DC01. Tais partículas encontram-se tanto em contato direto como separadas por argilominerais, amorfos, oxi-

hidróxidos de ferro e silicatos em geral que juntos atuam como um cimento, acarretando em um comportamento rígido do solo seguido de uma perda de rigidez marcante após a plastificação de tal estrutura.

Os solos da feição leucocrática apresentam comportamento bastante semelhante entre si, com uma mudança de rigidez mais pronunciada que os solos da feição melanocrática. Estes solos possuem uma grande concentração de quartzo, não arredondado e nem liso, e de feldspato alterado na fração areia.

Compressibilidade

Os índices de compressão (C_c) e expansão ou descompressão (C_d), obtidos a partir das curvas da Figura 143, constam na Tabela 30. Os solos apresentaram índices de expansão próximos. Já o índice de compressão é maior para o solo DC02, que possui C_c igual a 0,69, seguido do solo oriundo da mesma feição, DC01, menos intemperizado e com menor índice de vazios. Os solos provenientes da feição leucocrática possuem índices de compressão consideravelmente inferiores aos dos solos da feição melanocrática. Apesar dos solos residuais DC01 e DC04 apresentarem aproximadamente o mesmo e_o , os valores de C_c do solo DC01 é substancialmente superior ao do solo DC04. Logo, tal diferença não pode ser atribuída apenas ao índice de vazios inicial, estando intrinsicamente ligada às distintas composições mineralógicas e distribuição espacial de partículas dos solos de cada feição.

Tabela 30 – Índices de compressão e expansão dos ensaios CRS nos solos residuais de migmatito.

Solo	C_c	C_d
DC01	0,52	0,05
DC02	0,69	0,07
DC03	0,30	0,06
DC04	0,35	0,06

Ao comparar a compressibilidade dos solos das duas feições na Figura 144, tem-se que os solos provenientes da feição melanocrática, para o nível de tensão aplicado, têm uma variação volumétrica normalizada inferior aos solos da feição leucocrática. O solo mais intemperizado da feição melanocrática, DC02, apresenta uma deformação volumétrica normalizada um pouco inferior ao do solo DC01 até uma pressão de cerca de 800 kPa, tornando-se a partir de então mais compressível. Comportamento semelhante é observado nos solos da feição leucocrática, onde o solo mais intemperizado, DC04, possui uma deformação volumétrica normalizada menor que o solo DC03 até uma pressão de

aproximadamente 40 kPa, tendendo em seguida para curvas praticamente coincidentes.

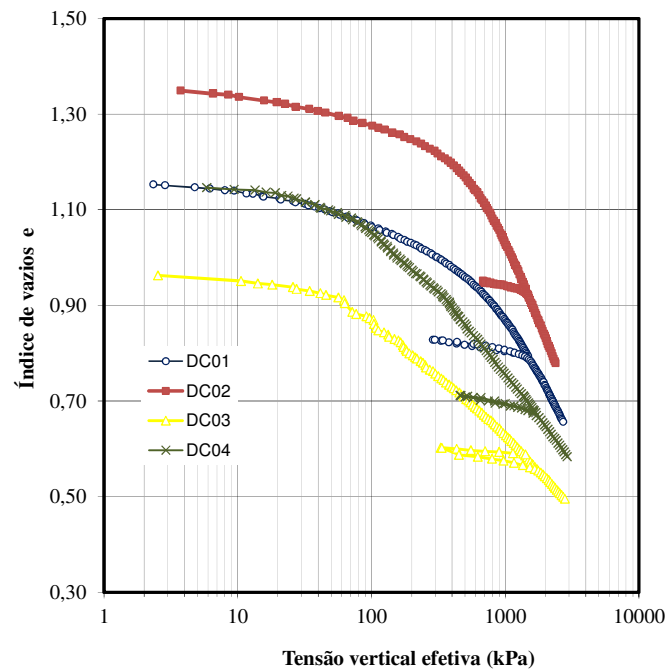


Figura 143 – Resultados dos ensaios CRS em amostras indeformadas. Índice de vazios x log da tensão vertical efetiva.

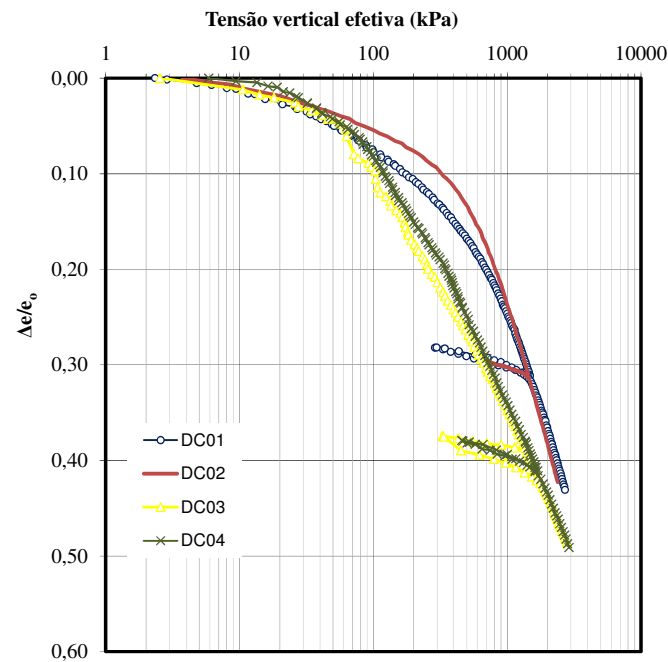


Figura 144 - Resultados dos ensaios CRS em amostras indeformadas. Deformação volumétrica normalizada x log da tensão vertical efetiva.

Tensão de pré-adensamento virtual (cedência, σ'_v)

A rigidez e a “tensão de pré-adensamento virtual” (tensão de cedência - σ'_y) dos solos residuais sob condições edométricas dependem da resistência entre partículas e da interligação entre minerais e aglomerados que permanecem ou são formados com o intemperismo. Como mencionado no capítulo 2, o processo de desestruturação do solo por compressão é contínuo sendo mais ou menos evidente de acordo com a mineralogia, grau de cimentação, índice de vazios e arranjo entre os grãos. Logo, a tensão de cedência é um valor de referência de um processo progressivo.

Os valores desta tensão para os materiais estudados foram obtidos por dois métodos empíricos: pelo método Pacheco e Silva, empregado usualmente para a determinação da tensão de pré-adensamento em solos sedimentares, e através do prolongamento dos trechos da curva do ensaio CRS, como exemplificado na Figura 145. As tensões de cedência estimadas por estes métodos constam na Tabela 31. As obtidas pelo método Pacheco e Silva são sensivelmente superiores às obtidas pelo outro método.

Tabela 31 – Tensão de cedência dos solos residuais de Duque de Caxias obtidos a partir dos resultados de ensaios CRS através do método Pacheco e Silva.

Solo	Tensão de Cedência por Pacheco e Silva (kPa)	Tensão de cedência obtida pela intersecção das retas (kPa)
DC01	570	420
DC02	540	400
DC03	130	70
DC04	115	80

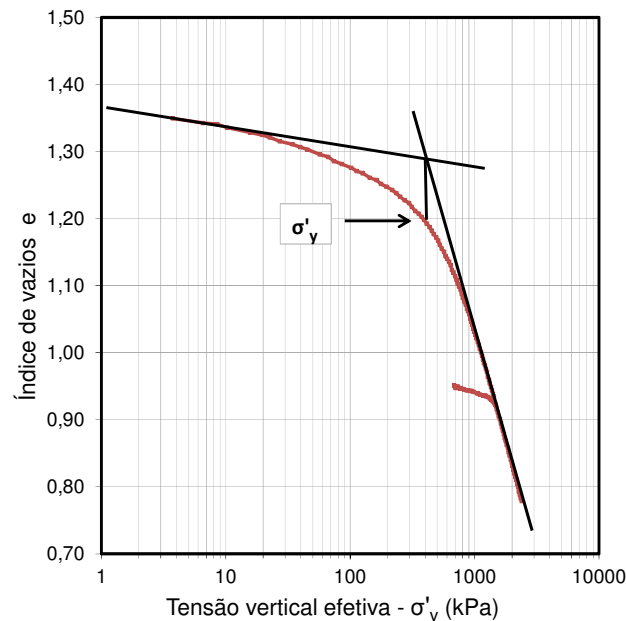


Figura 145 – Exemplo da estimativa da tensão de cedência da estrutura a partir do prolongamento dos trechos da curva do ensaio CRS no solo DC02.

Alguns autores sugerem que a avaliação do comportamento de solos residuais submetidos a ensaios de compressão, principalmente a estimativa da tensão de cedência, seja feita por meio do gráfico deformação x tensão vertical efetiva plotado na escala log-log ou ambos os eixos na escala aritmética (e. g. Vaughan 1985; Wesley, 2010). Os resultados são apresentados nas Figuras 146 b e c com os eixos nestas escalas, sendo o índice de vazios substituído pela deformação volumétrica normalizada ($\Delta e/e_0$). Na Figura 146a têm-se as curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva em escala linear para que diferenças sejam melhores visualizadas.

O solo residual DC02 possui um ponto de inflexão em torno de 400 kPa, evidente principalmente no gráfico na escala log-log (Figura 146c), igual a tensão de cedência obtida pela intersecção do prolongamento dos trechos da curva a partir do gráfico na escala semilogarítmica. O formato da curva deste solo nas Figuras 146 b e c é similar ao modelo proposto por Vaughan (1985) para solos com presença de agentes cimentantes.

Nenhum ponto de inflexão tão evidente é notado no solo DC01, tendo-se apenas uma mudança muito suave da curva no gráfico na escala log-log em torno de 500 kPa.

Os solos residuais da feição leucocrática apresentam comportamento semelhante entre si, com o aumento da rigidez acompanhando o da tensão efetiva vertical (Figuras 146 b e c). Uma mudança de comportamento é notada em torno de 100 kPa no gráfico na escala log-log, que pode estar vinculada ao aumento da densidade dos solos. Nestes últimos, não se tem um indicativo da presença de uma estrutura cimentada.

Estas diferenças nos valores σ'_y obtidos de diferentes formas não devem ser encaradas como uma inconsistência de um ou outro critério. Uma tensão de cedência quando tomada como valor único representa, como mencionado anteriormente, uma zona de plastificação.

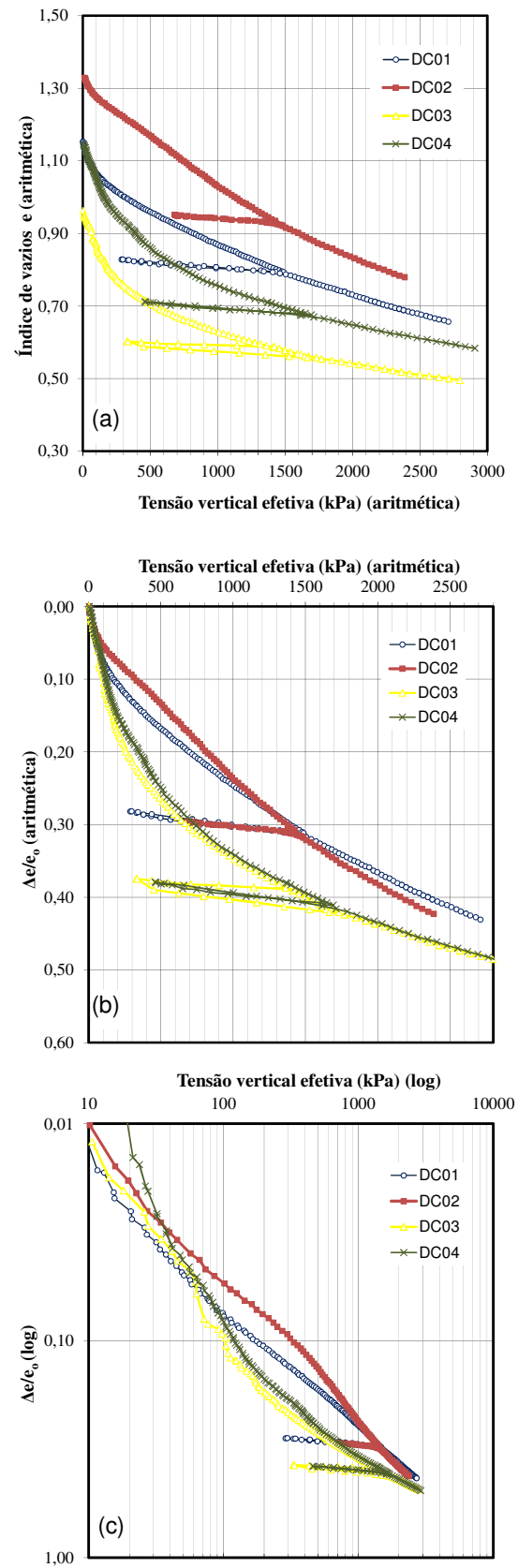


Figura 146 – Resultados dos ensaios CRS dos solos residuais de Duque de Caxias representados de diferentes formas

7.3.1.2.

Ensaios em amostras reconstituídas

Ensaios CRS em amostras reconstituídas próximas ao limite de liquidez foram realizados com o intuito de avaliar o efeito da estrutura na compressibilidade do material indeformado, como sugerido por Vargas (1953), Burland (1990) e Leroueil e Vaughan (1990). Na Tabela 32 constam os dados obtidos nos ensaios.

Dentre os solos estudados, apenas o índice de vazios inicial da amostra amolgada do solo DC03 é inferior ao da amostra intacta. Isto se deve, provavelmente, a estrutura e a composição mineralógica deste solo no estado indeformado (grãos interconectados com macrovazios e pouco material fino). Além disso, detectou-se uma pequena abertura no saco plástico que acomodava a amostra para homogeneização da umidade, acarretando na perda de umidade.

Comparação entre o comportamento das amostras indeformadas e reconstituídas

Os valores de C_c das amostras reconstituídas, obtidos a partir da Figura 147 e apresentados na Tabela 32 são inferiores aos das amostras indeformadas. Quanto ao coeficiente de expansão, não nota-se uma diferença significativa entre os valores obtidos com o solo nos dois estados da feição melanocrática. Já nos da feição leucocrática, tem-se uma redução de quase 50%.

Ao contrário dos resultados em amostras indeformadas, as amostras reconstituídas da feição leucocrática se mostraram menos compressíveis que os solos da feição melanocrática, como podem ser vistos na Figura 148, onde constam as curvas variação volumétrica normalizada *versus* log da tensão vertical efetiva das amostras reconstituídas.

Tabela 32 – Dados dos corpos de prova e resultados dos ensaios CRS nos solos residuais de migmatito no estado amolgado.

Solo	Dados dos corpos de prova					C_c	C_d
	e_{inicial}	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	w (%)	S (%)		
DC01	1,43	11,45	17,22	50,5	100	0,50	0,06
DC02	1,44	11,57	17,35	50,0	100	0,64	0,07
DC03	0,77	14,46	18,74	30,0	100	0,19	0,03
DC04	1,33	11,09	16,71	50,5 8	100	0,28	0,04

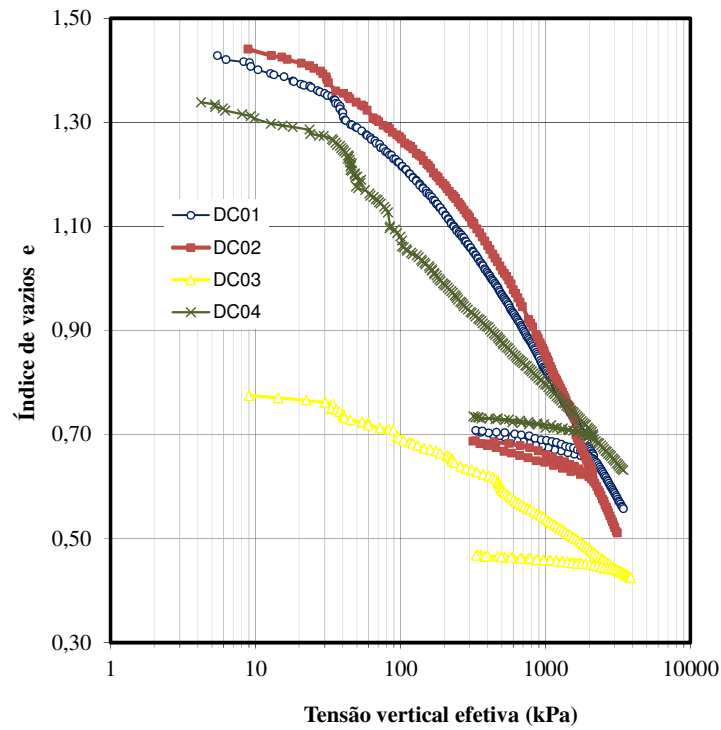


Figura 147 - Resultados dos ensaios CRS em amostras reconstituídas. Índice de vazios x log da tensão vertical efetiva.

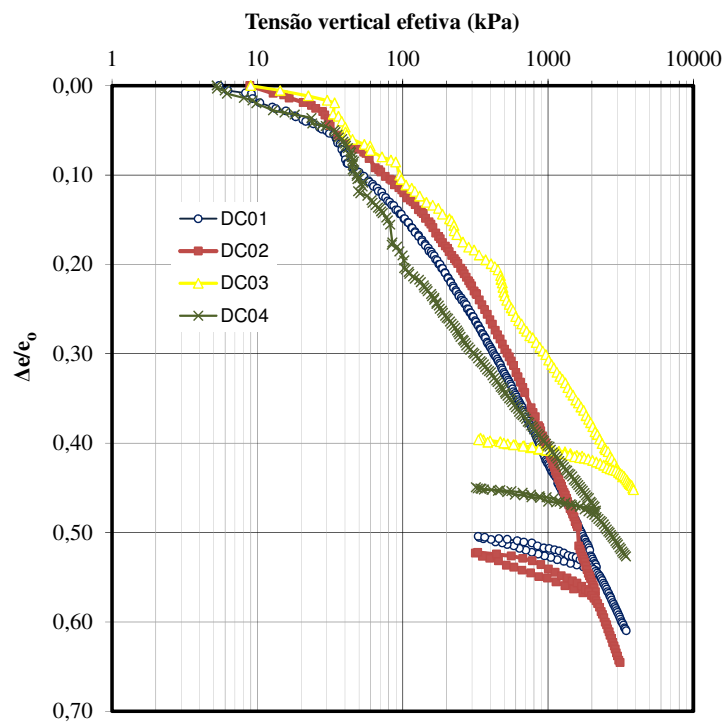


Figura 148 - Resultados dos ensaios CRS em amostras reconstituídas. Deformação volumétrica normalizada x log da tensão vertical efetiva.

As diferenças de comportamento entre os materiais indeformados e reconstituídos ficam nítidas ao representar o índice de vazios ou variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva no mesmo gráfico (Figuras 149 a 152).

O solo DC01 reconstituído possui uma compressibilidade inicial maior que o indeformado, como observado nas Figuras 149 a e b. Ao aproximar-se da tensão de 450 kPa, a amostras indeformada tende a um comportamento similar ao da reconstituída no espaço e x $\log \sigma'_v$.

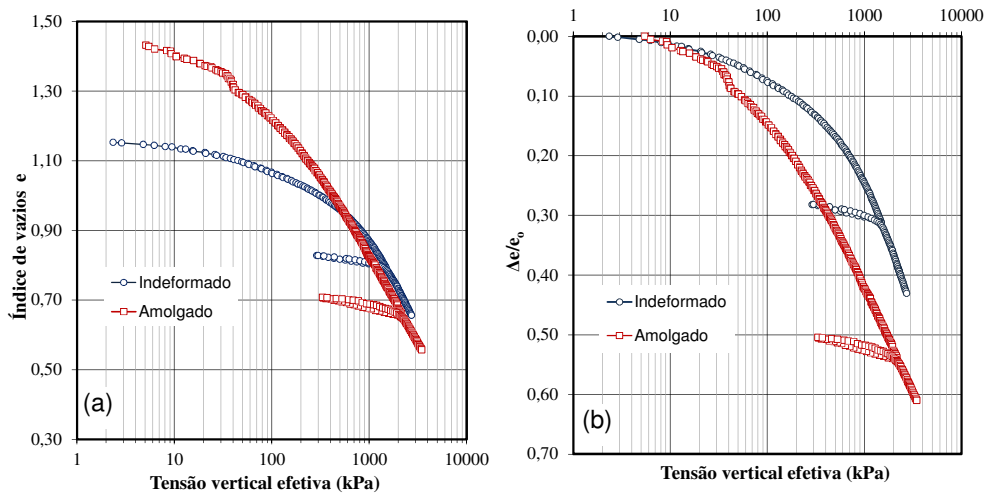


Figura 149 – Solo DC01. Comparação entre as curvas do solo desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical efetiva (b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva.

Já o comportamento do solo DC02 (Figura 150a) está de acordo com o proposto por Leroueil e Vaughan (1990) para um material com estrutura cimentada, com o solo atingindo uma região impossível de ser alcançada quando o mesmo se encontra desestruturado, com o material indeformado mantendo maiores índices de vazios que o solo na condição reconstituída para o mesmo nível de tensão efetiva. Além disso, após a plastificação da estrutura, sua compressibilidade é superior à apresentada pelo material reconstituído.

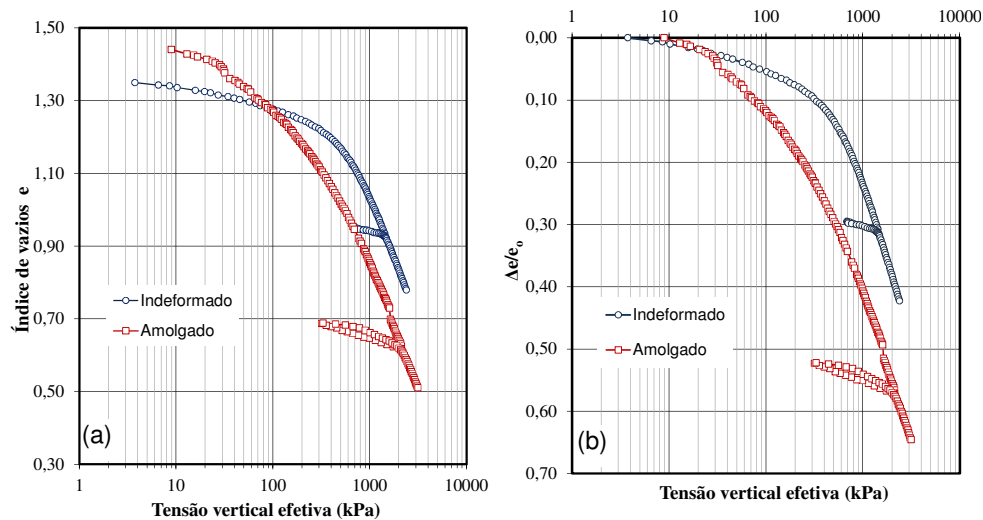


Figura 150 – Solo DC02. Comparação entre as curvas do solo desestruturado e indeformado (a) índice de vazios x tensão vertical efetiva (b) variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva.

A curva e x $\log \sigma'_v$ do solo DC03 reconstituído encontra-se abaixo da curva da amostra indeformada (Figura 151a). Tal comportamento pode estar relacionado à distribuição espacial das partículas do solo no estado natural, que encontram-se em contato direto formando macrovazios visíveis na lâmina delgada, com presença de pouco material argiloso. Além disso, como mencionado, o material perdeu umidade quando armazenado para equalização da mesma. Ainda pode ter contribuído para tal o fato de que uma pressão mínima era aplicada durante a moldagem dos corpos de prova. Desta forma, obteve-se um material mais denso e menos compressível que o solo no estado natural.

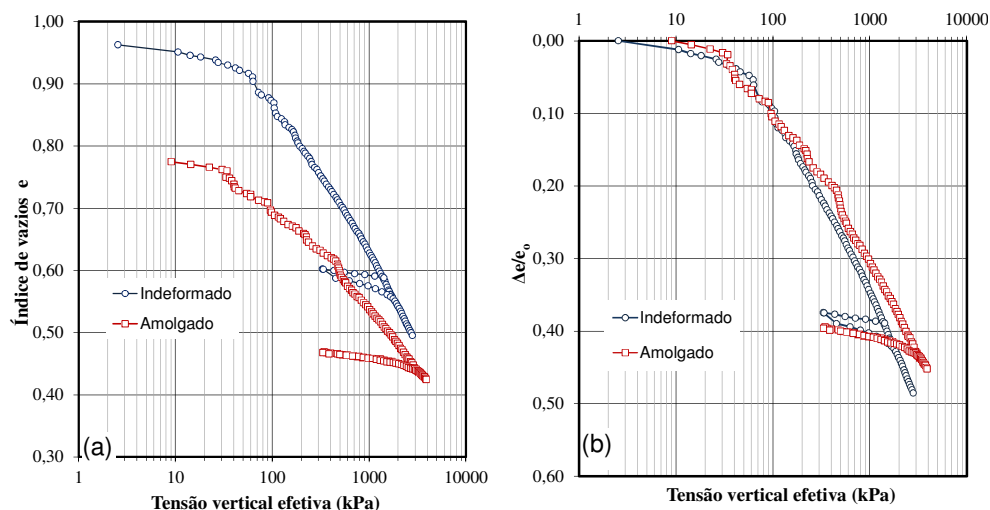


Figura 151 – Solo DC03. Comparação entre as curvas do solo desestruturado e indeformado (a) índice de vazios e x tensão vertical efetiva (b) variação volumétrica normalizada $\Delta e/e_0$ x tensão vertical efetiva.

De acordo com as classificações de Cuccovillo e Coop (1997) e de Leroueil (1992) o solo DC04 apresenta comportamento similar, respectivamente, ao de um solo fracamente estruturado e ao de um solo ideal (Figura 152a). Estes autores afirmam que a curva índice de vazios e x log da tensão efetiva vertical de solos com estrutura mais compacta e com cimentação fraca ou ausência desta tendem à curva do material reconstituído no limite de liquidez pela esquerda. Comportamento similar também pode ser atribuído ao solo DC01. Entretanto, no solo DC04, nota-se a divergência das curvas após a tensão de 500 kPa, com a amostra indeformada passando a ter um comportamento mais compressível.

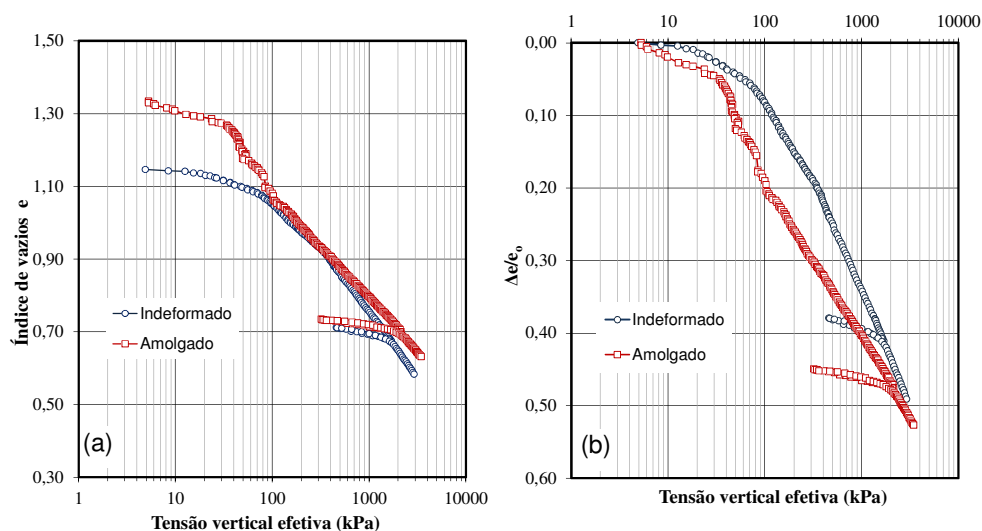


Figura 152 - Solo DC04. Comparação entre as curvas do solo desestruturado e indeformado (a) índice de vazios e x tensão vertical efetiva (b) variação volumétrica normalizada $\Delta e/e_0$ x tensão vertical efetiva.

Desta forma, tem-se que apenas o solo DC02 apresentou comportamento claro de um solo com estrutura cimentada como definido por Leroueil e Vaughan (1990), estando de acordo com os resultados de caracterização que já indicavam a presença de tal estrutura. Apesar da curva índice de vazios e x log da tensão efetiva vertical do solo DC01 ultrapassar de forma sutil a curva da amostra reconstituída, nenhuma indicação de cimentação foi detectada nos ensaios de caracterização, sendo seu comportamento atribuído à composição mineralógica e a distribuição granulométrica e espacial dos grãos. Tais características também regem o comportamento dos solos DC03 e DC04. Entretanto, como

destacado no início deste tópico, pode ter ocorrido algum tipo de perturbação na estrutura dos solos durante o processo de saturação e passagem dos corpos de prova para o equipamento CRS, sendo visivelmente os solos da feição leucocrática os mais afetados.

7.3.2. Ensaio edométrico

Os ensaios edométricos foram executados nos materiais cujo comportamento tensão-deformação-resistência foi avaliado (solo DC02, pertencente ao migmatito de Duque de Caxias, e o solo residual de rocha alcalina de Tanguá). Como são apenas dois materiais, os resultados dos ensaios em amostras naturais e reconstituídas são apresentados de forma conjunta, por material.

De acordo com Martins (2001), a influência da estrutura de um material (arranjo entre grãos e cimentação) em seu comportamento mecânico pode ser avaliada comparando os resultados de ensaios no solo indeformado com o reconstituído na mesma porosidade, condição de saturação e submetido ao mesmo carregamento que o material indeformado. Desta forma, as amostras reconstituídas foram moldadas na umidade natural e com o índice de vazios próximo ao da amostra indeformada.

7.3.2.1. Solo residual de migmatito – DC02

Na Tabela 33 constam os dados dos corpos de prova empregados nos ensaios edométricos em amostras indeformada e reconstituída do solo DC02.

Tabela 33 – Dados dos corpos de prova dos ensaios edométricos do solo DC02.

Estado	Dados do corpo de prova				
	e_{inicial}	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	w (%)	S (%)
Indeformado	1,40	11,74	15,88	35,2	72,3
Reconstituído	1,42	11,65	15,75	35,2	71,3

Apesar das simplificações impostas pela Teoria do Adensamento, principalmente a que afirma que as propriedades do solo não variam durante o processo de adensamento, optou-se por apresentar e analisar a variação de propriedades tais como coeficiente de adensamento (C_v) e coeficiente de permeabilidade (k) ao longo do ensaio. Na Tabela 34 são apresentados os

resultados dos ensaios de adensamento edométrico com o solo em ambos estados, natural e reconstituído. A partir destes dados nota-se que o coeficiente de adensamento do solo natural, após atingir um valor máximo correspondente ao estágio de 627,63 kPa, decresce de forma contínua. O mesmo padrão é observado para o material reconstituído, entretanto, a queda na magnitude de C_v tem início para uma tensão vertical efetiva inferior. Esta relação fica ainda mais clara ao plotar o gráfico dos valores de C_v em função da tensão vertical efetiva na escala semilogarítmica (Figura 153a).

O material reconstituído apresenta uma grande variação no coeficiente de variação volumétrica (m_v) e no coeficiente de permeabilidade não observada no material natural. Após a tensão de 627,63 kPa, o coeficiente de deformação volumétrica e o coeficiente de permeabilidade do solo nas duas condições tendem a valores próximos (Figuras 153 b e c) indicando, possivelmente, o final da plastificação mais expressiva da estrutura do solo.

Tabela 34 – Resultados dos ensaios de adensamento edométrico do solo DC02 no estado natural e reconstituído.

Estado	Estágio (kPa)	e	$C_v (10^{-2})$ (cm ² /s)	$m_v (10^{-4})$ (kPa ⁻¹)	k (10 ⁻⁶) (cm/s)	Cc	Cd
Indeformado	19,61	1,397	8,81	2,7	2,3	0,89	0,08
	39,23	1,392	8,77	1,2	1,0		
	78,45	1,382	8,71	1,0	0,9		
	156,91	1,368	9,56	0,8	0,7		
	313,81	1,343	9,41	0,7	0,6		
	627,63	1,300	10,20	0,6	0,6		
	1253,30	1,143	8,83	1,2	1,0		
	2510,52	0,873	6,17	1,1	0,7		
	2902,8	0,823	3,34	0,9	0,2		
Reconstituído	19,61	1,377	9,6	20,0	18,9	0,64	0,12
	39,23	1,338	8,79	8,5	7,4		
	78,45	1,271	7,98	7,5	5,9		
	156,91	1,193	9,78	4,5	4,3		
	313,81	1,100	9,05	2,8	2,5		
	627,63	0,986	7,74	1,8	1,4		
	1253,30	0,828	6,06	1,4	0,8		
	2510,52	0,602	3,49	1,1	0,4		
	2902,8	0,557	3,75	0,73	0,3		

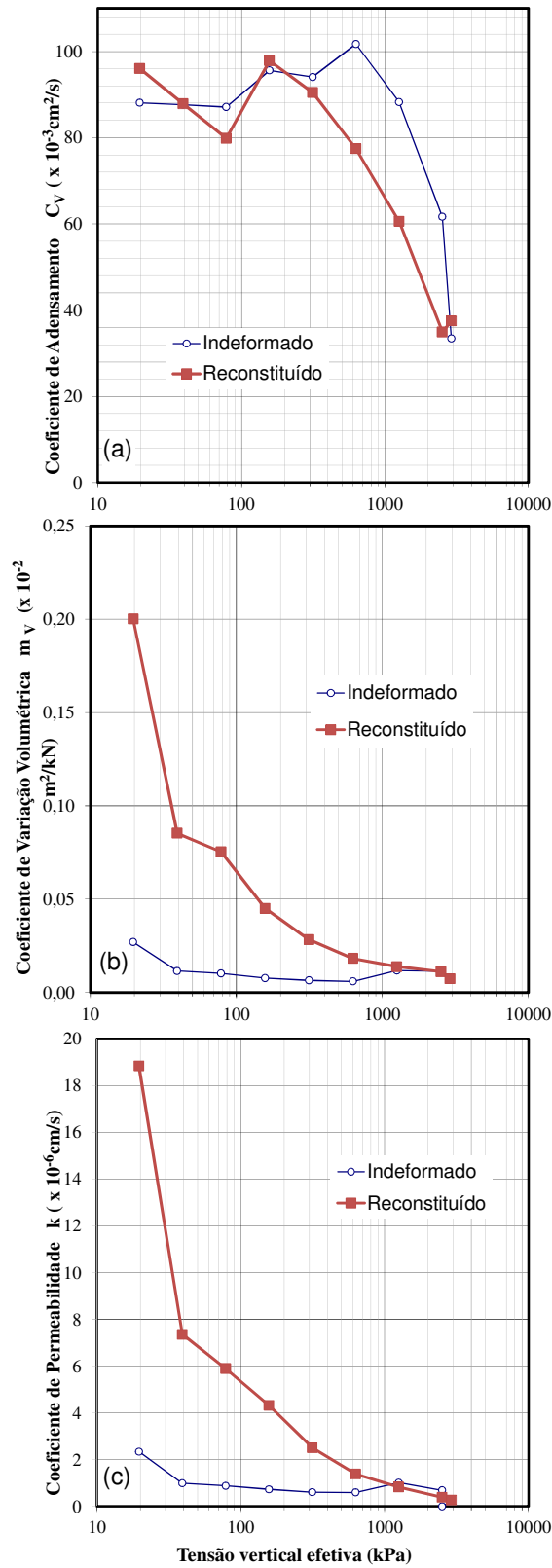


Figura 153 – Gráficos de resultados dos ensaios de adensamento edométrico em amostras natural e reconstituída do solo DC02 (a) Coeficiente de adensamento, (b) Coeficiente de variação volumétrica e (c) Coeficiente de permeabilidade, todos em função da tensão vertical efetiva.

A presença de estrutura cimentada neste solo fica evidente no gráfico índice de vazios x tensão efetiva vertical, seja na escala semilogarítmica ou estando ambos os eixos na escala aritmética (Figuras 154 a e b). O solo indeformado, mesmo possuindo o mesmo índice de vazios e umidade iniciais da amostra reconstituída, sustenta valores de índice de vazios superiores para uma mesma tensão. O comportamento rígido do solo natural persiste até a plastificação da estrutura ser atingida. Uma vez ultrapassada esta tensão, observa-se a diminuição acentuada da rigidez com as ligações entre partículas sendo destruídas progressivamente, levando-o a convergir para a curva do material reconstituído, como o comportamento estabelecido por Leroueil e Vaughan (1990) para um solo com estrutura cimentada. Tal comportamento implica em um índice de compressão do solo indeformado superior ao do material reconstituído (Tabela 34). O índice de expansão do solo reconstituído é superior ao do material natural, podendo ser um indicativo de que a estrutura do solo não foi completamente destruída para o nível de tensão aplicado no ensaio.

Tensão de cedência

O valor da tensão de cedência, ver Tabela 35, obtido pelo método Pacheco e Silva através do gráfico índice de vazios x tensão vertical efetiva na escala semilogarítmica (Figura 154a), foi de 800 kPa. Entretanto, no gráfico da Figura 154b, onde tal relação é plotada na escala aritmética, assim como nos ensaios CRS deste solo, tem-se um ponto de inflexão para uma tensão inferior à estimada pelo método Pacheco e Silva, em torno de 600 kPa que corresponderia, segundo o critério de Vaughan (1985), à tensão de cedência do solo. Este último valor coincide com a tensão correspondente ao estágio a partir do qual m_v e k dos ensaios da amostra indeformada e reconstituída passam a tender aos mesmos valores, sendo ainda o mesmo valor da tensão de cedência obtida através do prolongamento dos trechos da curva seguindo a metodologia apresentada na Figura 145.

Tabela 35 – Tensões de cedência do solo DC02 estimadas através do método Pacheco e Silva e do prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico.

Tensão de Cedência por Pacheco e Silva (kPa)	Tensão de cedência obtida pela intersecção das retas (kPa)
800	600

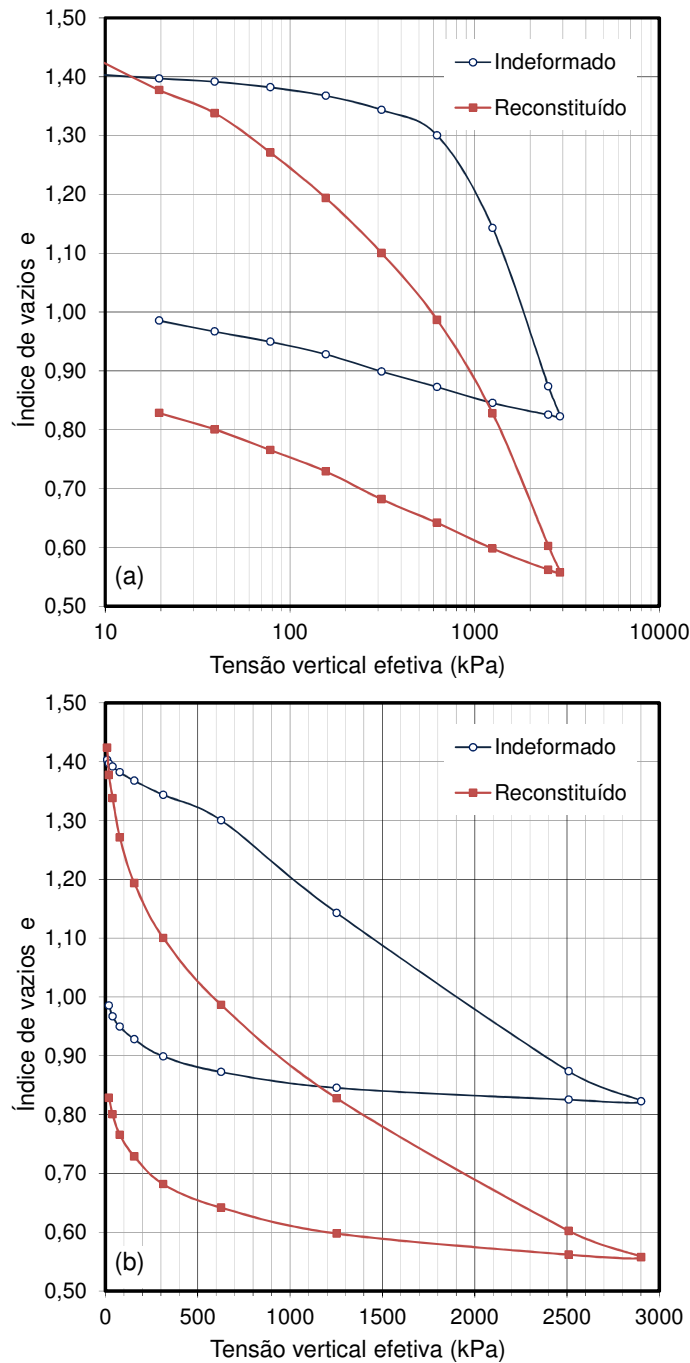


Figura 154 – Curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva em escala (a) semilogarítmica e (b) ambos os eixos em escala aritmética do solo DC02.

Comparação com os resultados dos ensaios CRS

Para comparar os resultados dos ensaios CRS e edométricos executados neste solo, a variação volumétrica normalizada x tensão efetiva vertical destes ensaios foram plotadas com os eixos em diferentes escalas (Figura 155). O solo

reconstituído com o teor de umidade elevado e submetido ao ensaio CRS apresenta comportamento semelhante ao reconstituído na umidade natural e adensado na prensa edométrica. Apesar de terem sido moldados em condições distintas, o índice de vazios inicial das amostras é similar (ver Tabela 36).

O ensaio edométrico executado com amostra indeformada apresenta um comportamento mais rígido que o submetido ao ensaio CRS, estando a curva correspondente a deformação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva do último entre as curvas do ensaio edométrico e as do material reconstituído (Figura 155a). Além disso, o valor do índice de compressão da amostra indeformada do ensaio CRS possui um valor intermediário entre o correspondente ao da amostra no mesmo estado do ensaio edométrico e ambos os ensaios em amostras reconstituídas. Nas Figuras 155 b e c estão indicadas por setas as tensões de cedência dos ensaios em amostras indeformadas correspondentes aos pontos de inflexão das curvas. Assim como o índice de compressão, a amostra submetida ao ensaio edométrico apresentou maior tensão de cedência, independente do método empregado para estimativa. Tal comportamento pode estar relacionado ao índice de vazios inicial da amostra submetida ao ensaio CRS, que é inferior ao da amostra ensaiada na prensa edométrica, e/ou ao processo de saturação e montagem do ensaio CRS, que pode ter afetado a estrutura do mesmo.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de adensamento unidimensionais do solo DC02 no estado natural e reconstituído.

Ensaio	e_{inicial}	Cc	Cd
Edometrico- Indeformado	1,40	0,89	0,08
Edométrico- Reconstituído	1,42	0,64	0,12
CRS - Indeformado	1,26*	0,69	0,07
CRS - Reconstituído	1,44	0,63	0,07

*Após a saturação, o índice de vazios passou para 1,37.

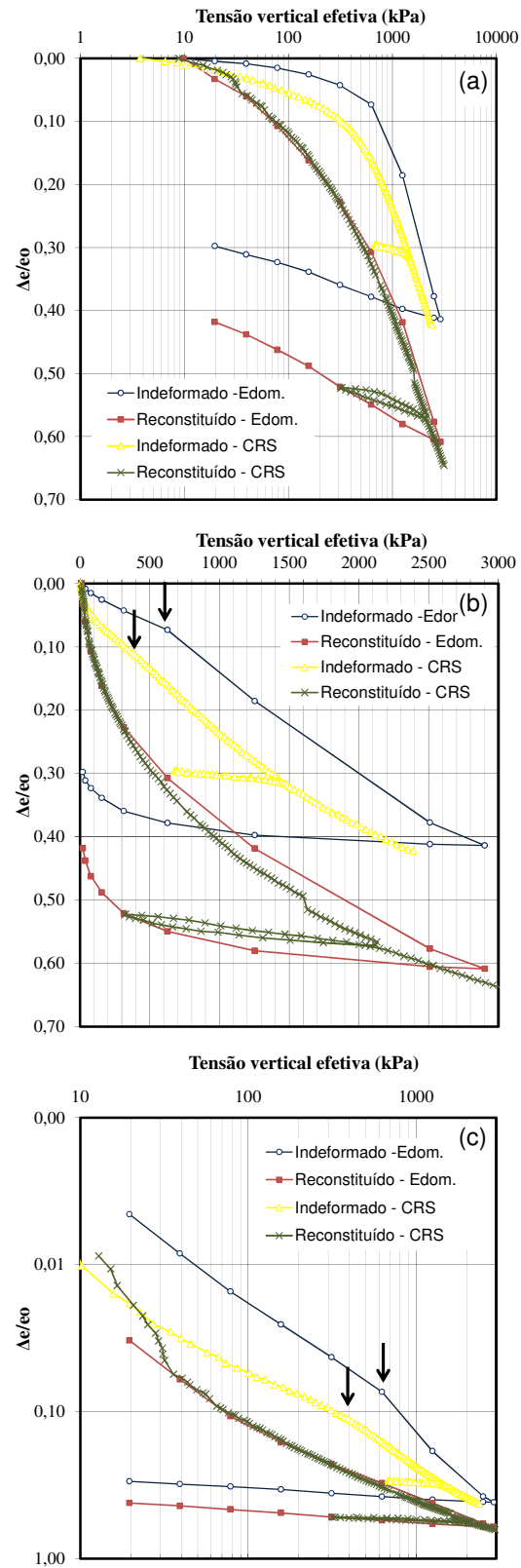


Figura 155 – Curvas variação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva dos ensaios unidimensionais (CRS e edométrico) do solo DC02 apresentadas com eixo em diferentes escalas (a) semilogarítmica, (b) aritmética e (c) log x log.

7.3.2.2.**Solo residual de rocha alcalina de Tanguá (T)**

Os dados referentes aos corpos de prova empregados nos ensaios edométricos do solo residual de Tanguá constam na Tabela 37. As características da amostra reconstituída são praticamente idênticas a da amostra indeformada, como desejado.

Tabela 37 – Dados dos corpos de prova dos ensaios edométricos executados em amostras indeformada e reconstituída do solo residual de Tanguá (T)

Estado	$e_{inicial}$	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	w (%)	S (%)
Indeformado	0,89	14,14	16,03	13,4	40,9
Reconstituído	0,89	14,16	16,06	13,4	41,1

Na Tabela 17 são apresentadas as propriedades das amostras indeformada e reconstituída obtidas ao longo dos ensaios. Gráficos com a variação das mesmas em função da tensão efetiva vertical estão plotados na Figura 156. Até o estágio de 78,45 kPa, o valor do coeficiente de adensamento em ambos os ensaios permanece praticamente constante, sendo o correspondente à amostra reconstituída inferior ao da amostra indeformada (Figura 156a). O coeficiente de deformação volumétrica da amostra indeformada cresce até esta mesma tensão, enquanto o material reconstituído apresenta uma queda acentuada, partindo de um valor superior. Para tensões efetivas verticais acima de 78,45 kPa, o coeficiente de adensamento, de deformação volumétrica e de permeabilidade das amostras indeformada e reconstituída convergem (Figura 156).

Tabela 38 – Resultados dos ensaios de adensamento edométrico do solo T no estado natural e reconstituído.

Estado	Estágio (kPa)	e	$C_v (10^{-2})$ (cm ² /s)	$m_v (10^{-4})$ (kPa ⁻¹)	k (10 ⁻⁶) (cm/s)	Cc	Cd
Indeformado	19,61	0,884	8,68	2,1	1,75	0,34	0,05
	39,23	0,871	8,58	3,5	2,95		
	78,45	0,839	8,38	4,4	3,63		
	156,91	0,795	8,04	3,1	2,46		
	313,81	0,729	7,56	2,4	1,80		
	627,63	0,644	6,93	1,6	1,12		
	1253,30	0,557	6,24	0,9	0,55		
	2510,52	0,454	2,92	0,6	0,02		
Reconstituído	2902,8	0,434	0,81	0,4	0,03	0,30	0,07
	19,61	0,813	5,5	8,9	4,82		
	39,23	0,771	5,39	6,4	3,37		
	78,45	0,714	5,22	4,9	2,50		
	156,91	0,649	7,82	3,1	2,34		
	313,81	0,574	7,39	2,1	1,53		
	627,63	0,479	6,88	1,3	0,86		
	1253,30	0,462	6,32	0,8	0,47		
	2510,52	0,465	4,29	0,5	0,22		
	2902,8	0,482	3,98	0,3	0,12		

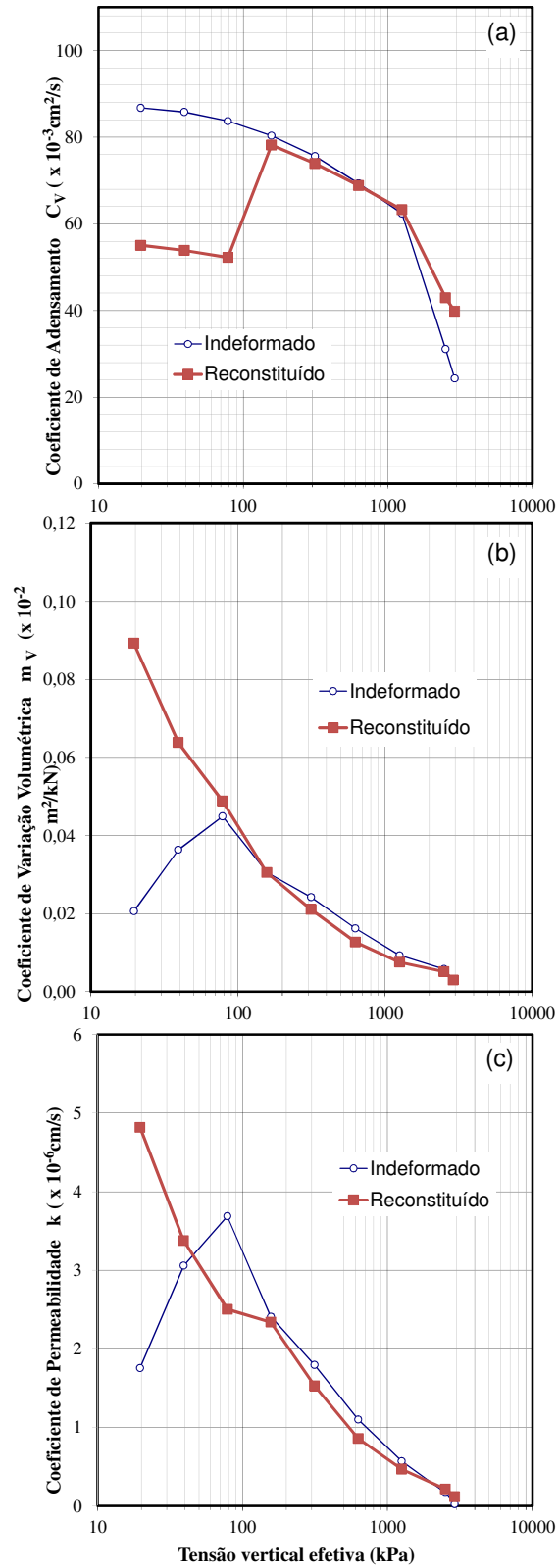


Figura 156 – Gráficos de resultados dos ensaios de adensamento edométrico em amostras natural e reconstituída do solo de Tanguá (T) (a) Coeficiente de adensamento, (b) Coeficiente de variação volumétrica e (c) Coeficiente de permeabilidade, todos em função da tensão vertical efetiva.

As curvas variação índice de vazios x tensão vertical efetiva do solo nos dois estados são bastante similares, com o material indeformado apresentado uma maior rigidez no início do ensaio (Figura 157a). Para uma tensão efetiva de 600kPa, as curvas se cruzam para a partir de então a amostra reconstituída manter maior índice de vazios que a amostra indeformada para mesma tensão efetiva vertical. Entretanto, as curvas são praticamente coincidentes a partir desta tensão, sendo tal diferença atribuída a pequenas diferenças na rotina de execução dos ensaios.

Os índices de compressão das amostras ensaiadas sob as duas condições são bastante próximos, com o C_c da amostra indeformada sendo um pouco superior ao da reconstituída. O inverso ocorre com a magnitude do índice de expansão (ver Tabela 38).

Tensão de cedência

Os valores da tensão de cedência obtidos pelos métodos de Pacheco e Silva e pelo prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico na escala semilogarítmica são apresentados na Tabela 39. Assim como nos ensaios dos solos do perfil de migmatito, a tensão de cedência obtida pelo método Pacheco e Silva é superior à obtida pelo outro método citado.

Na Figura 157b, não é observada uma diferença significativa entre o comportamento do solo reconstituído e indeformado, como notado no solo DC02 que apresenta cimentação. As propriedades (C_v , m_v e k) das amostras indeformada e reconstituída passaram a tender aos mesmos valores a partir de uma tensão de cerca de 80 kPa, valor este próximo à tensão de cedência estimada pelo prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico na escala semilogarítmica (Tabela 39).

Tabela 39 – Tensões de cedência do solo residual de Tanguá estimadas através do método Pacheco e Silva e do prolongamento dos trechos da curva do ensaio edométrico.

Tensão de Cedência por Pacheco e Silva (kPa)	Tensão de cedência obtida pela intersecção das retas (kPa)
200	100

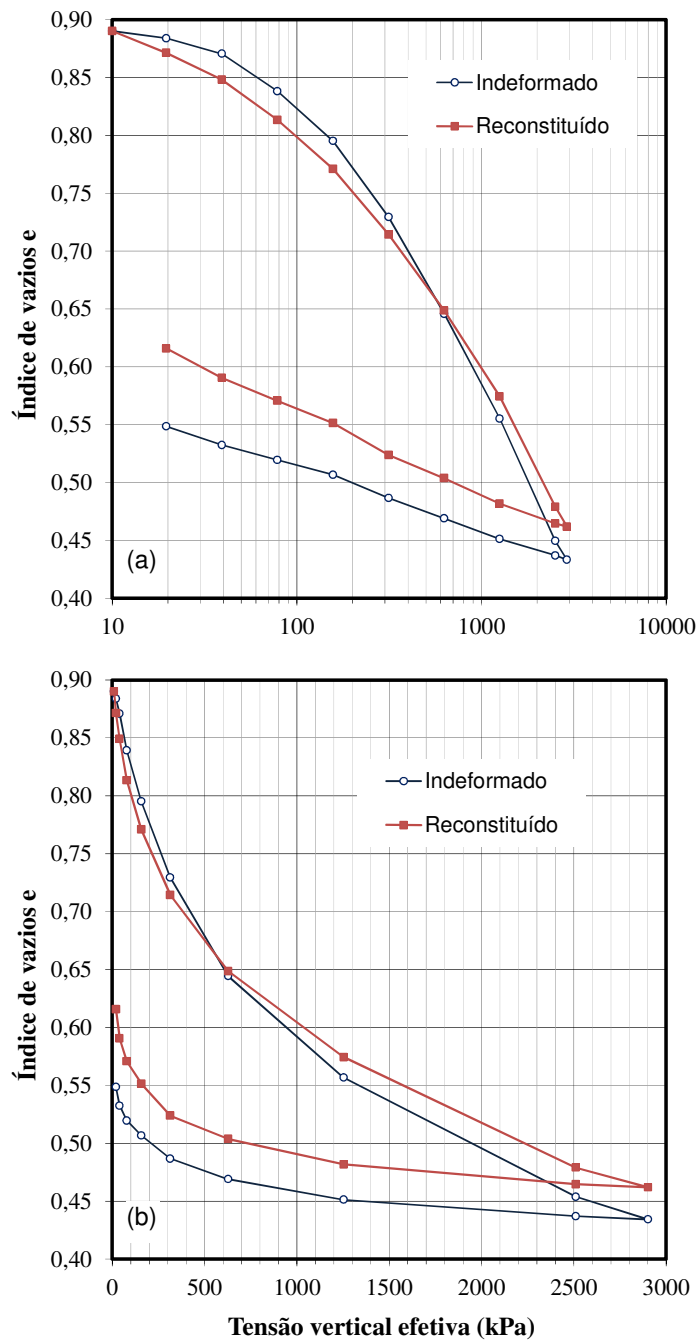


Figura 157 – Curvas índice de vazios x tensão vertical efetiva em escala (a) semilogarítmica e (b) ambos os eixos em escala aritmética do solo residual de Tanguá (T).

7.3.3. Adensamento isotrópico

O adensamento isotópico precede a fase de cisalhamento nos ensaios triaxiais. Logo, a compreensão da influência deste tipo de carregamento serve de subsídio para a análise do comportamento do solo quando submetido ao

cisalhamento. Desta forma, ensaios de adensamento isotrópico em amostras indeformadas foram executados nos solos DC02 e T.

7.3.3.1.

Solo residual de migmatito – DC02

Os dados do corpo de prova empregado no ensaio de adensamento isotrópico constam na Tabela 40.

Tabela 40 – Dados do corpo de prova do ensaio isotrópico com amostra indeformada do solo DC02.

e_{inicial}	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	w (%)	S (%)
1,43	11,59	15,41	32,9	66,1

A curva índice de vazios x log da tensão vertical efetiva, única tensão comum aos ensaios de adensamento unidimensional e isotrópico, é apresentada junto com os dados dos ensaios edométricos e CRS na Figura 158. Devido às limitações do equipamento, só foi possível alcançar uma tensão efetiva média de 567 kPa, insuficiente para provocar a completa plastificação da estrutura do solo. A curva do ensaio isotrópico, cujo índice de vazios inicial é próximo ao do ensaio edométrico, apresenta comportamento similar a este, como pode ser visto nesta figura. Ao plotar tais dados em função da deformação volumétrica normalizada com os eixos em diferentes escalas (Figura 159), estas curvas praticamente coincidem, sugerindo o comportamento isotrópico do material. Além disso, considerou-se razoável assumir que a tensão de cedência do solo quando submetido à compressão isotrópica, é próxima a do ensaio edométrico, cuja magnitude é 600kPa se admitido o método de intersecção do prolongamento da retas ou o ponto de inflexão quando os dados são plotados em função da deformação volumétrica normalizada em escala aritmética, e 800 kPa se calculado pelo método Pacheco e Silva.

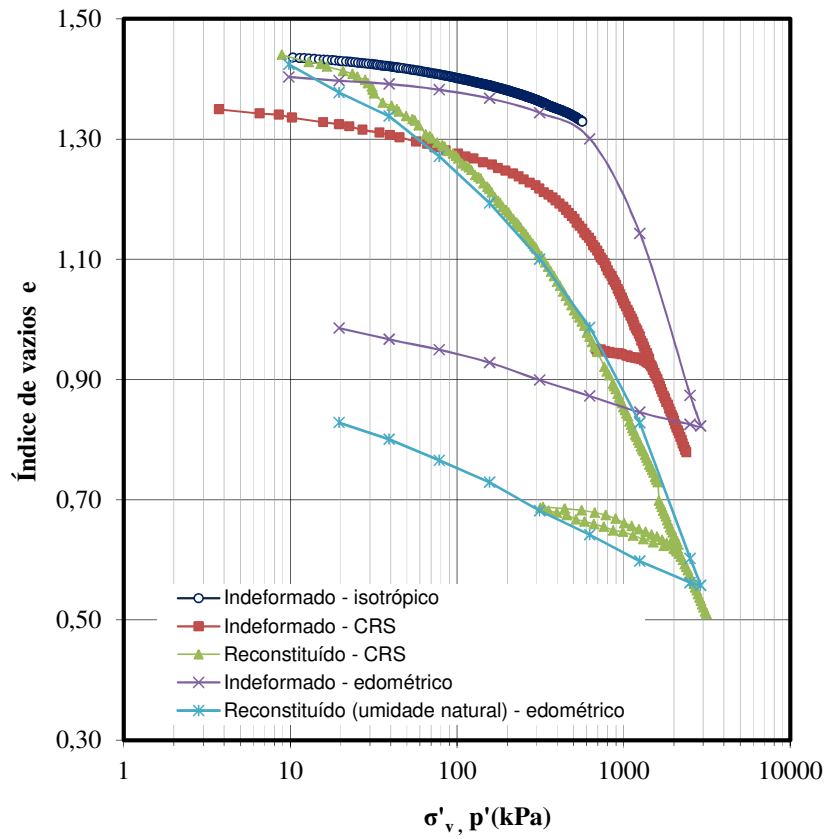


Figura 158 – Apresentação do resultado do ensaio de adensamento isotrópico no solo residual DC02 em conjunto com os resultados dos ensaios de adensamento edométrico e CRS.

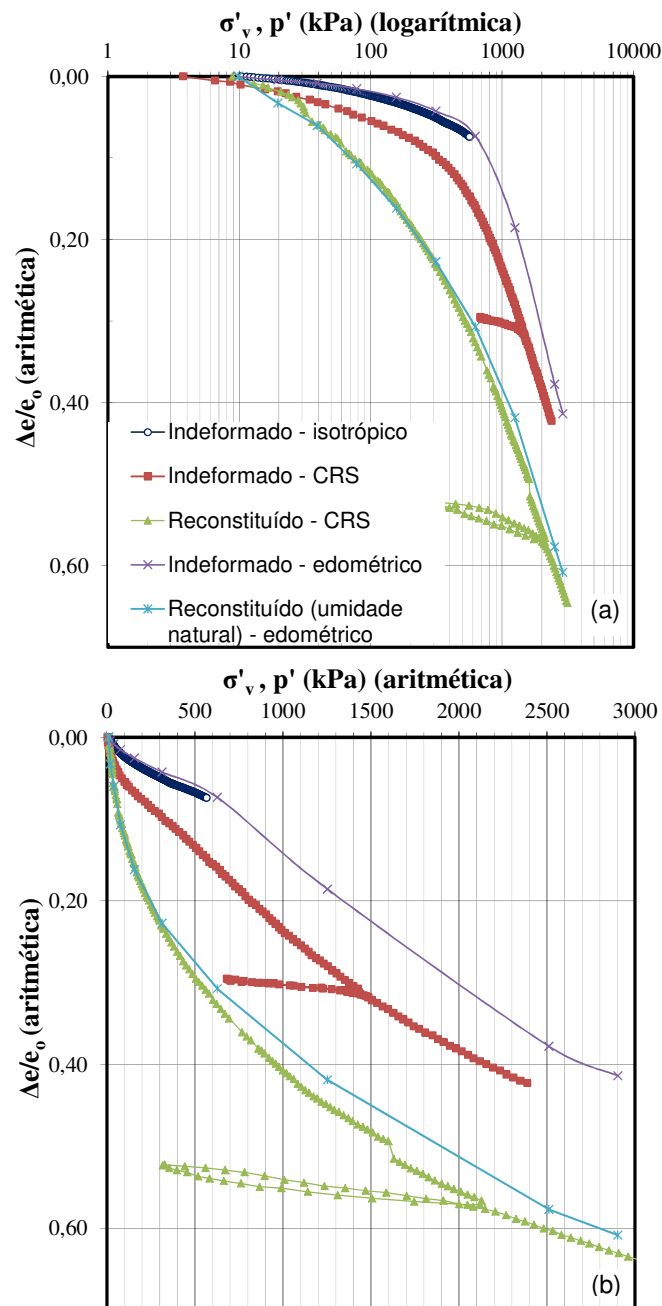


Figura 159 – Resultado dos ensaios de adensamento do solo residual DC02 em função da deformação volumétrica normalizada com os eixos plotados em diferentes escalas.

7.3.3.2. Solo residual da rocha alcalina de Tanguá (T)

As características gerais do corpo de prova ensaiado encontram-se na Tabela 41. A variação do índice de vazios x a tensão efetiva vertical é apresentada na Figura 160 juntamente com os dados dos ensaios de

adensamento edométrico. Tem-se que o índice de vazios inicial do corpo de prova é superior aos dos ensaios edométricos. Os valores da tensão de cedência obtidos pelos métodos de Pacheco e Silva e intersecção do prolongamento das retas da curva e x log de σ'_v constam na Tabela 42.

A magnitude da tensão calculada pelo método Pacheco e Silva é um pouco superior à calculada pela intersecção do prolongamento das curvas. O índice de compressão determinado foi o mesmo do ensaio edométrico, 0,34.

Tabela 41 – Dados do corpo de prova do ensaio isotrópico com amostra indeformada do solo T.

$e_{inicial}$	γ_d (kN/m³)	γ_n (kN/m³)	w (%)	S (%)
1,23	11,97	15,05	25,8	57,0

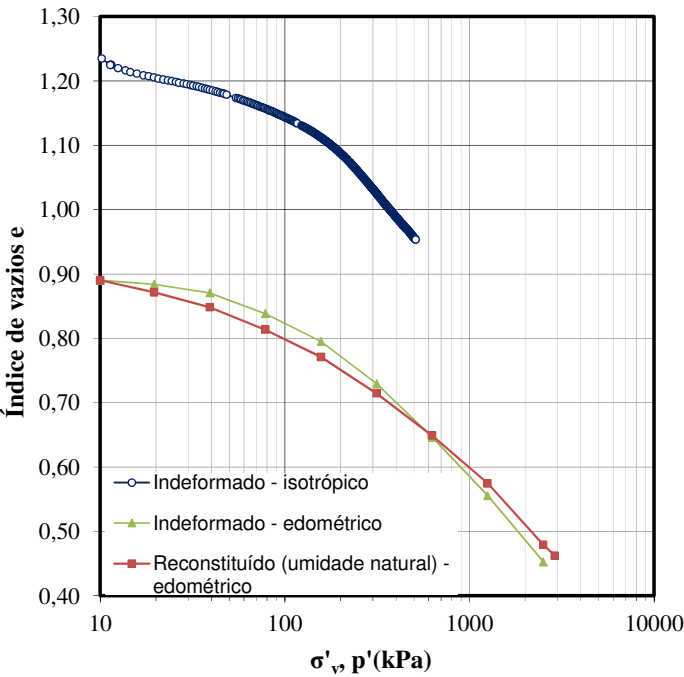


Figura 160 – Apresentação do resultado do ensaio de adensamento isotrópico no solo residual Tem conjunto com os resultados dos ensaios de adensamento edométrico.

Tabela 42 – Tensões de cedência estimadas e índice de compressão do solo residual de Tanguá submetido ao ensaio de adensamento isotrópico.

Tensão de Cedência por Pacheco e Silva (kPa)	Tensão de cedência obtida pela intersecção das retas (kPa)	Cc
130	110	0,34

Devido à variabilidade do índice de vazios, os dados também foram plotados em função da deformação volumétrica normalizada, sendo apresentado com os eixos em diferentes escalas na Figura 161. Na Figura 161a tem-se que a curva do ensaio isotrópico ultrapassa sutilmente a curva do ensaio de adensamento edométrico seguindo, após a cedência da estrutura, em paralelo. Na Figura 161b nenhum ponto de inflexão evidente é observado; tem-se apenas uma diminuição da compressibilidade no início do ensaio para uma tensão em torno de 350 kPa.

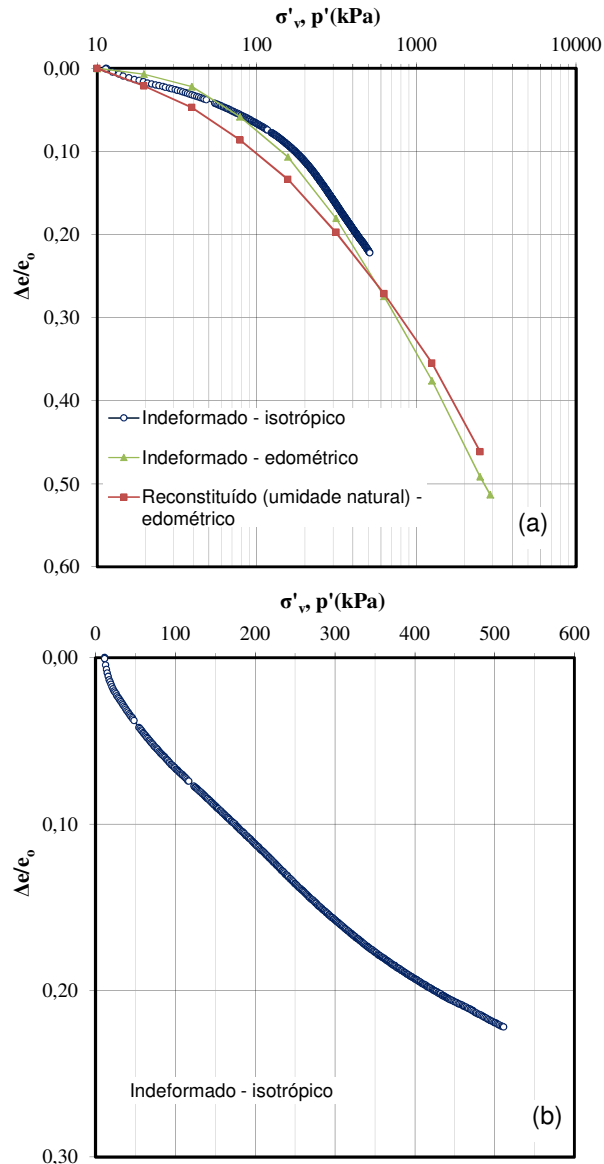


Figura 161 – Resultado dos ensaios de adensamento do solo residual T em função da deformação volumétrica normalizada com os eixos plotados em diferentes escalas.

7.4.

Considerações gerais

Para dar continuidade à caracterização dos solos pertencentes ao perfil de migmatito (DC01, DC02, DC03 e DC04) e ao residual de rocha alcalina de Tanguá (T), ensaios de compressão unidimensional em amostras indeformadas e reconstituídas foram executados.

Com o intuito de agilizar a execução dos ensaios de adensamento unidimensionais e pela possibilidade de obtenção de dados de forma contínua, optou-se pela execução de ensaios de deformação controlada (CRS) ao invés dos ensaios edométricos convencionais nos solos pertencentes ao perfil de migmatito. As amostras reconstituídas nestes ensaios foram secas ao ar e umedecidas próximas ao limite de liquidez ou em forma de pasta, caso o solo não apresentasse limites.

Os solos DC02 e o residual de Tanguá foram submetidos a ensaios de adensamento edométrico no estado indeformado e com amostras reconstituídas no teor de umidade natural e com a mesma porosidade das amostras indeformadas. Ensaios de adensamento isotrópico com estes solos também foram executados com o intuito de determinar a tensão de cedência para este tipo de carregamento.

7.4.1.

Solos do perfil do migmatito de Duque de Caxias

Compressibilidade

Dentre os solos deste perfil, apenas o DC02 apresentou comportamento claro de um material cimentado, com a curva do solo correspondente à amostra indeformada, seja no ensaio CRS (Figura 149a) ou edométrico (Figura 153a), ultrapassando a curva do material reconstituído, atingindo assim uma região possível apenas para material com tal estrutura como definido por Leroueil e Vaughan (1990).

Apesar da curva índice de vazios $x \log$ da tensão efetiva vertical do solo DC01 ultrapassar de forma sutil a curva da amostra amolgada (Figura 148a), nenhuma indicação de cimentação foi detectada nos ensaios de caracterização, sendo seu comportamento atribuído à composição mineralógica e à distribuição granulométrica e espacial dos grãos. Tais características também regem o comportamento dos solos DC03 e DC04 (Figura 150a, Figura 151a).

Os índices de compressão das amostras indeformadas foram superiores aos obtidos nas amostras reconstituídas por diferentes razões. No caso do solo DC02, tal comportamento era esperado tendo em vista que um material com estrutura cimentada tende a apresentar maior compressibilidade que o remoldado após a plastificação da estrutura. No caso do solo DC01, tais valores são praticamente coincidentes, com o comportamento deste solo próximo ao de um material ideal ou fracamente estruturado como definido por Leroueil (1992) e Cuccovillo e Coop (1999), respectivamente. O solo DC04 tem um comportamento semelhante ao solo DC01, entretanto, após a curva do material indeformado atingir a do solo reconstituído e apresentar a mesma trajetória, por algum motivo, as mesmas passam a divergir a partir de $\sigma'_v = 500$ kPa, com o material reconstituído apresentando comportamento mais rígido. Tal diferença no solo DC03 pode estar relacionada à distribuição espacial das partículas da amostra indeformada que se encontram em contato direto formando macrovazios, visíveis na lâmina delgada, além do baixo teor de material argiloso. Além disso, o solo perdeu umidade quando armazenado para equalização da mesma e, durante a moldagem, o mesmo era submetido a uma pequena pressão aparentemente suficiente para provocar um arranjo das partículas de forma a obter-se um material mais denso e menos compressível que o solo no estado natural.

Os resultados dos ensaios, além de serem plotados no gráfico e $x \sigma'_v$, também foram representados em função da deformação volumétrica normalizada como sugerido por Futai (2002) e Boszczowski (2008) para eliminar a influência do índice de vazios inicial e assim facilitar a análise conjunta dos resultados (Figura 144 e Figura 148).

Os solos da feição leucocrática (DC03 e DC04) na condição reconstituída nos ensaios CRS apresentaram deformação volumétrica similar aos das amostras indeformadas, sendo apenas 2% superior no caso do solo DC04 para a tensão máxima aplicada. Já para os solos da feição melanocrática, esta diferença é de 23% para o solo DC02 e 18% para o DC01. Os resultados dos ensaios edométricos do solo DC02 indeformado e reconstituído na umidade natural e com o mesmo índice de vazios replicam este comportamento, indicando que neste solo as ligações entre partículas tem uma grande influência na compressibilidade. Logo, a estrutura presente nos solos da feição melanocrática é substancialmente mais afetada pelo processo de remoldagem que os da feição leucocrática.

O único ensaio isotrópico executado neste perfil foi no solo DC02. Devido às limitações do equipamento, a tensão máxima aplicada não foi suficiente para caracterizar bem a região de plastificação da estrutura. Entretanto, ao comparar a curva deformação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva, única tensão comum aos ensaios edométrico, CRS e isotrópico, de todos os ensaios de adensamento executados, tem-se que a curva do ensaio isotrópico encontra-se próxima a do ensaio de adensamento edométrico, sugerindo comportamento isotrópico do solo. Devido a tal concordância, foi assumido que o valor do índice de compressibilidade do ensaio edométrico é próximo ao do ensaio de adensamento isotrópico.

Vale ressaltar que, nos ensaios CRS pode ter ocorrido algum tipo de perturbação na estrutura dos solos durante o processo de saturação e passagem dos corpos de prova para o equipamento, sendo visivelmente os solos da feição leucocrática os mais afetados.

Estimativa da tensão de cedência

A tensão de cedência representa um processo que ocorre de forma gradual logo, trata-se de um valor de referência. Dentre os critérios de determinação desta tensão que empregam o gráfico e $x \log$ de σ'_v , dois métodos empíricos foram escolhidos: o método Pacheco e Silva e através do prolongamento dos trechos da curva, como exemplificado na Figura 145. As tensões obtidas pelo método Pacheco e Silva são superiores às do outro método como exposto nas Tabelas 30 e 34

Os resultados dos ensaios ainda foram plotados em função da deformação volumétrica normalizada e da tensão efetiva vertical com ambos os eixos em escala logarítmica e/ou linear (Figura 146 b e c e Figura 154b) como recomendado por Vaughan (1985) para identificação do ponto de plastificação da estrutura.

O solo residual DC01 não possui uma mudança de comportamento brusca quando plotado nestas escalas, notando-se apenas uma mudança muito suave da trajetória da curva no gráfico na escala log-log em torno de 500 kPa.

Os solos residuais da feição leucocrática apresentam comportamento semelhante entre si, com o aumento da rigidez com a tensão efetiva vertical. Uma mudança de comportamento é notada em torno de 100 kPa no gráfico na escala log-log, que pode estar vinculada ao aumento da densidade do solo.

Ao contrário dos outros solos deste perfil, o comportamento da curva de deformação volumétrica normalizada x tensão vertical efetiva com os eixos em

escalas alternativas do solo DC02 nas Figuras 46 b e c é similar ao modelo proposto por Vaughan (1985) para solos com presença de agentes cimentantes. Tanto no ensaio edométrico como no CRS, o mesmo apresentou um comportamento mais rígido até determinada tensão (CRS-400kPa e edométrico-600kPa), tornando-se mais compressível em seguida. Os valores destas tensões são próximos aos obtidos pelo prolongamento dos trechos da curva no gráfico $e \times \sigma'_v$ na escala semilogarítmica. Além disso, após esta tensão há a convergência das propriedades do solo (k e mv) no estado indeformado e reconstituído, indicando a plastificação da estrutura.

No caso do ensaio de adensamento isotrópico realizado apenas no solo DC02, devido à concordância das curvas deformação volumétrica ou índice de vazios $\times$ tensão vertical efetiva, foi assumido que o valor da tensão de cedência do solo submetido a este tipo de carregamento é próxima da tensão de cedência do ensaio edométrico.

Nas análises dos resultados dos ensaios triaxiais, foi assumida como tensão de cedência do solo a obtida pelo método de intersecção das retas (600kPa) que equivale ao ponto de inflexão no gráfico $e \times \sigma'_v$ representado na escala aritmética.

7.4.2.

Solos residual de rocha alcalina de Tanguá

Compressibilidade

A amostra indeformada deste solo residual apresenta maior rigidez inicial que o material reconstituído, como pode ser notado na curva $e \times \log$ de σ'_v (Figura 157a). Entretanto, após a tensão efetiva vertical de 600 kPa, a amostra indeformada passa a ter comportamento um pouco mais compressível que o da reconstituída, sendo tal diferença atribuída a pequenas diferenças na rotina de execução dos ensaios. Além disso, a deformação volumétrica para o nível de tensão aplicado é praticamente a mesma. Logo, de uma forma geral, a única diferença significativa entre o comportamento da amostra indeformada e reconstituída é a maior rigidez inicial da amostra indeformada, que mesmo assim não é tão elevada.

O índice de compressão da amostra indeformada é 12% maior que o do material reconstituído. O inverso ocorre com a magnitude do índice de expansão (ver Tabela 38).

A curva do ensaio de adensamento isotrópico deste material, antes da plastificação da estrutura, apresentou comportamento distinto da obtida no ensaio edométrico (Figura 160 e Figura 161a). Entretanto, para tensões superiores, a curva e x $\log$ de σ'_v de ambos os ensaios seguem paralelas, implicando no mesmo valor do índice de compressão, cuja magnitude é de 0,34.

Estimativa da tensão de cedência

Assim como nos solos do perfil de migmatito, a tensão de cedência estimada pelo método Pacheco e Silva no ensaio edométrico é superior à calculada a partir do prolongamento dos trechos da curva no gráfico e x $\log$ de σ'_v (Tabela 39).

O mesmo é observado no ensaio isotrópico, onde a tensão de cedência obtida pelo método Pacheco e Silva e através da intersecção do prolongamento das curvas são, respectivamente, 130 kPa e 110 kPa. Ao plotar os dados em função da deformação volumétrica com os eixos na escala aritmética, nenhum ponto evidente de inflexão que sugerisse a plastificação de algum agente cimentante foi detectado, tendo-se apenas observado a mudança na compressibilidade do solo no início do ensaio e próximo a uma tensão vertical efetiva de 350 kPa.

Para os ensaios triaxiais, assim como no solo residual de Tanguá, é assumida como tensão de cedência do solo a obtida pelo método de intersecção do prolongamento das curvas que é de 110 kPa.