

9

Avaliação do efeito da técnica de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência: solo residual de Tanguá – T.

Os resultados dos ensaios realizados para avaliação do processo de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência deste solo serão apresentados em cinco blocos. O primeiro trata dos ensaios CIU com tensão efetiva de 25 kPa e medida de variação de volume total executados com o emprego de três técnicas de saturação diferentes. Ensaios com tensões efetivas superiores foram realizados com a técnica de saturação utilizada no laboratório da PUC-Rio (PIE) e a considerada mais adequada (SIA). Os resultados destes ensaios são apresentados nos dois subitens seguintes. O quarto bloco consiste na determinação da envoltória de resistência última do solo de Tanguá baseada nos resultados de todos os ensaios. A comparação entre os métodos PIE e SIA é realizada no quinto bloco.

Na Tabela 45 consta o programa de ensaios para cada rotina de saturação. A descrição das rotinas é apresentada na Tabela 47. Mais detalhes sobre as rotinas são encontrados no capítulo 8.

Tabela 46 – Programa de ensaios triaxiais do solo T.

Tipo de Ensaio	Rotina de saturação	Tensão efetiva de adensamento - σ'_c (kPa)				
		25	75	150	300	500
CIU	PIE-T	4*	1	1	1	-
	PIA-T	1	-	-	-	-
	SIA-T	1	1	1	-	-

Tabela 47 – Descrição das rotinas de saturação avaliadas no solo T.

Rotina de saturação	Descrição	
PIE-T	Percolação de água (P)	Incremento de contrapressão em estágios (IE)
PIA-T	Percolação de água (P)	Incremento automático (IA)
SIA-T	Percolação de água – sucção (S)	Incremento automático (IA)

9.1.

Ensaios CIU para $\sigma'_c = 25$ kPa com medida de variação de volume total - avaliação inicial dos processos de saturação

Nesta seção são apresentados os resultados de seis ensaios triaxiais CIU com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa realizados com o objetivo de analisar a influência do processo de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência do solo. Efetivamente, apenas dois ensaios (SIA-T-25 e PIE-T-25-3), cujos corpos de prova apresentaram índices de vazios iniciais próximos diante da grande variabilidade apresentada por este solo, foram considerados em uma análise comparativa final. Como discutido anteriormente, a baixa tensão efetiva de adensamento empregada para tal propósito foi escolhida para que a magnitude da mesma não interferisse na estrutura do solo sobrepondo-se ao efeito do processo de saturação. A variação de volume total foi medida na maioria dos ensaios durante o processo de saturação para que uma análise comparativa fosse realizada.

9.1.1.

Curvas tensão-deformação e trajetórias de tensões

Os dados iniciais dos corpos de prova das amostras indeformadas submetidas a diferentes processos de saturação, tais como teor de umidade inicial e final, peso específico, índice de vazios, grau de saturação e o parâmetro B de poropressão de Skempton, determinado ao final do processo de saturação, são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 25$ kPa utilizados na avaliação dos processos de saturação do solo T.

Ensaio	W_o (%)	W_f (%)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_o	e_{adens}	n (%)	S_o (%)	B
PIE-T-25-1	25,47	37,64	16,01	12,83	1,08	1,00	52,0	64,1	0,97
*PIE-T-25-2	23,08	36,45	16,82	13,67	0,96	0,92	48,9	65,8	0,98
**PIE-T-25-3	25,54	39,33	14,38	11,45	1,34	1,31	57,2	52,2	0,98
*PIA-T-25	24,86	37,11	16,66	13,37	1,00	0,87	50,0	67,5	0,99
SIA-T-25	25,11	40,28	14,47	11,57	1,31	1,30	56,8	52,2	0,98
**PIE-T-25R	12,87	40,28	15,42	13,66	0,96	0,94	48,9	36,7	0,98

* Ensaios executados antes da definição final da metodologia de saturação

**Ensaio executado em amostra reconstituída

Durante a calibração do equipamento adaptado para realização de medida de variação de volume total, a elevada magnitude e a forma de aplicação da sucção para eliminação de bolhas de ar da câmara interna não foram fontes geradoras de problemas por ser empregado um corpo de prova rígido.

Entretanto, como mencionado, durante a execução dos primeiros ensaios com solo, detectou-se que tal procedimento deveria ser realizado de forma mais cuidadosa para não perturbar a estrutura e/ou interferir nas características iniciais dos corpos de prova. Os ensaios que foram submetidos a um estado de tensões indesejado durante o preenchimento da câmara e/ou ao longo do processo de saturação que possam interferir nas conclusões referentes às técnicas de saturação foram os ensaios PIE-T-25-2 e PIA-T-25. No primeiro, após preencher a câmara interna com água deareada por gravidade, uma sucção elevada, cuja magnitude não era controlada, foi aplicada na câmara triaxial durante um período de 30 minutos para retirada do ar aprisionado. As drenagens do corpo de prova permaneceram fechadas. Medições posteriores mostraram que a bomba era capaz de aplicar sucções de até 85 kPa, próxima a sucção matricial do solo, obtida na curva de retenção. Além disso, através de um teste executado em uma câmara de acrílico com solo compactado, notou-se que a membrana desprendia do solo e bolhas que se encontravam na tubulação se concentravam entre o corpo de prova e a membrana. No ensaio PIA-T-25, uma sucção de mesma magnitude era aplicada na câmara e no topo do corpo de prova após o preenchimento da câmara interna. Pretendia-se aplicar valores de sucção não superiores a 20 kPa controlados através de uma válvula com duas saídas instalada na bomba, uma para a câmara e outra ligada a drenagem de topo do corpo de prova. Entretanto, acidentalmente, sucções de até 70 kPa foram aplicadas durante este procedimento. Mais detalhes, principalmente referentes à variação de volume total obtida nestes ensaios, serão apresentados no item a seguir. Os demais ensaios com medida de variação de volume total seguiram o procedimento final estabelecido no capítulo 8.

i. Comportamento tensão-deformação

Na Figura 168 são encontradas as curvas tensão desviadora (σ_d) x deformação axial (ϵ_a) e variação de poropressão (Δu) x deformação axial (ϵ_a) de todos os ensaios CIU executados com 25 kPa de tensão efetiva no solo T. Alguns ensaios atingiram uma deformação axial de 26%, suficiente para que os mesmos apresentassem estabilização nas medidas de tensão desviadora e de poropressão. Os ensaios que não alcançaram esta deformação foram levados a no mínimo 14 % de deformação axial. O término do curso do medidor de deslocamento vertical em algumas prensas do laboratório foram os limitadores.

As curvas $\sigma_d \times \varepsilon_a$ não apresentam um padrão de comportamento, inclusive as realizadas com o mesmo método de saturação. O único ensaio que possui pico de ruptura bem definido para pequenas deformações é o SIA-T-25 que, após a ruptura, apresenta uma progressiva queda da resistência não drenada até tender a um patamar para grandes deformações (Figura 168a). A geração de poropressão tende a estabilizar após a ruptura, como indicado na Figura 168b.

O ensaio PIE-T-25-2, submetido a elevadas sucções durante a montagem do ensaio, comporta-se de maneira *strain-hardening*. A geração negativa de poropressão neste ensaio, indicada na Figura 168b, pode estar vinculada à presença de plano de ruptura, não bem definido, somado à alta densidade, a maior dentre as observadas nestes ensaios. Os outros dois ensaios do tipo PIE-T-25, apesar de terem sido executados seguindo exatamente a mesma metodologia desde a montagem, apresentaram comportamentos distintos. O ensaio PIE-T-25-3, com maior índice de vazios, possui um primeiro pico de resistência não drenada na curva $\sigma_d \times \varepsilon_a$ correspondente a $\sigma_d = 25$ kPa e $\varepsilon_a = 0,7\%$. Após a queda de resistência, a tensão cisalhante permanece constante entre 1,1 e 2,5% de deformação para então voltar a crescer até $\varepsilon_a = 9\%$ e, em seguida, decair para um patamar correspondente a tensão cisalhante de 34 kPa. Já o ensaio PIE-T-25-1 apresenta comportamento levemente dúctil.

A curva $\sigma_d \times \varepsilon_a$ do ensaio PIA-T-25 encontra-se abaixo das correspondentes as amostras indeformadas, sendo a poropressão gerada neste ensaio inferior a dos demais ensaios.

O corpo de prova empregado no ensaio com material reconstituído (PIE-T-25R) foi produzido com o teor de umidade que a amostra apresentava no momento da moldagem, certamente inferior à umidade ótima. Solos compactados nestas condições, mesmo que estaticamente, apresentam estruturas mais sensíveis à alteração que quando compactados no ramo úmido (Lambe, 1958). Seed e Chan (1959) afirmam que a curva tensão-deformação de ensaios CIU em amostras compactadas no ramo seco tende a apresentar comportamento mais rígido e maiores tensões cisalhantes para pequenas deformações que as compactadas no ramo úmido. Entretanto, para grandes deformações, as mesmas tendem a convergir. Esta rigidez inicial é observada no ensaio com material reconstituído executado (Figura 168a). Após a ruptura, a curva $\sigma_d \times \varepsilon_a$ segue aproximadamente na horizontal, mas sem apresentar a mesma constância de poropressão, que decai suavemente com o aumento de tensão.

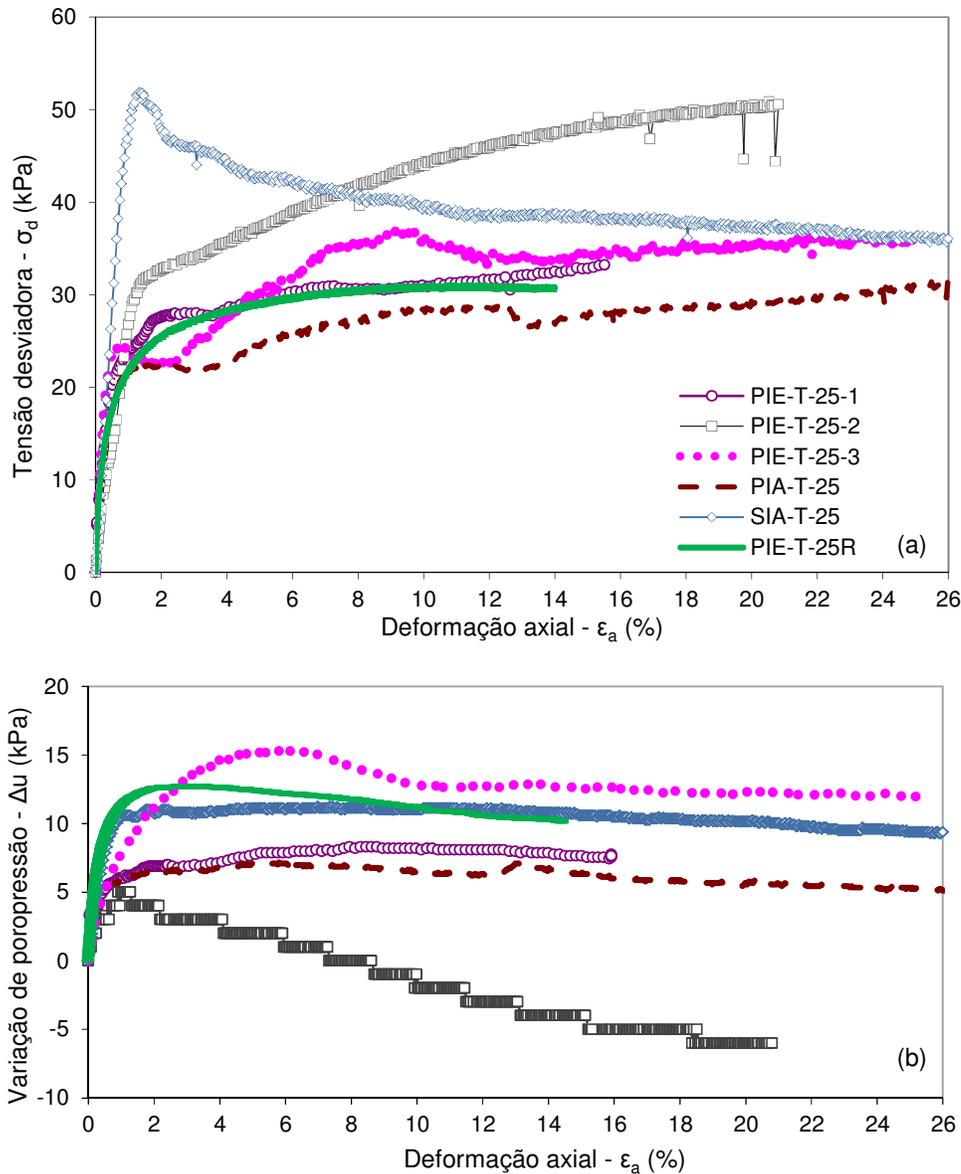


Figura 168 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados no capítulo 8.

Ao se analisar o comportamento do solo em termos de tensões efetivas através do gráfico da razão das tensões efetivas principais, apresentado na Figura 169, tem-se que apenas os ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25 apresentam pico e encontram-se acima da curva correspondente ao ensaio realizado em material reconstituído. Neste gráfico, nota-se ainda que o comportamento dos ensaios em amostras indeformadas pode ser dividido em dois blocos: dos ensaios com índice de vazios com valores acima de 1,30 (PIE-T-25-3 e SIA-T-25), e os ensaios cujo índice de vazios é próximo a 1 (PIE-T-25-1, PIE-T-25-2 e PIA-T-

25). Como os ensaios com corpos de prova com índice de vazios próximo a 1 foram os primeiros a serem realizados e foram executados em sequência, acredita-se que as diferenças no índice de vazios sejam decorrentes da heterogeneidade do bloco empregado nos ensaios. Nos ensaios seguintes, tomou-se o cuidado de retirar os corpos de prova da mesma área do bloco.

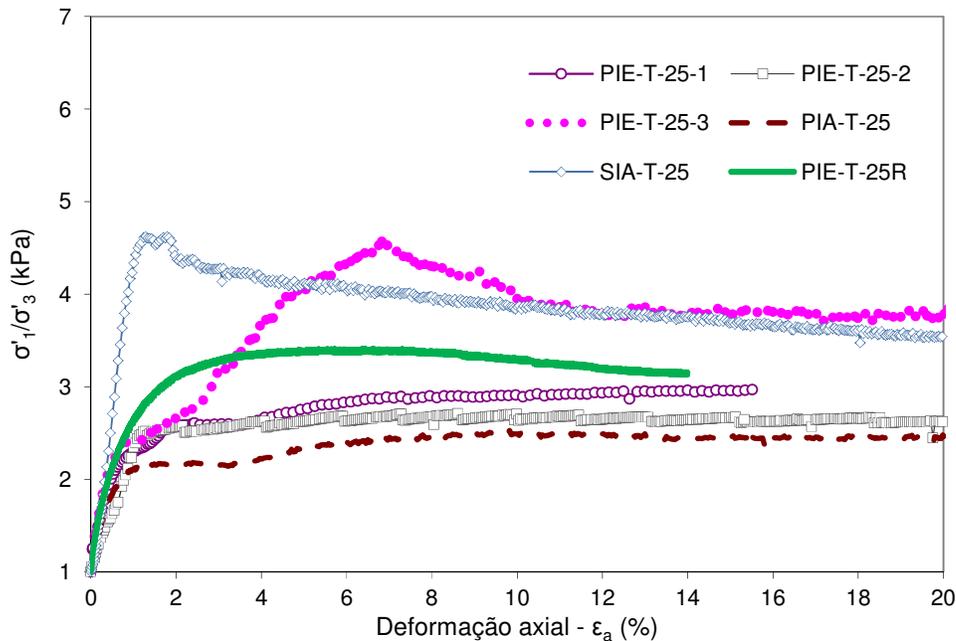


Figura 169 – Variação da razão das tensões efetivas principais ao longo dos ensaios executados com $\sigma'_c = 25$ kPa para diferentes métodos de saturação.

A interpretação do comportamento de solos residuais por meio da teoria do estado crítico permite a incorporação do índice de vazios na análise dos resultados. No entanto, qualquer influência do processo de saturação na estrutura do solo é refletida de forma mais clara na resistência de ruptura e na trajetória de tensões.

Apesar da relevância do índice de vazios no comportamento tensão-deformação do solo, observações referentes à influência do processo de saturação podem ser feitas a partir, principalmente, dos ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3, que possuem praticamente o mesmo índice de vazios e cujo procedimento de montagem do ensaio foi o mesmo. No ensaio executado com o método de saturação SIA-T, a curva tensão-deformação apresenta um pico bem definido para uma deformação axial inferior a 2%, enquanto a mesma curva do ensaio PIE-T-25-3 só apresenta maior tensão desviadora para uma deformação superior a 6% e, mesmo assim, inferior à obtida no ensaio SIA-T-25. Além disso, a poropressão gerada no ensaio PIE-T-25-3 é superior. Tais diferenças

persistem na análise em termos de tensão efetiva. Logo, pode-se afirmar a partir apenas das curvas tensão-deformação e excesso de poropressão-deformação que o método de saturação com percolação de água através da aplicação de sucção e aumento automático de contrapressão (SIA) gera menos dano ou nenhum à estrutura do solo que o método que consiste na percolação para $\sigma_c = 50$ kPa seguido de aplicação em estágios de contrapressão (PIE). Este efeito, como será mostrado a seguir, também se reflete nas trajetórias de tensões.

ii. Módulos de deformação

Na Tabela 49 constam os módulos de deformação secante para 50 % da tensão desviadora máxima ($E_{s50\%}$). Como exposto na revisão apresentada no capítulo 2, as medidas de deformação axial com instrumentação externa fazem com que os módulos de deformação calculados sejam inferiores aos reais devido, principalmente, à acomodação e deformação dos componentes mecânicos adjacentes ao corpo de prova (Baldi *et al.*, 1988). Tais erros se refletem principalmente no módulo tangente inicial. De Campos e Marinho (1986), Leroueil e Hight (2003) e Boszczowski, 2008) apresentam resultados de ensaios que demonstram tal comportamento. Desta forma, apenas uma análise comparativa é realizada ao supor que os erros são aproximadamente os mesmos nos ensaios executados.

Os ensaios apresentam módulo $E_{s50\%}$ da mesma ordem de grandeza. Diferenças significativas entre os módulos secantes só são perceptíveis quando as variações destes com a deformação são comparadas, como será exposto no item 9.1.6.2.

Tabela 49 - Módulos de deformação para os ensaios executados com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa no solo residual de Tanguá (T).

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)
PIE-T-25-1	5,4
PIE-T-25-2	3,2
PIE-T-25-3	5,8
PIA-T-25	4,3
SIA-T-25	5,5
PIE-T-25R	3,8

iii. Trajetórias de tensões

As trajetórias de tensões efetivas são apresentadas na Figura 170 em um gráfico $s' ((\sigma'_1 + \sigma'_3)/2) \times t ((\sigma'_1 - \sigma'_3)/2)$. As trajetórias de tensões dos ensaios com

amostras indeformadas tendem inicialmente para a direita. Apenas o ensaio SIA-T-25 possui uma queda significativa de t e s' após a ruptura, indicando que a trajetória de tensões deste ensaio ultrapassa a envoltória de resistência última. Neste caso, a plastificação da estrutura se dá por cisalhamento e ocorre ao atingir a máxima tensão desviadora. A trajetória de tensões do ensaio PIE-T-25-3 apresenta comportamento peculiar. Após atingir uma tensão cisalhante igual a 25 kPa, que pode-se relacionar com o ponto de plastificação, a trajetória tende para a esquerda com o t praticamente constante. Este trecho equivale ao intervalo de deformações entre 1,1 e 2,5% da curva $\sigma_d \times \epsilon_a$. Em seguida, o valor de t começa a aumentar, como se o solo estivesse sofrendo uma segunda ruptura. Mesmo assim, o máximo valor de t neste ensaio é inferior ao do SIA-T-25, corroborando com as conclusões referentes ao comportamento tensão-deformação. Os outros ensaios com amostras indeformadas, PIA-T-25, PIE-T-25-1 e PIE-T-25-2, após a ruptura, continuam com a trajetória de tensões seguindo para a direita sem apresentar tendência de queda nos valores de s' e t . Já a trajetória de tensões do ensaio PIE-T-25R é típico de materiais reconstituídos para baixa tensão efetiva de adensamento.

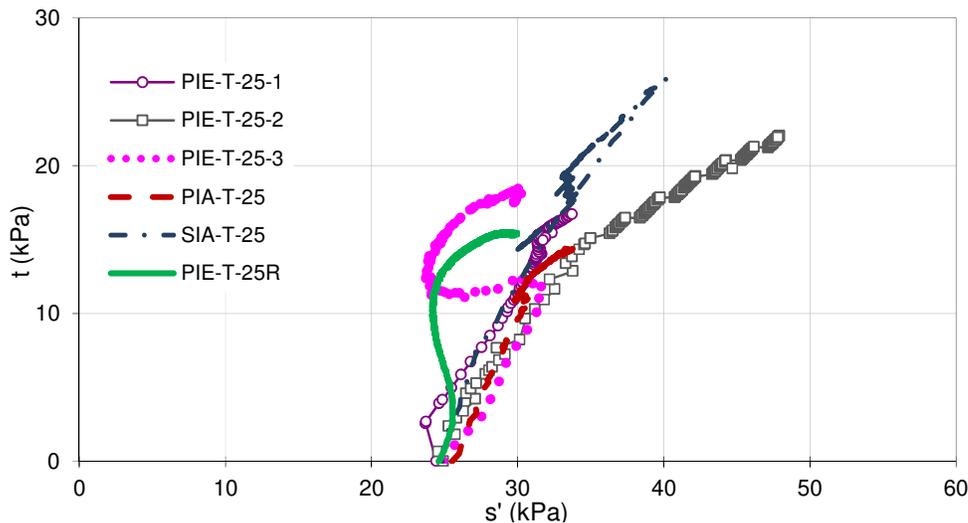


Figura 170 – Trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados no solo T com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados no capítulo 8.

9.1.2.

Medida de variação de volume total durante o processo de saturação

Todos os ensaios seguiram a mesma metodologia de montagem e procedimento de medida de variação de volume total, exceto os ensaios PIE-T-25-2 e PIA-T-25, os primeiros executados. A análise da VVT durante o processo

de saturação foi feita de forma qualitativa comparativa, tendo em vista que os erros nas medidas estão embutidos em todos os ensaios, como discutido no capítulo 8.

A medida de variação de volume foi realizada nos ensaios PIE-T-25-2, PIE-T-25-3, PIA-T-25 e SIA-T-25. Os dados referentes à variação de volume durante a saturação e fase de adensamento, assim como observações pertinentes aos ensaios, constam na Tabela 50. Os gráficos com a variação de volume total (VVT) e com a variação de volume de água do medidor de variação de volume (MVV) em função da tensão confinante e ao longo do tempo são apresentados nas Figuras 171 a 179. Os longos intervalos entre aumentos consecutivos de contrapressão em estágios correspondem a períodos noturnos ou a dias em que o acesso ao laboratório não era possível. O sinal positivo da variação de volume total indica que está havendo compressão da amostra. A mesma convenção é adotada no adensamento. O sinal negativo nos dados referentes à variação de volume do MVV está vinculado à saída de água do medidor, ou seja, a entrada de água no corpo de prova. Todos os valores de medida de variação de volume total são apresentados mediante a correção da leitura da balança pelas equações de calibração do equipamento apresentadas no capítulo 4.

Tabela 50 – Variação de volume durante a saturação e adensamento dos ensaios no solo T com $\sigma'_c = 25$ kPa e medida de variação de volume total.

Ensaio	Variação de volume durante o processo de saturação (cm ³)		Variação de volume total durante a percolação (cm ³)	Variação de volume durante o adensamento (cm ³)	Observações
	VVT*	MVV**			
PIA-T-25	-2,00	-8,61	0,38	5,90	Para retirada de bolhas de ar da câmara interna, uma sucção elevada (cerca de 70 kPa) foi aplicada tanto na amostra como na câmara de forma não intencional. Acredita-se que esta sucção possa ter interferido no processo de saturação, assim como problemas nos transdutores durante o ensaio.
PIE-T-25-2	-2,42	-6,21	0,33	1,54	Sucções elevadas foram aplicadas apenas na câmara interna com o mesmo objetivo do ensaio PIA-T-25. Neste ensaio, assim que a drenagem da base foi aberta, um volume elevado de água, acima de 6 cm ³ , entrou instantaneamente no CP, alterando as condições iniciais do CP.
PIE-T-25-3	8,80	-7,67	0,35	0,78	Preenchimento da câmara executado com procedimento adotado
SIA-T-25	2,66	-5,68	0,18	0,44	Preenchimento da câmara executado com procedimento adotado

* VVT = variação de volume total; ** MVV = variação de volume de água do medidor de variação de volume.

No ensaio PIE-T-25-2, o primeiro a ser executado com medida de variação de volume total, não havia controle da sucção empregada para o preenchimento da câmara interna, assim como nenhuma sucção era aplicada no interior da amostra para garantir a adesão da membrana. No momento da aplicação da pressão confinante e contrapressão de 20kPa e 10 kPa, respectivamente, um volume elevado de água entrou no corpo de prova instantaneamente, alterando a condição inicial do corpo de prova. Isto ocorreu possivelmente devido à magnitude da sucção aplicada para o preenchimento da câmara. A medida de VVT neste instante não foi registrada. Com o aumento da tensão confinante de 20kPa para 50 kPa tem-se um indicativo de compressão do corpo de prova em torno de 0,45 cm³, como mostrado no gráfico da Figura 171. Ao passar para a pressão confinante de 100kPa, o corpo de prova evidencia uma expansão de 0,23 cm³. Para os dois aumentos seguintes, de 200 e 300 kPa, o corpo de prova apresenta praticamente o mesmo volume do início do ensaio. Entretanto, quando a confinante de 400kPa é atingida, a amostra volta a ter comportamento expansivo, que persiste com o aumento seguinte de pressão para praticamente estabilizar com um indicativo de expansão de 2,2 cm³ do corpo de prova quando a tensão confinante de 600 kPa é alcançada. A variação de volume total durante a fase de percolação, assim como nos demais ensaios executados, foi inferior a 0,4 cm³, que corresponde a aproximadamente 0,45% do volume do corpo de prova. Quanto à variação de volume do MVV, esperava-se que a leitura tendesse a estabilizar para tensões superiores a 400 kPa, no entanto, o que observa-se é uma segunda mudança na taxa de entrada de água no corpo de prova, desta vez, crescente. A primeira corresponde à tensão confinante de 200 kPa, com indicativo de diminuição da inclinação da reta (Figura 171). Pode ter influenciado em tal comportamento, como também no indicativo de expansão a partir de 300 kPa, a diminuição da diferença entre a tensão confinante e a contrapressão inicialmente de 10 kPa, detectada posteriormente no ensaio PIA-T-25, que pode de fato ter ocasionado a expansão do CP. Além disso, com o aumento do grau de saturação, a tensão efetiva naturalmente diminui. A saturação foi finalizada ao se obter um parâmetro B de Skempton igual a 0,98.

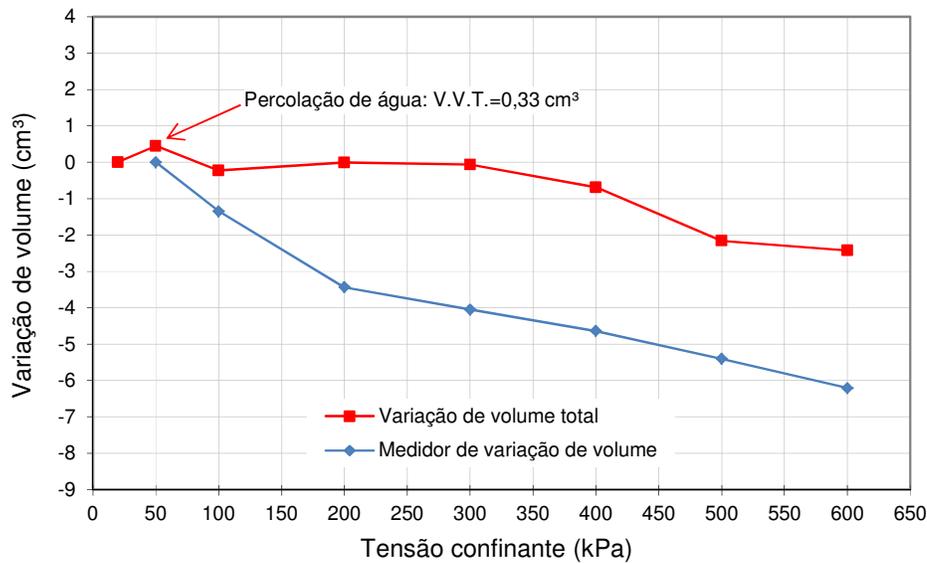


Figura 171 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIE-T-25-2.

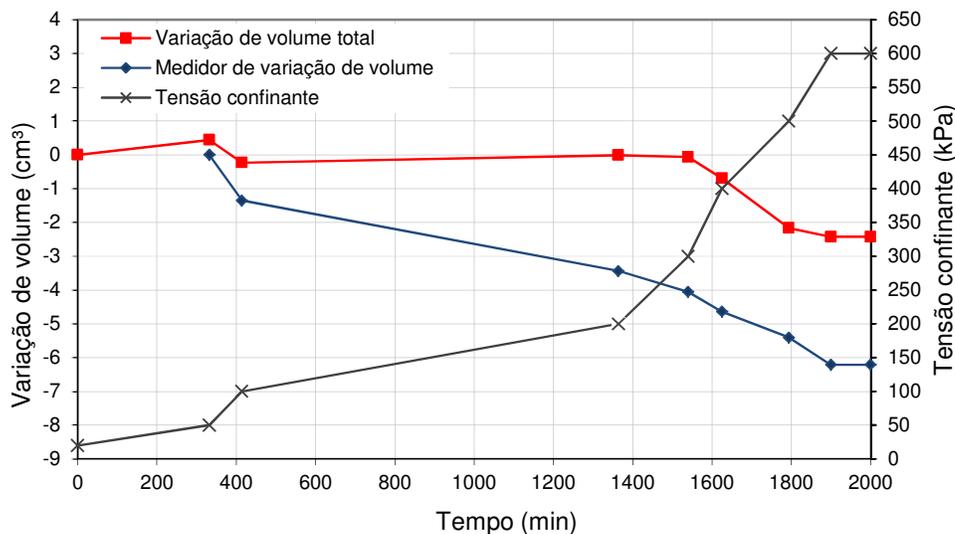


Figura 172 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIE-T-25-2.

A compressão equivalente a $2,27 \text{ cm}^3$ no ensaio PIA-T-25 devido ao aumento da tensão confinante de 20 para 50 kPa, indicado na Figura 173, pode estar relacionada não apenas ao dano causado à estrutura mas também à compressão do ar e mínima penetração da membrana nas extremidades do corpo de prova no contato com a pedra porosa. Estes são os processos que podem atuar de forma mais expressiva na medida de variação de volume total.

Após a percolação de água, a taxa de variação de volume total diminuiu consideravelmente com o aumento contínuo das tensões. Quando a tensão confinante de 250 kPa é atingida, nenhuma variação de volume total é registrada até o solo passar a apresentar um comportamento expansivo a partir de 300 kPa. Como não se observou uma tendência de estabilização da leitura do MVV, optou-se por aumentar a tensão confinante até 600 kPa. Entretanto, a taxa de entrada de água no corpo de prova continuou a aumentar. Ao analisar os gráficos da variação de volume total e a registrada pelo MVV em função do tempo para tensões confinantes superiores a 300kPa em uma escala menor (Figura 175a), nota-se um formato semelhante destas curvas, indicando uma relação entre o volume de água que entra no corpo de prova e o correspondente a expansão. Tal relação fica ainda mais explícita ao comparar a taxa de VVT e do MVV a partir de 500 kPa no gráfico da Figura 175b. Neste caso, a expansão pode ser atribuída à entrada de água no corpo de prova devido tanto à diminuição da tensão efetiva, desencadeada pelo aumento do grau de saturação, por erros nas medidas dos transdutores e/ou pela dissolução do ar na água. Este ensaio foi finalizado ao se obter o parâmetro B igual a 0,99 quando a tensão confinante foi passada para 625 kPa. Vale ressaltar que, durante o aumento não drenado em tal verificação, não foi observada variação de volume total do corpo de prova.

Para dirimir dúvidas relativas aos dois primeiros ensaios, os transdutores de pressão confinante e contrapressão foram averiguados após a finalização do ensaio PIA-T-25. Constatou-se a ocorrência de uma diferença entre os resultados de medidas de tais instrumentos que chegava a até 3 kPa de forma progressiva com o aumento das tensões. Além disso, notou-se que a leitura do transdutor de contrapressão apresentava uma queda na leitura ao longo do tempo que não correspondia a uma queda de pressão. Desta forma, após a execução destes ensaios, o transdutor de pressão confinante foi calibrado novamente e o de poropressão substituído.

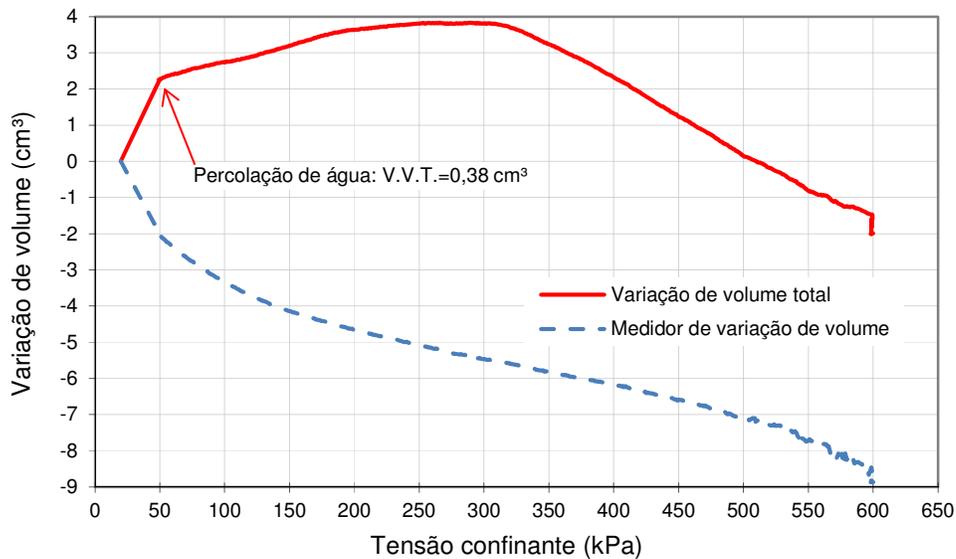


Figura 173 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIA-T-25.

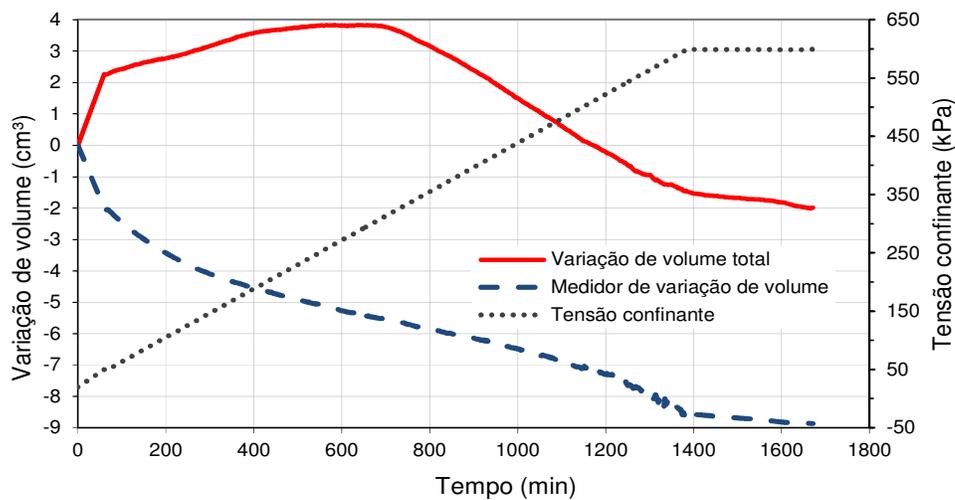


Figura 174 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIA-T-25.

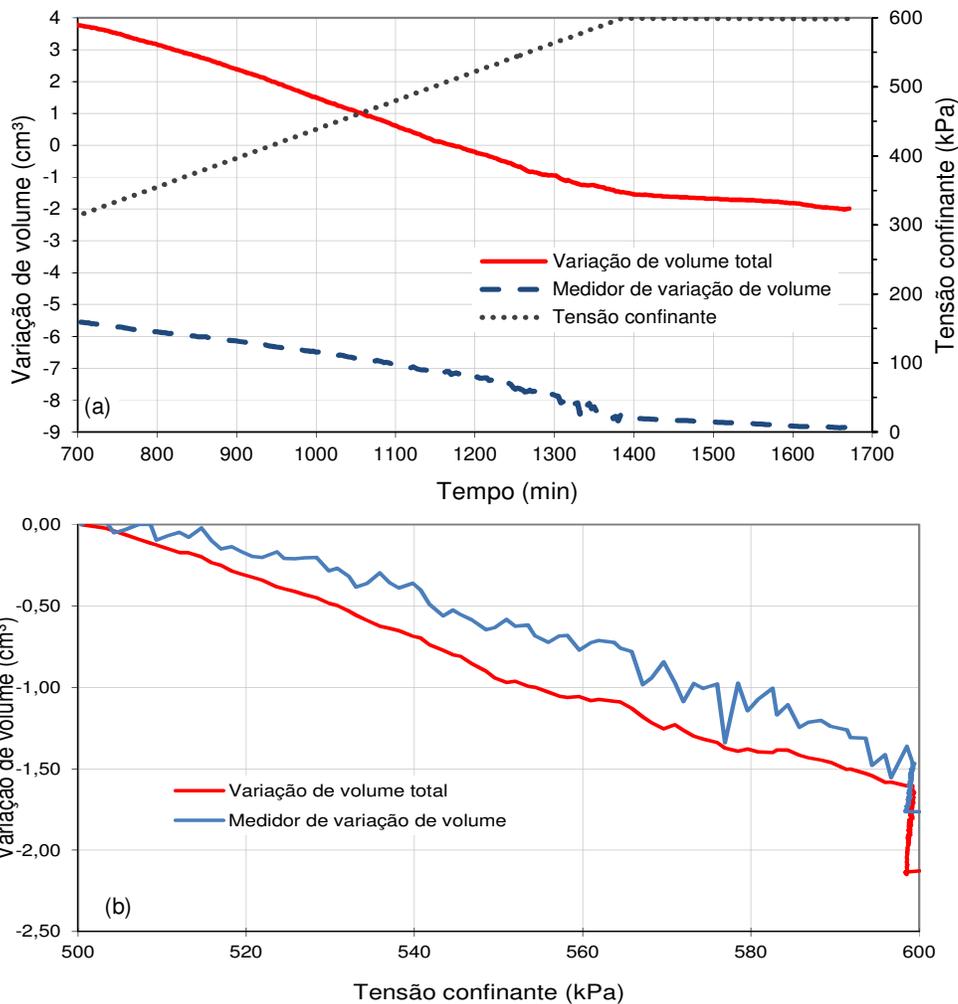


Figura 175 – Ensaio PIA-T-25: (a) Ampliação do trecho do gráfico da Figura 174 a partir da tensão de 300 kPa e (b) variação de volume total e do medidor de variação de volume a partir de 500kPa, ambas mostrando uma concordância entre o volume de água que entra (MVG) e a expansão (VVT) no corpo de prova.

Os outros dois ensaios com medida de variação de volume total (PIE-T-25-3 e SIA-T-25) foram executados seguindo a mesma metodologia de preenchimento da câmara interna, definida então como a mais adequada, e após a troca do transdutor de contrapressão. Em ambos os ensaios, a variação de volume total ao final do processo de saturação foi positiva, indicando compressão dos corpos de prova. Entretanto, ao final da análise da variação de volume total de todos os ensaios, não só deste solo, mas também do DC02, acredita-se que mesmo preenchendo a câmara com aplicação de sucção, esta não tinha a magnitude adequada ou não foi mantida por tempo suficiente para eliminar completamente o ar aprisionado na câmara, como conseguido nas calibrações com aplicação de sucção de 85 kPa. Isto pode ter influenciado nas

variações de volume total elevadas constatadas nos ensaios. Tal aspecto, entretanto, não prejudica as análises comparativas efetuadas.

No gráfico variação de volume x tensão confinante do ensaio PIE-T-25-3 (Figura 176), tem-se o comportamento compressivo do solo até uma tensão confinante de 300 kPa. Mais uma vez, atribui-se tal comportamento principalmente a compressão de ar e possível dano à estrutura do solo. A partir desta tensão, o solo apresenta comportamento levemente expansivo devido à diminuição da tensão efetiva com o grau de saturação e do processo de dissolução do ar na água. Ao aumentar a tensão confinante de 500 kPa para 575 kPa, não é observada variação do volume total nem do MVV. A saturação foi constatada justamente devido à constância da leitura do MVV com o aumento de tensão confinante e obtenção de um parâmetro B superior a 0,96. A variação de volume total de 8,8 cm³, se atribuída à variação de diâmetro do corpo de prova, equivale a 0,19 cm, que corresponde a 5% de redução diametral.

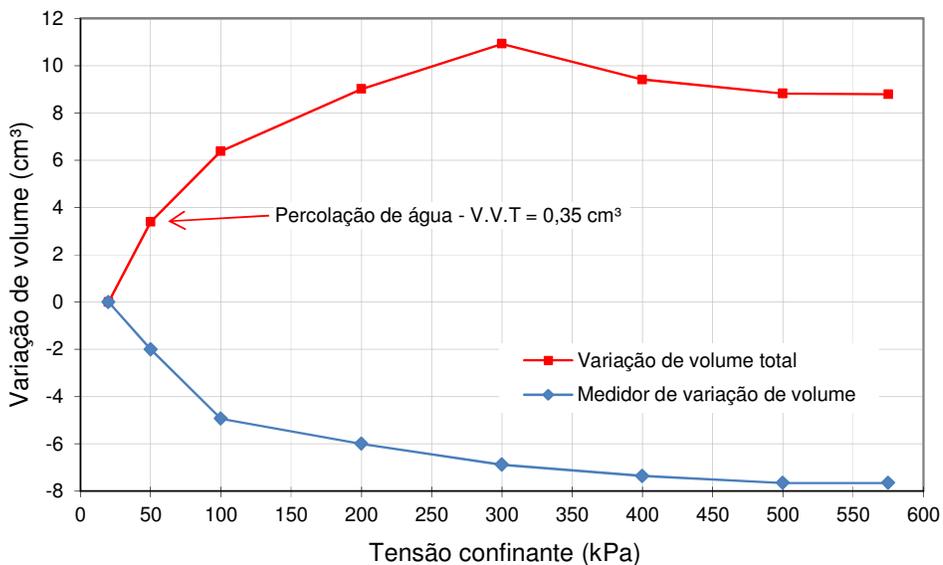


Figura 176 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio PIE-T-25-3.

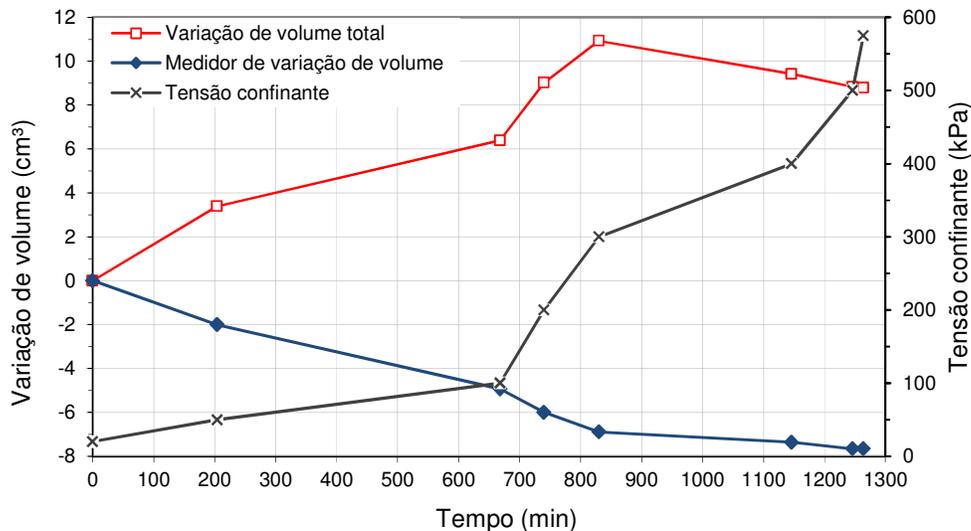


Figura 177 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio PIE-T-25-3.

O aumento da tensão confinante de 20kPa para 50 kPa ocasionou uma compressão da amostra do ensaios SIA-T-25 sensivelmente inferior em relação aos demais ensaios (Figura 178). Neste ensaio, a percolação de água é realizada através da aplicação de sucção no topo do corpo de prova para uma tensão confinante de 10 kPa. O fato da percolação de água ter sido realizada no início do ensaio pode ter contribuído para tal efeito. Compressão de bolhas de ar aprisionadas entre a membrana e o corpo prova e na interface entre CP, pedra porosa e *top cap* e na câmara podem ter influenciado. Ao atingir uma tensão confinante de 250 kPa, tem-se uma tendência expansiva do corpo de prova devido, provavelmente, a dissolução do ar. Uma tensão de 375 kPa foi mantida durante um período de aproximadamente 12 horas (pernoite) no qual não foi observada variação de volume total. Um aumento de 25 kPa na tensão confinante foi feito para verificar se a entrada de água no corpo de prova ocorreria, assim como o parâmetro B. Devido a uma pequena entrada de água no corpo de prova e um indicativo de compressão com o aumento desta tensão (Figura 179), a contrapressão foi ajustada para 390 kPa, e as tensões mantidas durante um período de aproximadamente 6 horas. Um novo aumento de 25 kPa foi realizado sem acarretar na variação de volume total e com um indicativo de $B = 0,98$. A variação de volume de $2,66 \text{ cm}^3$ corresponde a uma variação de $0,6 \text{ mm}$ no diâmetro do corpo de prova, que equivale a uma redução diametral de $1,57\%$.

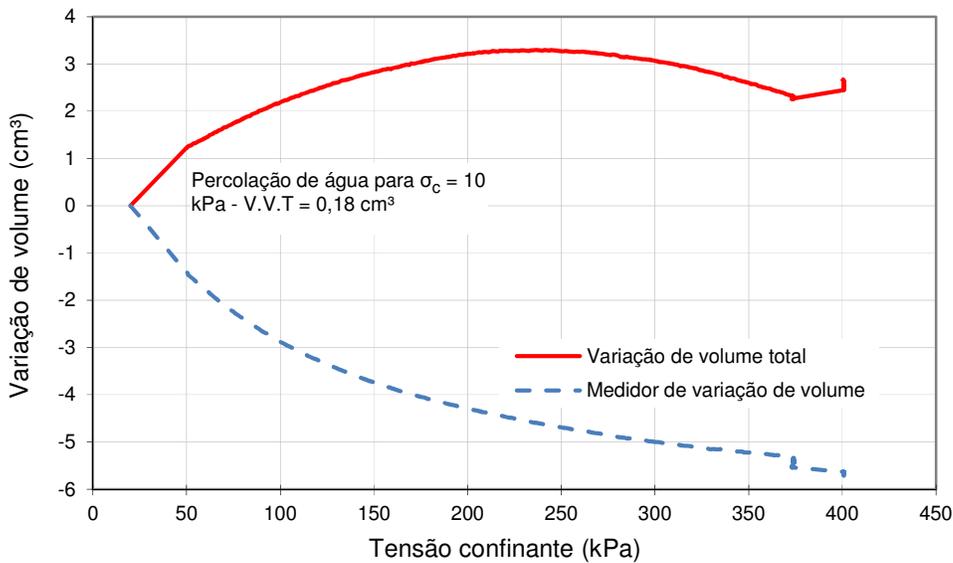


Figura 178 – Variação de volume total e variação de volume de água do medidor de variação de volume em função da tensão confinante durante o processo de saturação do ensaio SIA-T-25.

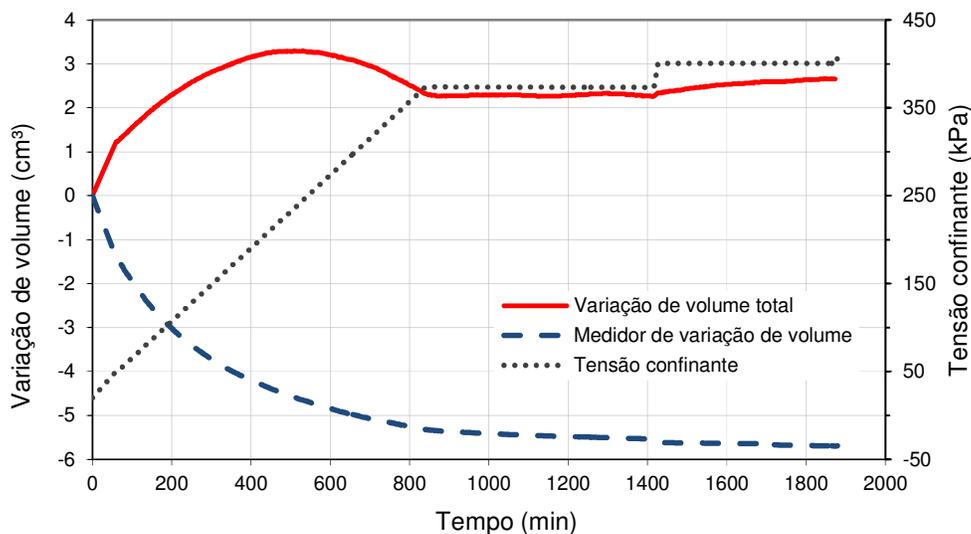


Figura 179 - Variação de volume total, do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio SIA-T-25.

Os ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3 foram os únicos executados neste solo com após o procedimento de preenchimento da câmara ter sido definido. Apesar da grande variabilidade do índice de vazios dos corpos de prova empregados nos ensaios triaxiais, os correspondentes a estes ensaios possuem praticamente o mesmo valor, o que permitiu uma avaliação mais precisa da interferência do processo de saturação na estrutura e comportamento do solo. Na Figura 180 são reapresentadas as curvas de variação de volume total e a registrada pelo

medidor de variação de volume em função do aumento da tensão confinante destes ensaios. As formas das curvas são similares, tendo-se um indicativo de compressão até 300 kPa que pode estar ligado à compressão de bolhas de ar e um possível dano à estrutura. O processo expansivo registrado em seguida se deve, provavelmente, à diminuição da tensão efetiva devido ao aumento do grau de saturação e dissolução do ar, que é potencializada para tensões superiores. Os dados referentes à variação de volume total do corpo de prova indicam que o método de saturação PIE provoca uma variação de volume total ao final do ensaio cerca de 70% maior que o método SIA, indicando uma menor interferência da técnica SIA na estrutura do solo, corroborando assim com as conclusões obtidas a partir do comportamento tensão-deformação e das trajetórias de tensões dos ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3. Vale ressaltar que, a variação de volume total obtida nos ensaios deve ser avaliada de forma comparativa-qualitativa, tendo em vista que os outros fatores mencionados contribuem para a variação de volume total.

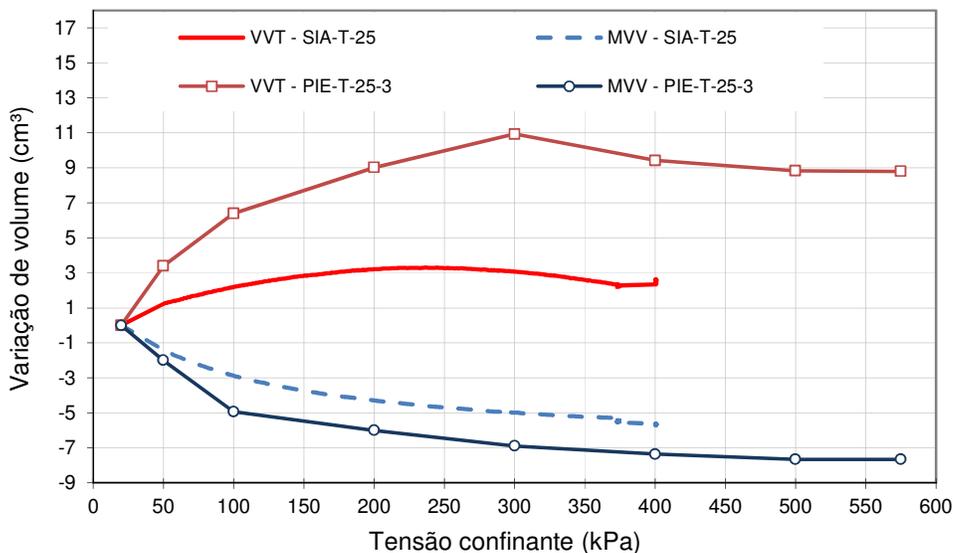


Figura 180 – Variação de volume total (VVT) e registrada pelo medidor de variação de volume (MVV) dos ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3 executados após a definição do procedimento de preenchimento da câmara.

9.1.3.

Ensaio CIU – corpos de prova saturados com o procedimento PIE.

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios CIU executados seguindo a metodologia de saturação PIE com $\sigma'_c = 75, 150$ e 300 kPa. Na Tabela 51 constam os dados referentes aos corpos de prova. Informações

relativas aos ensaios com $\sigma'_c = 25$ kPa foram apresentadas no item anterior Tabela 48.

Tabela 51 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 75, 150$ e 300 kPa do solo T saturado com o procedimento PIE

Ensaio	σ'_c (kPa)	w_o (%)	w_f (%)	γ_n (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_o	e_{adens}	n (%)	S_o (%)	B
PIE-T-75	75	21,68	33,12	17,13	14,08	0,90	0,87	47,4	65,7	0,97
PIE-T-150	150	24,30	37,60	14,32	11,52	1,32	1,17	56,9	50,1	0,98
PIE-T-300	300	21,4	32,98	16,68	13,74	0,95	0,8	48,6	61,7	0,98

i. Comportamento tensão-deformação

Na Figura 181 constam as curvas tensão desviadora x deformação axial e variação de poropressão x deformação axial. Nos gráficos estão inseridos os resultados dos ensaios com $\sigma'_c = 25$ kPa.

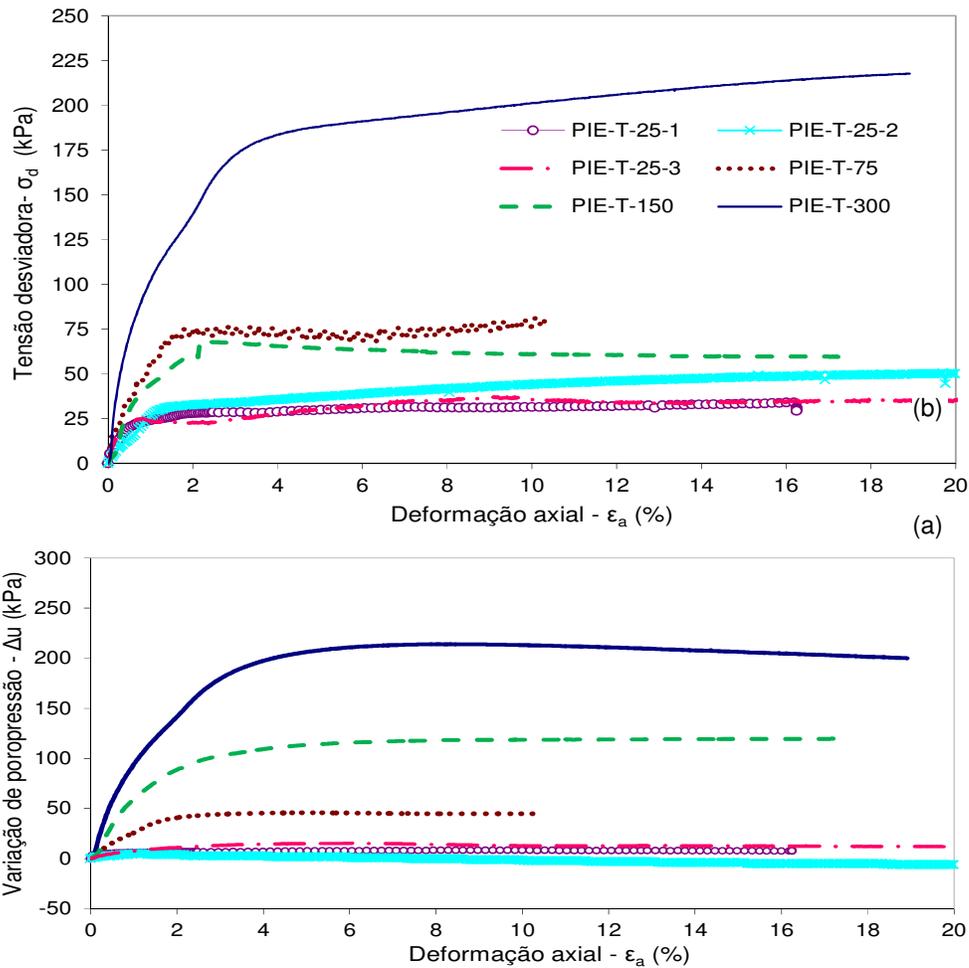


Figura 181 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T.

Na Figura 181a, observa-se que as curvas $\sigma_d \times \epsilon_a$ dos ensaios PIE-T-25-3, PIE-T-75 e PIE-T-150 apresentam um pico suave não bem definido. Já os ensaios PIE-T-300 e PIE-T-25-2 possuem comportamento *strain-hardening*. Os demais ensaios tendem a ficar com a tensão desviadora estável após a ruptura sem a formação de pico. Como mencionado, na maioria dos ensaios se tem ruptura mista, com um indicativo de formação de plano durante o cisalhamento, mas com as deformações do tipo barril predominando. Apesar de uma tendência geral de aumento da resistência com a tensão efetiva de adensamento, tem-se que a curva tensão-deformação do ensaio PIE-T-150 ($\sigma'_c = 150$ kPa), cujo índice de vazios é superior aos dos demais ensaios, encontra-se abaixo da curva do ensaio PIE-T-75 ($\sigma'_c = 75$ kPa). Um ligeiro decréscimo da geração de poropressão após a ruptura só é observado no ensaio PIE-T-25-2. Nos demais ensaios, o excesso de poropressão é sempre positivo e tende a estabilizar para deformações axiais acima de 6%.

Nas curvas tensão desviadora x deformação axial normalizada pela tensão efetiva de adensamento observa-se que os ensaios executados com $\sigma'_c = 25$ kPa de tensão efetiva situam-se em um patamar acima das demais curvas (Figura 182).

ii. Módulo de deformação

Assim como a estrutura do solo, a magnitude da tensão efetiva de adensamento influencia diretamente no módulo de deformação. Quando o solo é submetido ao adensamento isotrópico tem-se dois efeitos agindo simultaneamente: o aumento da tensão efetiva ocasiona a diminuição dos poros, deixando as partículas mais próximas, o que tende a aumentar a rigidez inicial, e por outro lado, o aumento da tensão efetiva, que provoca a quebra de ligações entre partículas, o que tende a diminuir a rigidez inicial. O balanço entre os dois efeitos pode causar o aumento ou a diminuição do módulo de deformação do solo. A perda de rigidez se reflete na diminuição da inclinação da curva tensão-deformação (Maccarini, 1993).

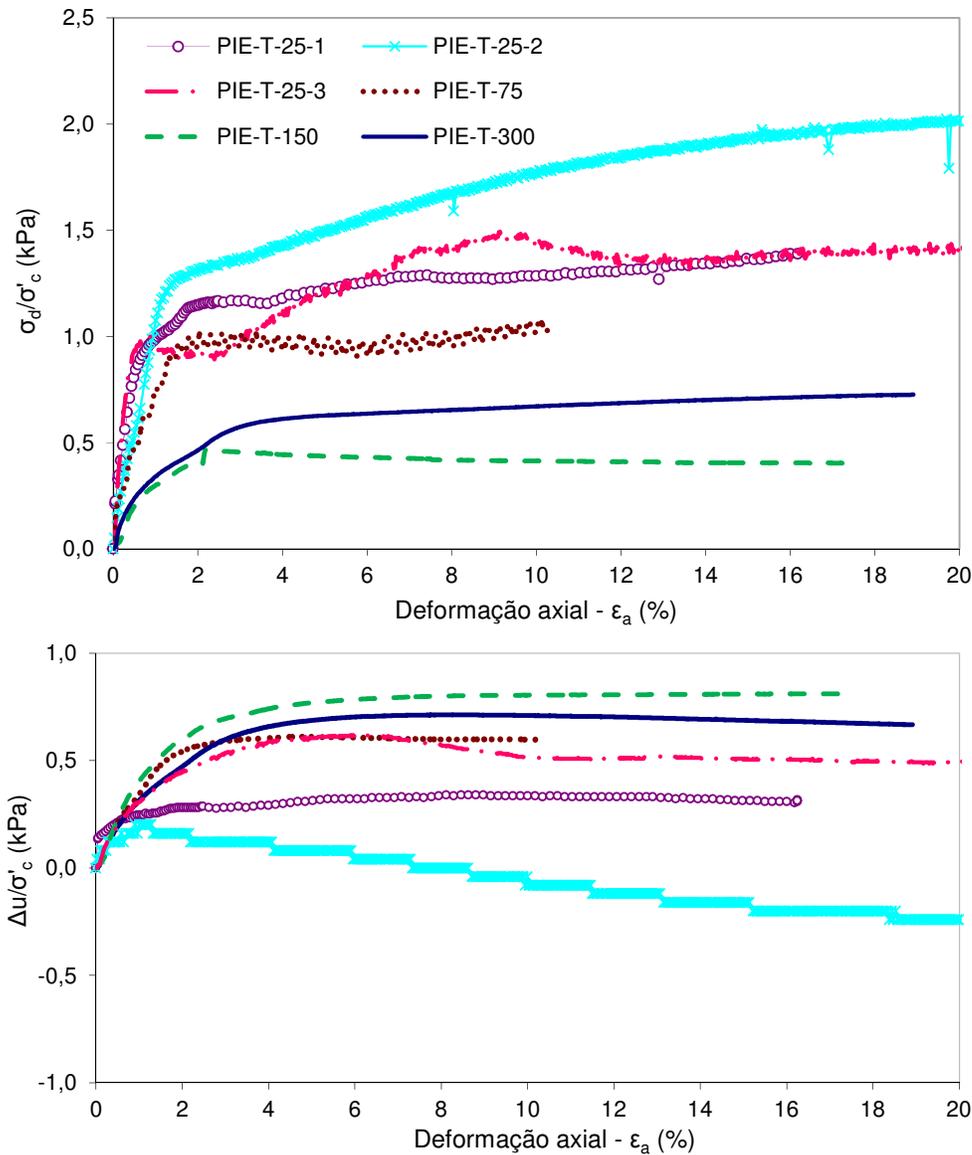


Figura 182 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por σ'_c versus deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por σ'_c versus deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T.

Os módulos de deformação secante para 50% da tensão desviadora máxima ($E_{s50\%}$) apresentam pouca variabilidade até a tensão efetiva de adensamento de 150 kPa (Tabela 52). Já estes módulos normalizados pela tensão efetiva de adensamento tendem a diminuir com o aumento da tensão efetiva, que para as tensões efetivas de 150 e 300 kPa apresentam praticamente o mesmo valor, indicando que a plastificação completa da estrutura ocorreu provavelmente durante a fase de adensamento.

Tabela 52 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação PIE-T.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)	$E_{s50\%}/\sigma'_c$
PIE-T-25-1	5,4	216
PIE-T-25-3	5,8	280
PIE-T-75	6,3	93
PIE-T-150	5,9	43
PIE-T-300	11,0	42

iii. Trajetórias de tensão e resistência

As trajetórias de tensões dos ensaios são apresentadas na Figura 183 no espaço s' ($(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$) x t ($(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$). A trajetória de tensão do material adensado para a tensão efetiva de 75 kPa segue praticamente na vertical para em seguida tender para a esquerda. Tal comportamento pode estar relacionado ao fato desta tensão efetiva ser próxima da tensão de cedência deste material. O ensaio executado com $\sigma'_c = 150$ kPa caminha para a esquerda com comportamento semelhante a de um solo sedimentar normalmente adensado. A trajetória de tensões do ensaio PIE-T-300 tende levemente para a direita para depois seguir para a esquerda e então, devido ao seu comportamento de enrijecimento, segue para a direita. Como descrito, as trajetórias dos ensaios com 25 kPa de tensão efetiva tem inclinação acentuada para a direita.

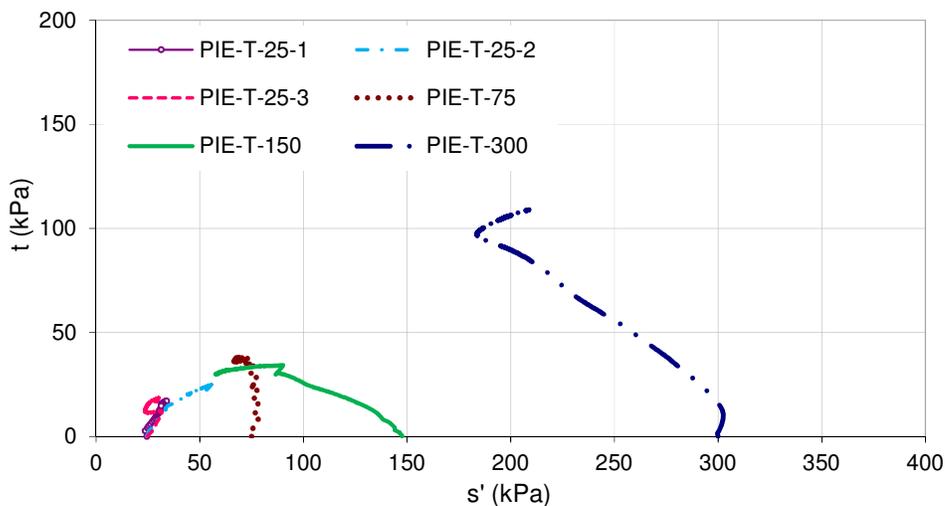


Figura 183 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento PIE-T e envoltória de resistência para a condição última empregando os dados apenas deste ensaio.

Na Figura 184 é apresentada a variação da razão entre as tensões principais efetivas e a deformação axial empregadas para a determinação da envoltória de resistência segundo o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3m\acute{a}x}$. Apenas para o ensaio PIE-

T-25-3 a curva apresenta um valor de pico. Nos demais ensaios, após a ruptura, esta razão segue praticamente constante.

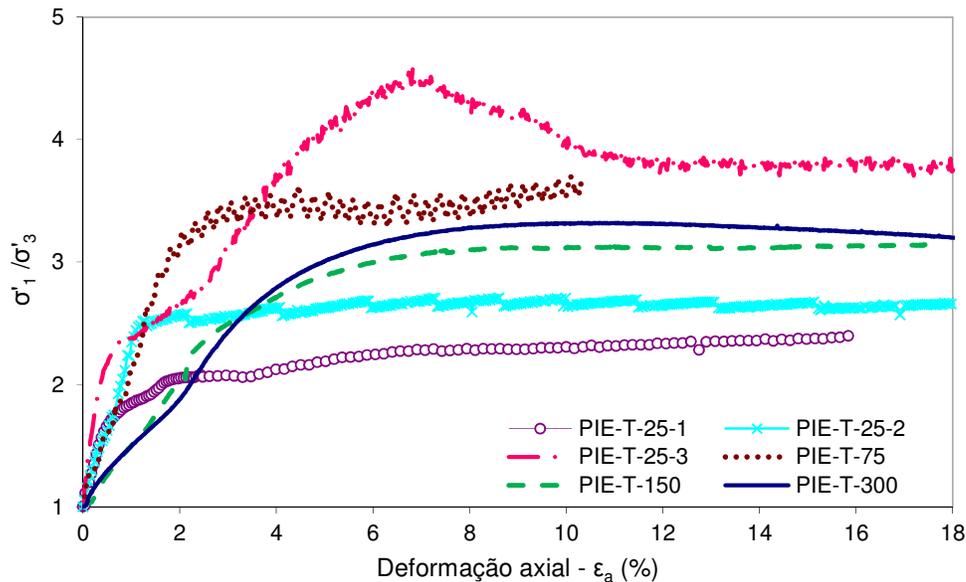


Figura 184 – Curvas de razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios PIE-T.

Os dados dos ensaios na ruptura como parâmetro de poropressão “A”, deformação axial, valores de s' , t e tensão desviadora são apresentados no Anexo 1. Independente do critério tem-se que o parâmetro A cresce com o nível de tensão de adensamento, chegando a 1,5 para $\sigma'_c = 300$ kPa. Da mesma forma, as deformações alcançadas na ruptura aumentam com esta tensão. Os valores de s' e t obtidos pelos dois critérios de ruptura para uma mesma tensão efetiva de adensamento são muito próximos, com os pontos correspondentes ao critério de tensão desviadora máxima sendo levemente inferiores. Apenas o ensaio PIE-T-150 apresenta uma diferença importante, implicando numa variação dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos de acordo com cada critério.

A envoltória de resistência na ruptura da maioria dos solos residuais é curva para níveis de tensão efetiva de adensamento abaixo ou próximo à tensão de cedência, obtida no ensaio de adensamento isotrópico, como constatado por diversos autores (e.g. Vargas, 1953; Sandroni, 1974, Massey *et al*, 1989; Futai, 2002; Carvalho, 2006). Com o propósito de definir um intercepto coesivo (c') e um ângulo de atrito (ϕ') permitindo a comparação entre as envoltórias obtidas pelas diferentes técnicas de saturação, um ajuste linear foi feito com os ensaios executados com $\sigma'_c = 150$ kPa, tensão um pouco acima da tensão de cedência

do solo (110 kPa). Na Figura 185 constam as envoltórias de resistência e os parâmetros obtidos considerando os critérios de máxima tensão desviadora e máxima razão entre as tensões efetivas principais. Foram desconsiderados os valores referentes ao ensaio PIE-T-25-2, cujo procedimento de preenchimento da câmara pode ter influenciado na resposta do solo.

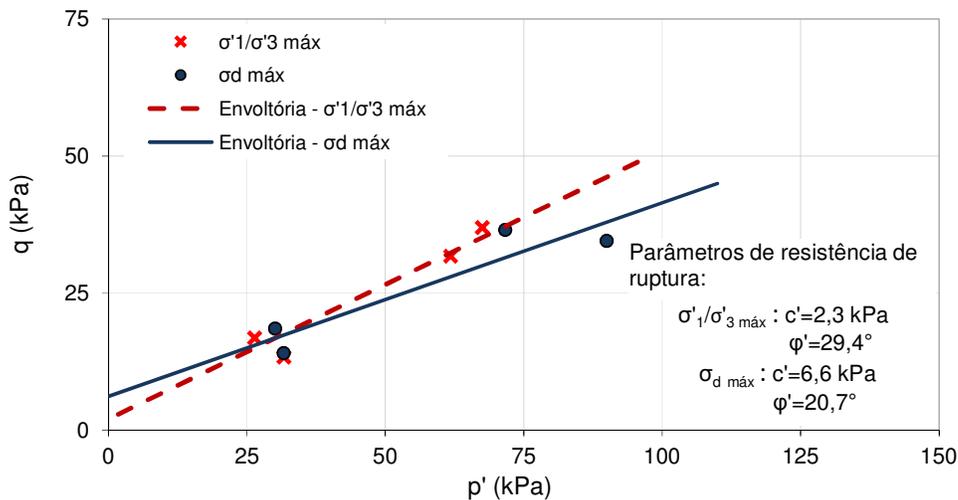


Figura 185 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima (σ'_1/σ'_3 máx) e tensão desviadora máxima (σ_d máx) para os ensaios PIE-T.

A envoltória de resistência última, apresentada na Figura 186, foi estimada a partir das tensões correspondentes a maior deformação axial atingida, sendo considerados todos os ensaios. O valor de c'_{ult} e ϕ'_{ult} encontrados são, respectivamente, 0 kPa e 31,9°. Na ampliação dos ensaios com 25 kPa de tensão confinante tem-se que a trajetória de tensões do ensaios PIE-T-25-3 ultrapassa a envoltória de resistência última de forma sutil para, após a ruptura, caminhar em direção a esta. O ensaio PIE-T-25-1 possui um menor índice de vazios que o PIE-T-25-3 e não ultrapassa a envoltória de resistência última. Para tensões maiores, a ruptura ocorre antes ou ao atingir tal envoltória pela primeira vez.

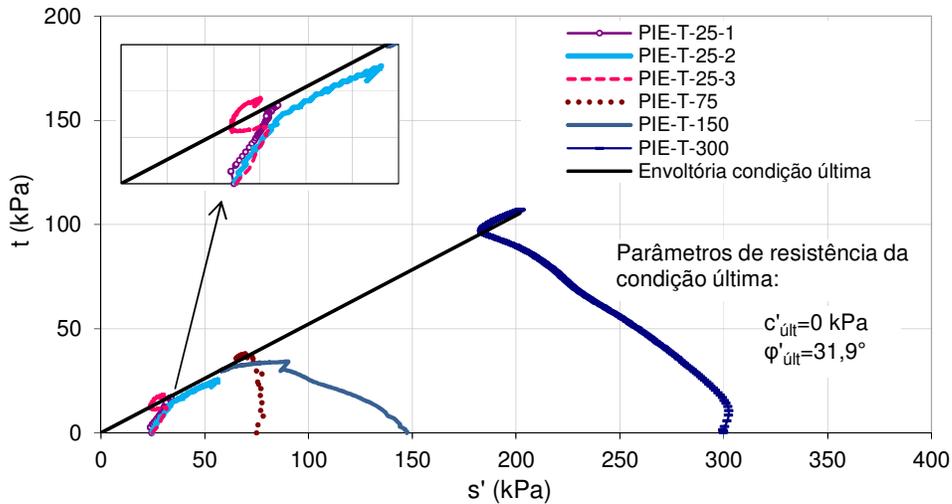


Figura 186 – Envoltória de resistência dos ensaios CIU executados no solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios PIE-T.

iv. Relação entre índice de vazios, resistência na ruptura e tensão efetiva de adensamento.

A influência da magnitude da tensão efetiva de adensamento na resistência de ruptura fica evidente no gráfico da Figura 187, que correlaciona estes dois parâmetros. Já ao cruzar os dados de volume específico (1+e) antes e após o adensamento com a resistência de ruptura, não se tem uma relação satisfatória Figura 188.

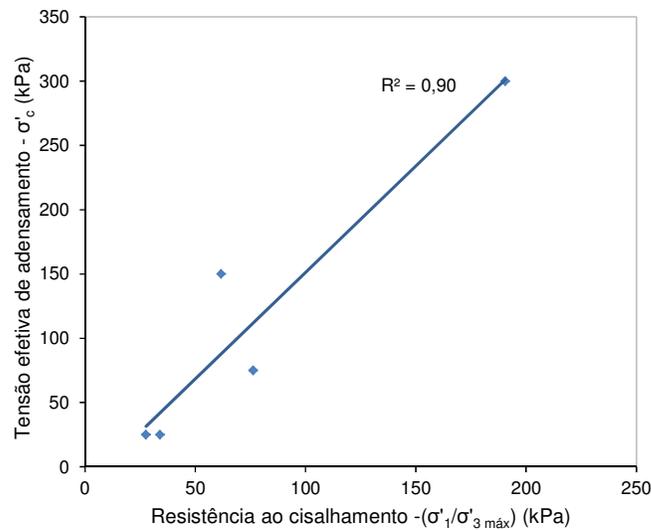


Figura 187 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ nos ensaios PIE-T.

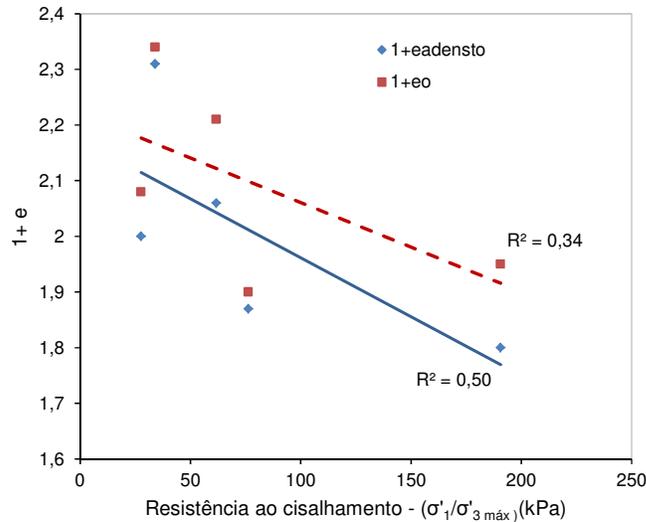


Figura 188 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_3 \text{ máx}$ nos ensaios PIE-T.

9.1.4. Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento SIA – solo T.

Os dados referentes aos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 75$ e 150 kPa saturados através do procedimento SIA-T são apresentados na Tabela 53. De uma forma geral, nota-se que os ensaios executados empregando este procedimento, inclusive o ensaio SIA-T-25, possuem índice de vazios acima de 1,15. Apenas os ensaios PIE-T-25-3 e PIE-T-150, saturados pelo método PIE, têm tal característica. Nos demais ensaios, o índice de vazios foi próximo ou inferior a 1.

Tabela 53 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com $\sigma'_c = 75$ e 150kPa do solo T saturado com o procedimento SIA .

Ensaio	σ'_c (kPa)	w_o (%)	w_f (%)	γ_n (kN/m³)	γ_d (kN/m³)	e_o	e_{adens}	n (%)	S_o (%)	B
SIA-T-75	75	22,70	40,44	14,73	12,01	1,23	1,17	55,1	50,5	0,98
SIA-T-150	150	25,94	36,06	15,52	12,33	1,17	1,08	53,9	60,5	0,98

i. Comportamento tensão-deformação

Todas as curvas tensão desviadora x deformação axial dos ensaios executados seguindo esta metodologia de saturação apresentaram pico de resistência seguido da queda gradativa da tensão desviadora até atingir um patamar, como indicado na Figura 189a. Estes picos não estão associados à

dilatância, pois os excessos de poropressão nestes casos foram sempre positivos, com apenas o ensaio correspondente a tensão efetiva de 25 kPa apresentando um leve decréscimo na geração de poropressão no momento da ruptura, melhor visualizado na Figura 168. Um plano de ruptura bem definido não foi observado nas amostras ao final dos ensaios. Futai (2002) associa o estacionamento do excesso de poropressão em patamares horizontais ao processo de drenagem interna, onde parte da água do corpo de prova migra para a área cisalhada.

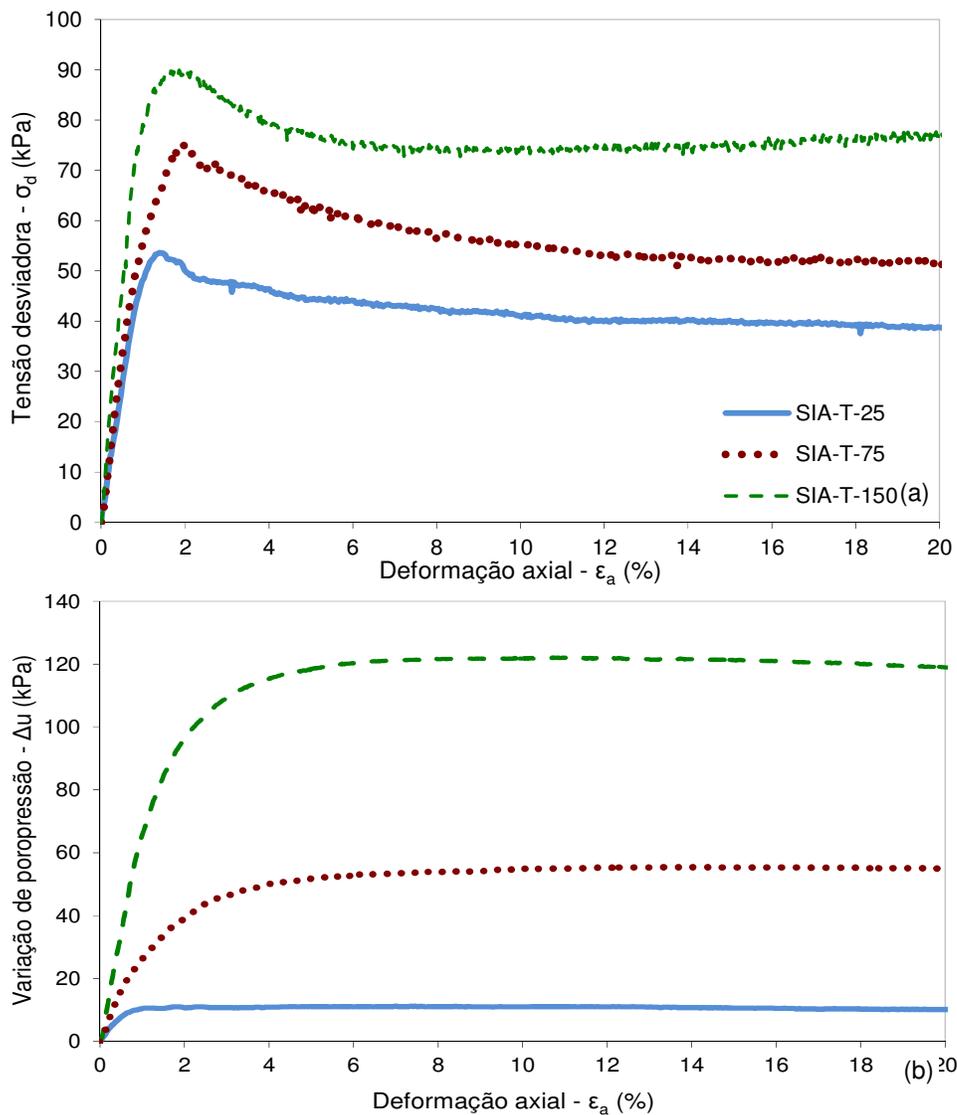


Figura 189 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T.

Nas curvas tensão desviadora normalizada por $\sigma'_c \times \epsilon_a$ tem-se que a curva correspondente à tensão efetiva de adensamento de 25 kPa distancia-se das demais (Figura 190a), indicando que esta tensão está abaixo da tensão de cedência, assim como observado nos ensaios PIE. Entretanto, as diferenças nos ensaios SIA são mais evidentes. O mesmo ocorre com a geração de poropressão.

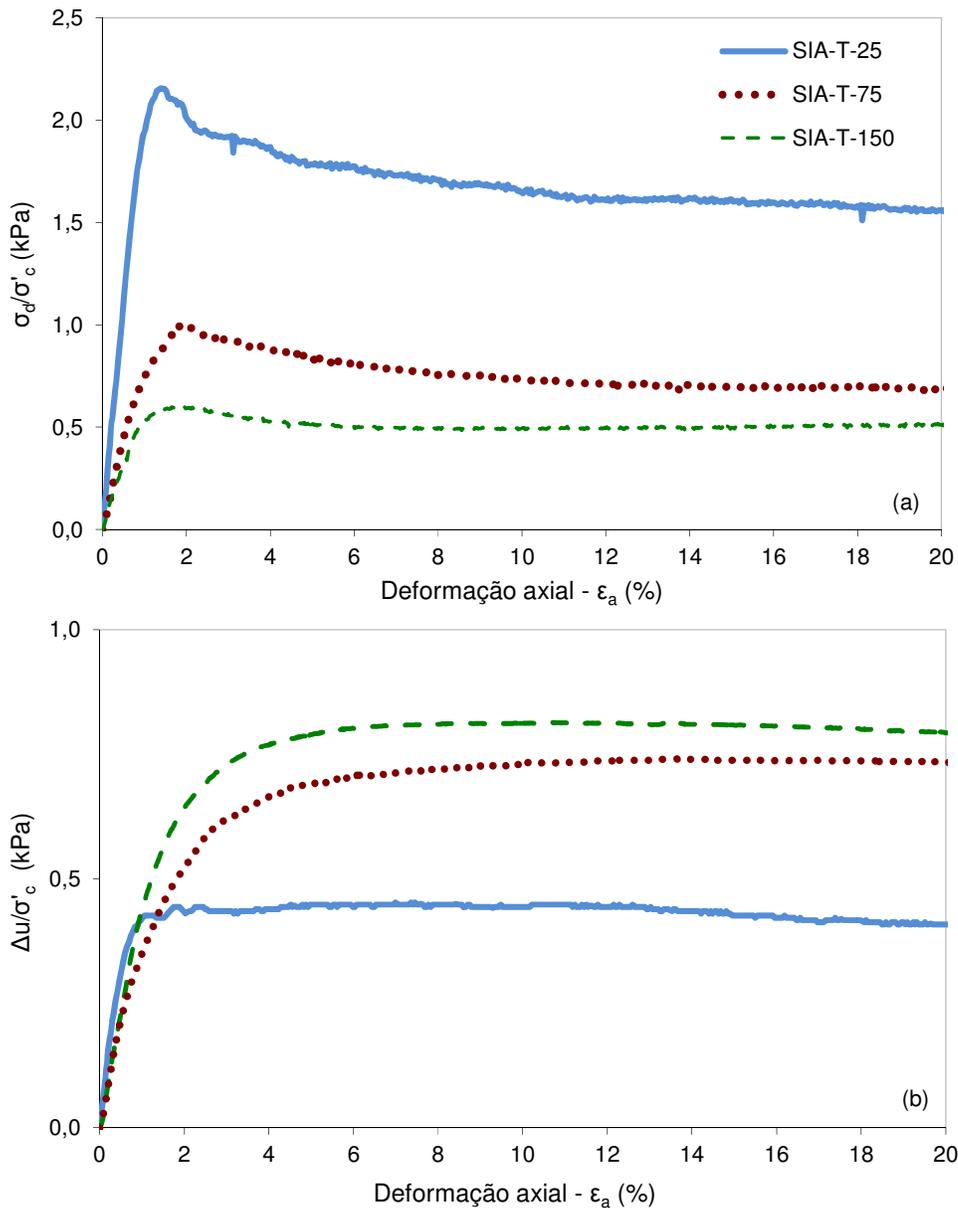


Figura 190 - Curvas (a) tensão desviadora normalizada por σ'_c versus deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por σ'_c versus deformação axial dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T.

ii. Módulo de deformação

Os módulos de deformação secante para 50 % da tensão desviadora máxima ($E_{s50\%}$) dos ensaios executados com o método de saturação SIA apresentam um leve aumento com a tensão efetiva de adensamento (Tabela 54). O contrário ocorre para os valores normalizados pela tensão efetiva de adensamento.

Tabela 54 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação SIA-T.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)	$E_{s50\%}/\sigma'_c$
SIA-T-25	5,5	220
SIA-T-75	6,5	86
SIA-T-150	9,2	61

iii. Trajetórias de tensão e resistência

A trajetória de tensões do ensaio executado com 75 kPa de tensão confinante encontra-se na vertical no início do ensaio. Ao atingir um valor de t igual 36 kPa, a mesma segue para a esquerda em direção a envoltória de resistência correspondente ao estado último. Já a trajetória do ensaio PIA-T-150 caminha para a esquerda com comportamento semelhante a de um solo sedimentar normalmente adensado. A representação das trajetórias no espaço s' x t de todos os ensaios SIA é exposta na Figura 191.

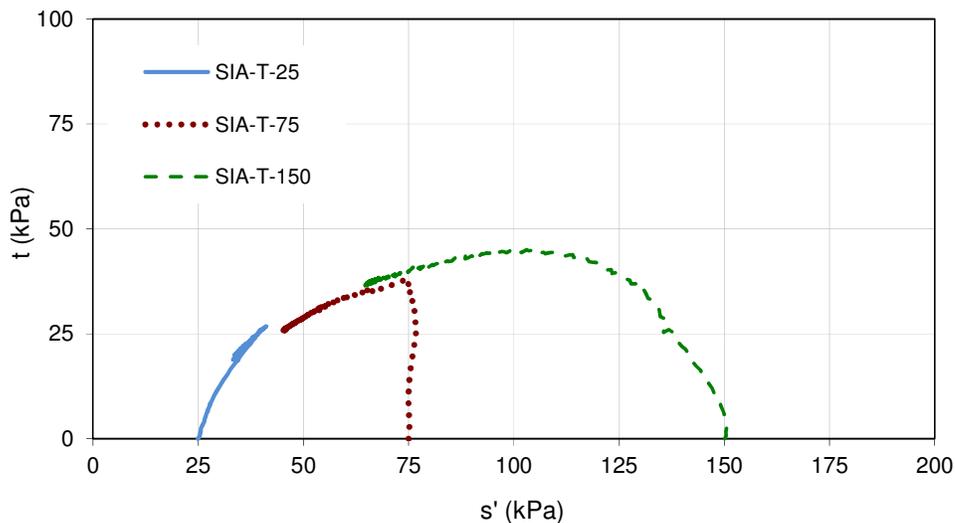


Figura 191 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo T saturado empregando o procedimento SIA-T.

Os critérios empregados para determinar a envoltória e parâmetros de resistência de ruptura são os mesmos dos ensaios PIE-T, o de máxima tensão desviadora e de maior razão entre as tensões efetivas principais ($\sigma'_1/\sigma'_{3máx}$). Os

dados referentes à ruptura tais como deformação axial, s' e t constam Anexo 1. Independente do critério adotado, tem-se que o parâmetro A e a deformação axial na ruptura tendem a aumentar com a tensão efetiva de adensamento.

Na Figura 192 consta a curva $\sigma'_1/\sigma'_3 \times \epsilon_a$. Apenas o ensaio executado com $\sigma'_c = 25$ kPa apresenta pico nesta representação. Para grandes deformações, tem-se que todos os ensaios caminham para o mesmo patamar de σ'_1/σ'_3 .

As envoltórias e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos a partir dos critérios de ruptura $\sigma'_1/\sigma'_3 \text{ máx}$ e $\sigma_d \text{ máx}$ constam na Figura 193. Os valores de s' e t correspondentes aos ensaios com $\sigma'_c = 75$ e 150 kPa obtidos através do critério $\sigma'_1/\sigma'_3 \text{ máx}$ são inferiores e ocorrem para maiores deformações que os determinados de acordo com $\sigma_d \text{ máx}$.

Assim como realizado nos ensaios PIE-T, a envoltória de resistência última dos ensaios SIA-T foi estimada a partir dos valores das tensões alcançadas para grandes deformações. Os parâmetros de resistência última c'_{ult} e ϕ'_{ult} bem como a envoltória de resistência são apresentados na Figura 194. Claramente, a trajetória de tensões do ensaio com $\sigma'_c = 25$ kPa ultrapassa a envoltória de resistência última até atingir a máxima tensão desviadora que coincide com a resistência equivalente a $\sigma'_1/\sigma'_3 \text{ máx}$ e com o ponto de plastificação da estrutura. Após a ruptura, a mesma caminha em direção a resistência última. Nos demais ensaios tem-se que o corpo de prova rompe próximo ou assim que atinge a envoltória de resistência última no sentido de baixo para cima.

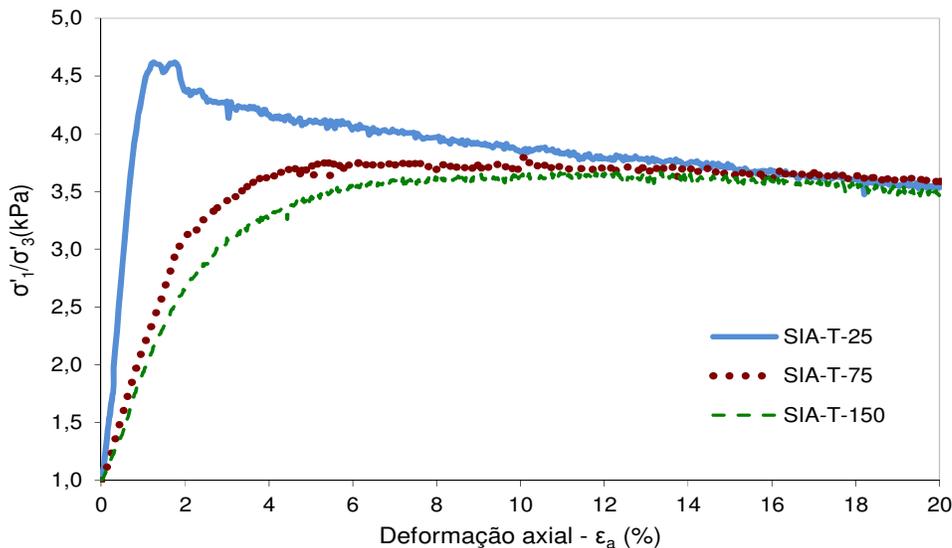


Figura 192 – Curvas de razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios SIA-T.

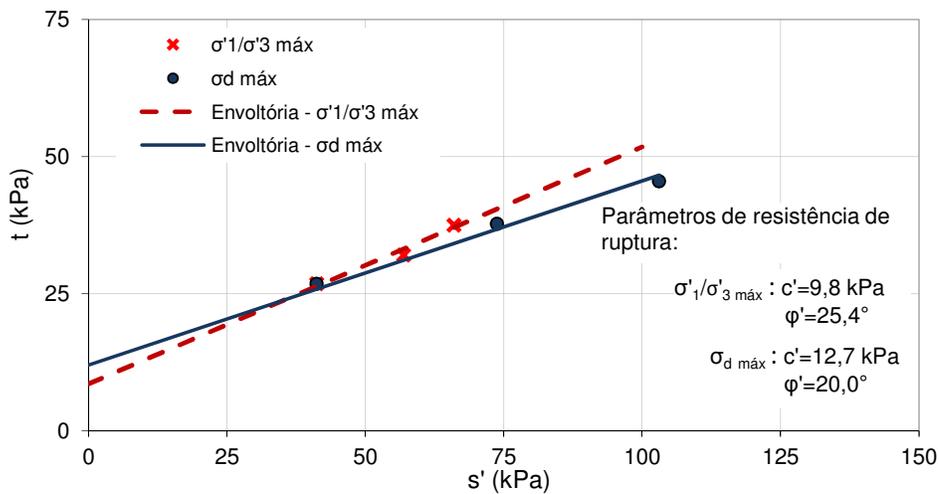


Figura 193 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetivas máximas ($\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$) e tensão desviadora máxima ($\sigma_{d \text{ máx}}$) para os ensaios SIA-T.

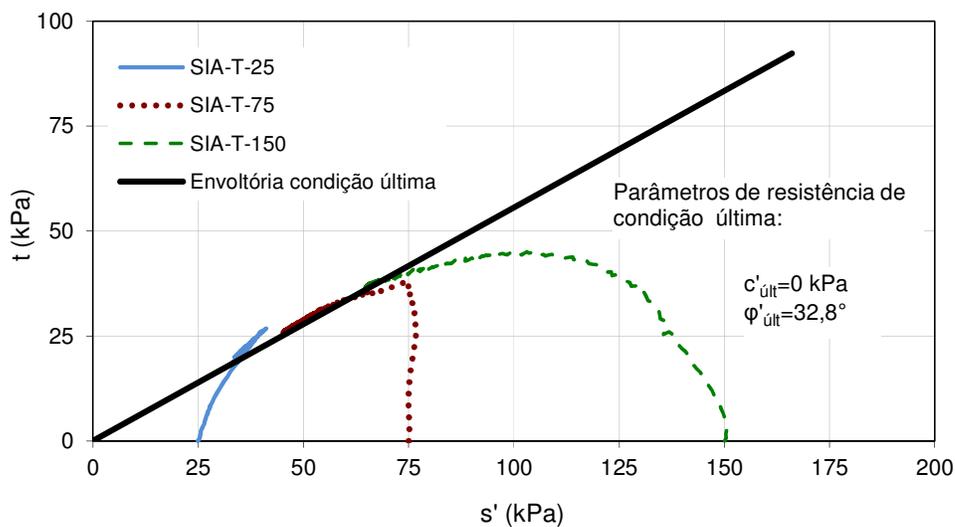


Figura 194 – Envoltória de resistência dos ensaios CIU executados no solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios SIA-T.

iv. Relação entre índice de vazios, resistência na ruptura e tensão efetiva de adensamento.

Os corpos de prova empregados para execução dos ensaios CIU com a técnica de saturação SIA apresentam índice de vazios inicial que, coincidentemente, aumentam com a tensão efetiva empregada. Tanto a

diminuição do índice de vazios como o aumento da tensão confinante contribuem para a obtenção de parâmetros de ruptura maiores tendo-se assim uma boa correlação nestes ensaios entre resistência, índice de vazios e a tensão efetiva, indicada nas Figuras 195 e 196.

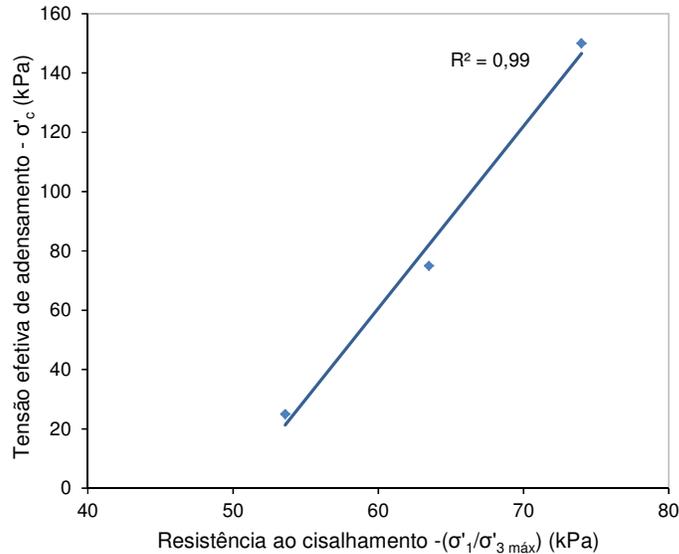


Figura 195 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 máx}$ nos ensaios SIA-T.

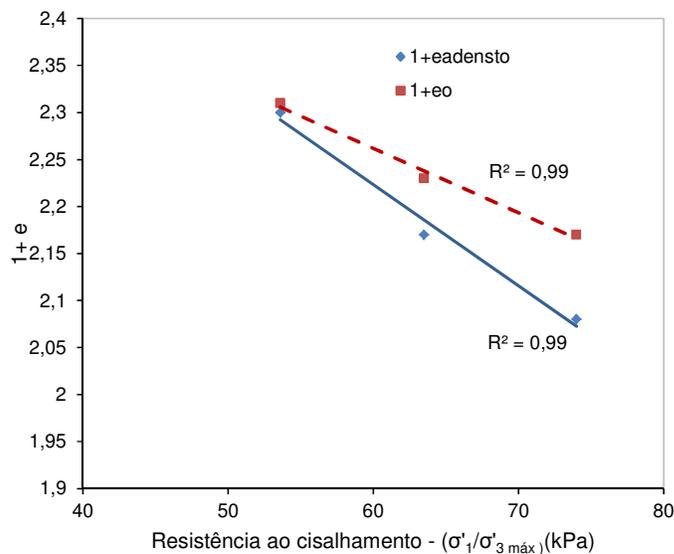


Figura 196 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência de ruptura considerando o critério $\sigma'_1/\sigma'_{3 máx}$ nos ensaios SIA-T.

9.1.5. Definição de envoltória de condição última única para o solo de Tanguá

Ao contrário da envoltória de resistência ao cisalhamento na ruptura, a de resistência última não é influenciada por procedimentos anteriores que possam ter afetado sua estrutura como, por exemplo, o processo de saturação. Futai (2002) executou ensaios CIU em dois solos residuais de um perfil de alteração de gnaiss, maduro e jovem. Ensaios tanto em amostras indeformadas como em reconstituídas com o mesmo índice de vazios do solo natural e com índice de vazios menor foram realizados para uma mesma tensão efetiva. A influência da estrutura ficou evidente principalmente nas trajetórias de tensões. Entretanto, independente do índice de vazios inicial e do estado do solo (intacto ou compactado), as trajetórias de ambos para diferentes níveis de tensão de confinamento caminharam para a envoltória de resistência última. O mesmo é observado nos resultados dos ensaios no solo residual de Tanguá, sendo a envoltória de resistência última obtida a partir dos ensaios SIA-T praticamente igual à correspondente aos ensaios PIE-T. Desta forma, uma envoltória de resistência última foi traçada com base nos resultados dos ensaios executados com ambos os métodos de saturação, como mostrado na Figura 197.

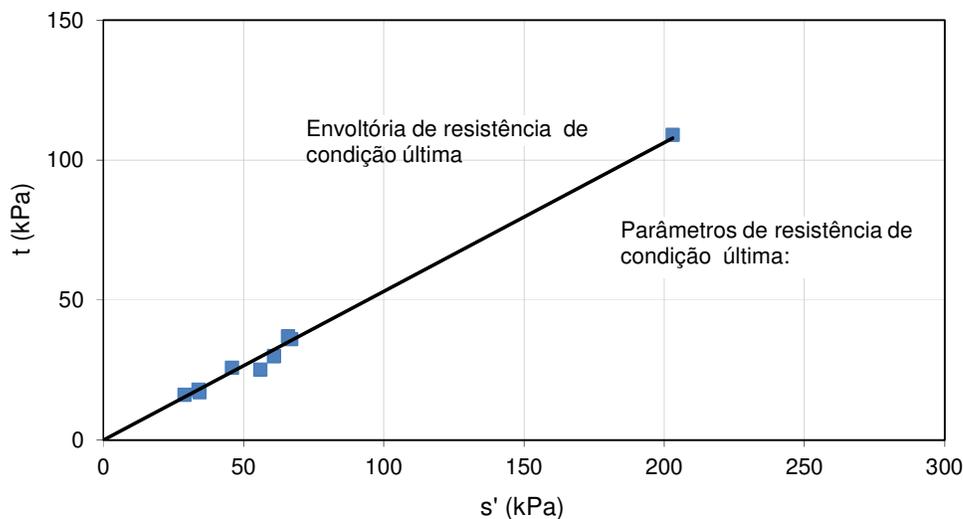


Figura 197 – Envoltória de resistência do solo T para a condição última empregando os dados dos ensaios dos ensaios SIA-T e PIE-T.

Nos ensaios triaxiais CIU executados empregando-se os dois métodos de saturação, acredita-se que a condição última atingida seja próxima ou coincida com o estado crítico devido à tendência de estabilização do excesso de poropressão e da tensão desviadora, principalmente nos ensaios executados

com maior tensão efetiva de adensamento e levados a maiores deformações (ver Figura 181 e Figura 189).

Com o único intuito de caracterizar o material, as linhas do estado crítico são traçadas na Figura 198 no espaço de Cambridge e $x p'_c$ e $\sigma_d \times p'_c$, onde p'_c é igual a $(\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3$. As funções que representam o estado crítico são:

$$q_{cs} = M p'_{cs}$$

$$v_{cs} = \Gamma - \psi \ln p'$$

Onde:

- $q_{cs} = \sigma'_1 - \sigma'_3$ na condição de estado crítico;
- M – inclinação da linha de estado crítico no plano $p':q$;
- v_{cs} = volume específico de estado crítico;
- Γ = volume específico na condição do estado crítico para $p' = 1\text{kPa}$;
- ψ = inclinação da linha do estado crítico no plano $\ln p': v$.

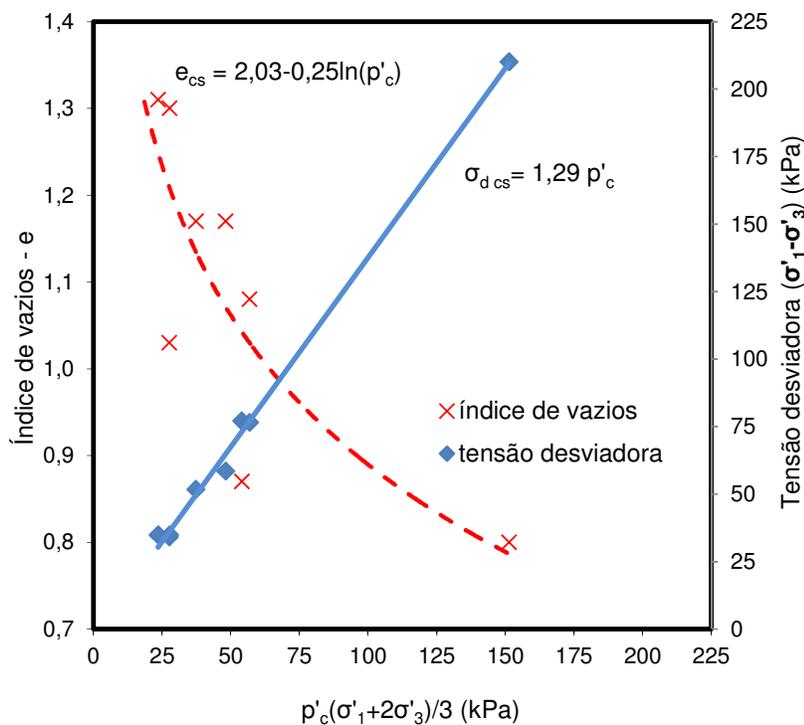


Figura 198 – Linhas do Estado Crítico do solo de Tanguá.
Na Tabela 55 são apresentados tais parâmetros para o solo T.

Tabela 55 - Parâmetros de Estado Crítico do solo T.

M	Γ	ψ
1,29	3,03	0,25

9.1.6.

Comparação dos resultados dos ensaios executados com os métodos de saturação SIA-T e PIE-T.

Uma análise comparativa inicial da influência do processo de saturação foi realizada no item 9.1 com os ensaios CIU executados com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa e medida de variação de volume total em alguns ensaios. A baixa tensão efetiva de adensamento empregada para tal propósito foi escolhida para que a magnitude da mesma não atuasse de forma significativa na estrutura do solo sobrepondo-se ao efeito do processo de saturação. Neste item serão reapresentados os ensaios com $\sigma'_c=25\text{kPa}$ cujo processo de preenchimento da câmara para medida de variação de volume total não alterou as condições iniciais do corpo de prova ou nenhum procedimento diferenciado para medida de variação de volume total foi aplicado (ensaio PIE-T-25-1), além dos ensaios com tensões efetivas superiores.

9.1.6.1.

Comportamento tensão-deformação e trajetórias de tensões

Na Figura 199 constam as curvas tensão desviadora x deformação axial e excesso de poropressão x deformação axial para as tensões efetivas de 25, 75 e 150 kPa dos ensaios CIU executados pelos métodos de saturação SIA-T e PIE-T.

As maiores diferenças no comportamento mecânico do solo de Tanguá devido ao método de saturação em ensaios CIU são observadas para o menor nível de confinamento. Embora os corpos de prova empregados nos ensaios SIA-T-25 e PIE-T-25-3 possuam índices físicos semelhantes, a resistência não drenada no ensaio SIA-T-25 é 30% superior ao do ensaio PIE-T-25-3 e ocorre para menores deformações (Figura 199a). Além disso, quando plotada a variação da razão das tensões efetivas principais contra deformação (Figura 169), a curva correspondente ao ensaio PIE-T-25-3 tende a se comportar de forma semelhante ao ensaio executado em amostra reconstituída (PIE-T-25R), assim como o ensaio PIE-T-25-1, cujo índice de vazios é inferior. O único ensaio que de fato se diferencia dos demais por apresentar um pico nesta representação é o SIA-T-25. Diferenças ainda são observadas nas trajetórias de tensões efetivas destes ensaios (Figura 200). A trajetória do ensaio SIA-T-25 segue com os valores de s' e t crescendo até a ruptura ser alcançada para a máxima tensão desviadora, que coincide com o valor correspondente a

σ'_1/σ'_3 máx, ultrapassando a envoltória de resistência última. A “plastificação” da estrutura associa-se ao momento em que ocorre a ruptura por cisalhamento. Após a ruptura, a trajetória caminha em direção à envoltória de resistência última, comportamento este próximo a de um solo com estrutura cimentada, como preconizado por Leroueil e Vaughan (1990). Entretanto, tal comportamento não está vinculado a uma posterior tendência de dilatação refletida em geração de excesso negativo de poropressão; o que se tem é um pequeno decréscimo na geração de poropressão, quase imperceptível, no momento da ruptura. Este comportamento não é observado nos ensaios executados com o método de saturação PIE que, de acordo com o critério de ruptura da máxima razão entre as tensões efetivas principais, rompe ao atingir a condição do estado crítico, com exceção do ensaio PIE-T25-3. No ensaio PIE-T-25-3, a trajetória de tensões tem um comportamento similar ao do ensaio SIA-T até uma deformação de 0,7%. No entanto, a partir deste ponto, onde ocorre a plastificação da estrutura, o caminho de tensões segue com t constante e diminuição contínua de s' para então o solo mostrar um ganho de resistência e ultrapassar a envoltória de condição última e atingir a máxima tensão desviadora, mas próximo desta, com um valor de t inferior ao do ensaio SIA-T-25.

Nos ensaios com tensão efetiva de 75 kPa, o comportamento tensão-deformação é similar até a tensão desviadora máxima (Figura 199b), mesmo com o corpo de prova empregado no ensaio SIA-T-75 possuindo maior índice de vazios após o adensamento (1,17) que o ensaio PIE-T-75 (0,87). A variação volumétrica durante o adensamento em ambos os ensaios foi de aproximadamente 4%. As trajetórias de tensão apresentam pouca variação da tensão efetiva média (s') seguindo quase que verticalmente até romper próximo a envoltória de resistência última, caso seja considerado o critério de tensão desviadora máxima, para em seguida caminhar para a esquerda (Figura 200). Caso o critério considerado seja o de máxima razão das tensões efetivas principais, o ponto correspondente ao ensaio SIA-T-75 situa-se levemente acima da envoltória de resistência última, enquanto no ensaio executado pelo método PIE coincide com o de máxima tensão desviadora, abaixo da envoltória de condição última. Esta tensão efetiva de adensamento encontra-se próxima a tensão de cedência, podendo ocorrer dano à estrutura do solo na fase de adensamento, que pode sobrepor ou encobrir o efeito do processo de saturação no comportamento mecânico do solo.

Os ensaios SIA-T-150 e PIE-T-150 possuem comportamento tensão-deformação e excesso de poropressão-deformação próximos, com o ensaio SIA-

T-150 evidenciando, assim como os demais ensaios realizados com esta técnica de saturação, um pico de resistência não-drenada bem definido para pequenas deformações (Figura 170e). Ambas as trajetórias de tensões caminham para esquerda, mas com a curva do ensaio SIA-T-150 acima da curva correspondente ao ensaio PIE-T-150 devido às maiores tensões desviadoras obtidas no primeiro ensaio.

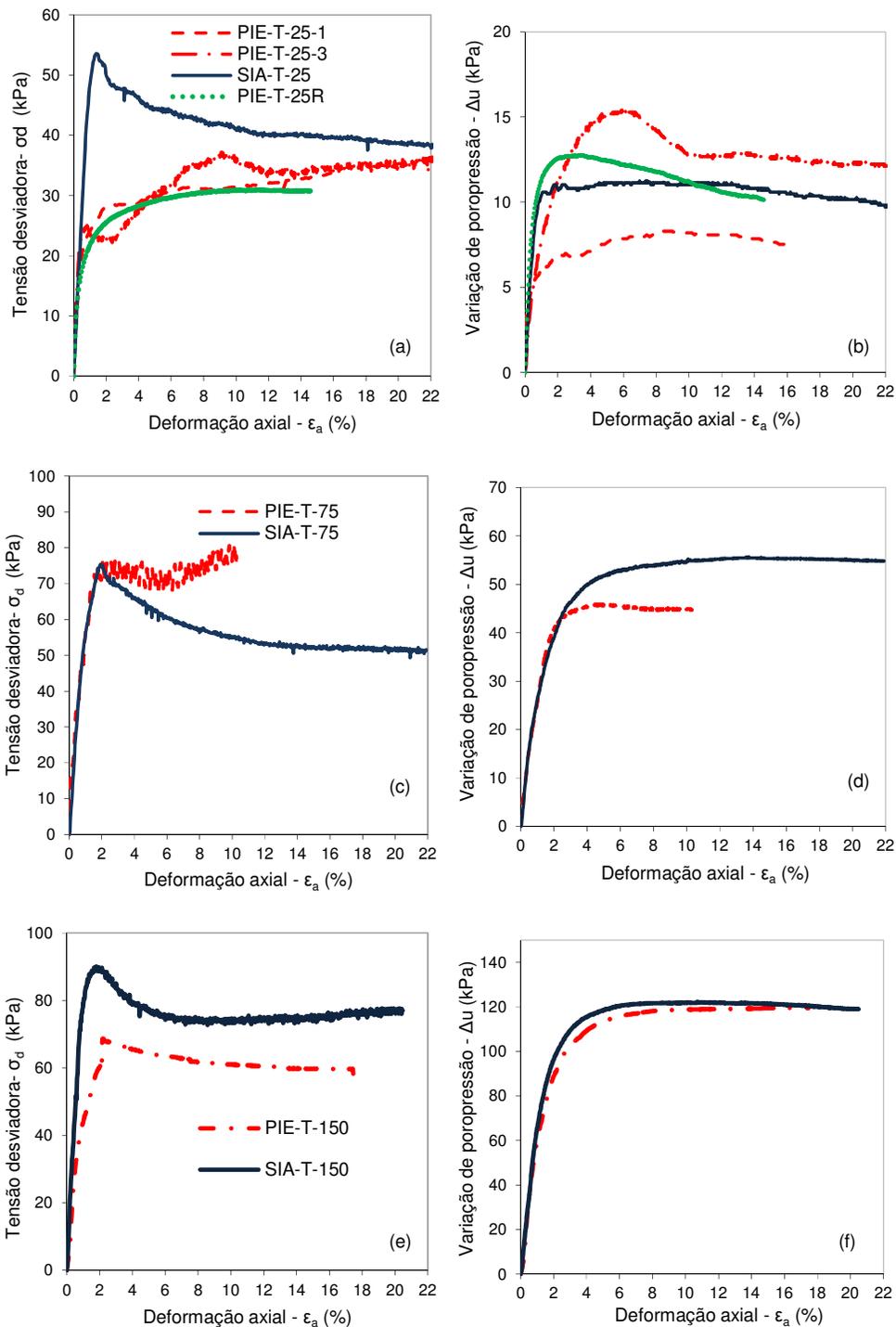


Figura 199 – Comparação das curvas $\sigma_d \times \epsilon_a$ e $\Delta u \times \epsilon_a$ dos ensaios realizados com os métodos de saturação SIA-T e PIE-T para as tensões efetivas de adensamento de 25 kPa (a,b), 75 kPa (c,d) e 150 kPa (e, f).

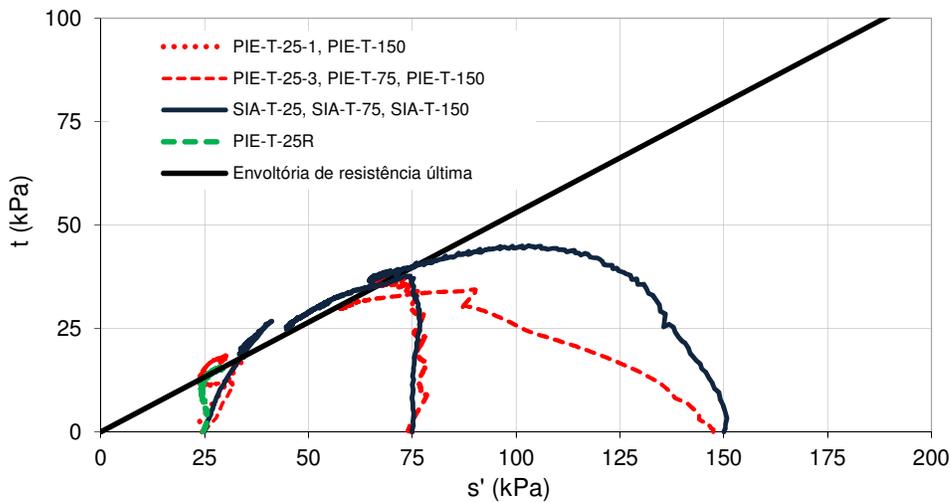


Figura 200 - Comparação das trajetórias de tensões dos ensaios executados com os métodos de saturação PIE-T e SIA-T.

As diferenças observadas no comportamento tensão-deformação e trajetórias de tensões, principalmente nos ensaios executados com $\sigma'_c = 25$ kPa, associadas à maior variação de volume total durante o processo de saturação do ensaio PIE-T-25-3 em relação ao ensaio SIA-T-25, indicam que o método de saturação SIA, ao contrário do método PIE, não causa dano à estrutura do solo ou que o dano gerado é inferior ao do método PIE. Os corpos de prova empregados nestes ensaios apresentaram grau de saturação inicial inferior a 70%. Acredita-se que durante a percolação de água nos ensaios PIE o fluxo possa ter ocorrido por caminhos preferenciais tais como macroporos, não aumentando o grau de saturação de forma significativa em todas as partes do corpo de prova. Desta forma, a manutenção de um relativamente baixo grau de saturação pode ter contribuído para que um aumento da tensão confinante na fase de aplicação de contrapressão durante o processo de saturação tenha causado um enfraquecimento de ligações entre partículas, especialmente neste material que apresenta estrutura frágil, sem intertravamento de partículas ou agentes cimentantes em grande concentração, com uma tensão de cedência relativamente baixa (110 kPa). Nos ensaios SIA, a percolação de água é feita por meio de sucção com uma tensão confinante baixa, minimizando efeitos que possam afetar a estrutura do solo no início do ensaio e, ao mesmo tempo, propiciando um aumento mais significativo do grau de saturação do corpo de prova. Além disto, a contrapressão é aplicada de forma lenta e contínua sem submissão do solo a ciclos de tensões, como no método PIE.

A magnitude da tensão efetiva de adensamento e a estrutura do solo influenciam simultaneamente na resposta mecânica do solo quando submetido a ensaios triaxiais. Para tensões efetivas muito abaixo da tensão de cedência, tem-se que a estrutura do solo é o principal fator influente em sua resposta mecânica. Para tensões próximas à de cedência, caso dos ensaios executados com $\sigma'_c=75\text{kPa}$, ocorre um balanço entre os dois efeitos (tensão efetiva de adensamento e estrutura). Já para valores de tensão efetiva superiores à de cedência, o solo passa a se comportar como material normalmente adensado, tendo seu comportamento fortemente influenciado por esta tensão.

9.1.6.2. Módulo de deformação

Tendo em mente as restrições e erros na estimativa de módulos de deformação em ensaios executados com medida externa de deformação axial, uma análise comparativa foi feita para deformações acima de 0,25 % e para o módulo correspondente a 50% da máxima tensão desviadora ($E_{s50\%}$).

Os módulos de deformação $E_{s50\%}$ dos ensaios SIA e PIE não apresentam variabilidade significativa para as tensões efetivas de 25 e 75 kPa, mesmo com a variabilidade do índice de vazios inicial. No entanto, para a tensão efetiva de 150 kPa, acima da tensão de cedência do solo, tem-se que o ensaio SIA, com menor índice de vazios inicial, possui módulo $E_{s50\%}$ maior, como indicado na Figura 201d.

Apenas nos demais gráficos da Figura 201, que indicam a variação do módulo secante com a deformação axial, ficam evidentes as diferenças entre os ensaios SIA e PIE. Enquanto o módulo referente ao ensaio SIA-T-25 a partir de 0,25 % de deformação apresenta praticamente o mesmo módulo secante até deformações próximas à ruptura, os ensaios PIE-T-25-3, que possui índice de vazios inicial praticamente igual ao do ensaio SIA-T-25, e PIE-T-25-1, com menor índice de vazios, demonstram uma queda progressiva do módulo secante, com comportamento semelhante ao do ensaio executado com amostra reconstituída. Para a tensão efetiva de 75 kPa, próxima a de cedência, mesmo com diferenças significativas no índice de vazios, os solos apresentam a mesma variação de módulo secante para deformações acima de 0,25%. Já para tensões efetivas de adensamento superiores, tem-se que a magnitude desta tensão somada à densidade do corpo de prova são os fatores mais influentes na magnitude do módulo de deformação.

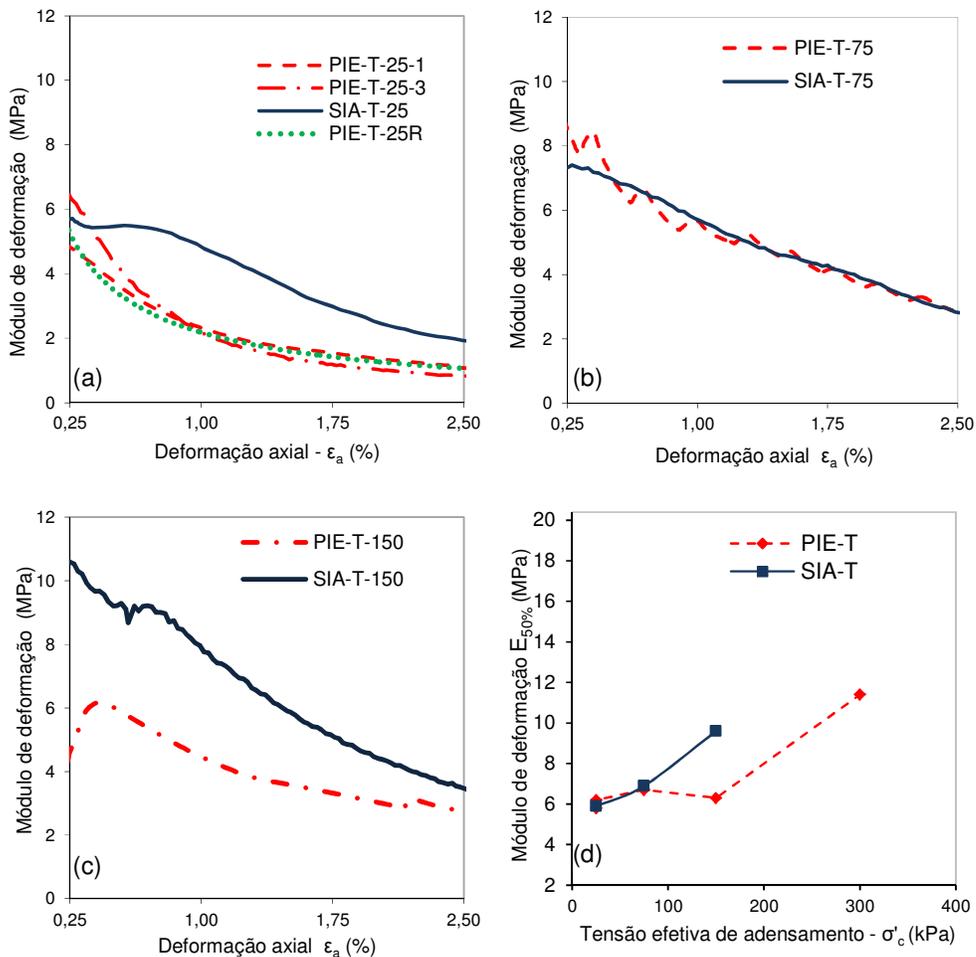


Figura 201 – Comparação qualitativa, dada a falta de instrumentação interna, da variação do módulo de deformação secante com a deformação para os ensaios executados com os métodos de saturação PIE e SIA com as tensões efetivas de adensamento (a) 25 kPa, (b) 75 kPa e (c) 150 kPa e variação do módulo $E_{s50\%}$ com a tensão efetiva (d).

9.1.6.3. Envoltória de resistência

A influência de processo de saturação se reflete de forma clara na envoltória de resistência determinada para valores baixos de σ'_c , independente do critério de ruptura, como mostrado na Figura 202. Na envoltória obtida a partir dos ensaios submetidos ao processo de saturação PIE, o intercepto coesivo é inferior ao correspondente ao método de saturação SIA, sendo cerca de 75% menor no caso do critério de $\sigma'_1 / \sigma'_{3 \text{ máx}}$ (Figura 202a) e 50% para a máxima tensão desviadora (Figura 202b). Diferenças na magnitude do ângulo de atrito são notadas para $\sigma'_1 / \sigma'_{3 \text{ máx}}$ em função justamente do ajuste da envoltória devido ao valor elevado de s' e t para o ensaio executado com tensão efetiva de

25 kPa, o que mais destaca a influência do processo de saturação na estrutura do solo.

No entanto, caso uma envoltória linear única seja traçada para representar o comportamento do solo na ruptura englobando valores elevados de tensão efetiva, as diferenças detectadas devido ao processo de saturação nos parâmetros de resistência para baixos níveis de tensão passam a ser desprezíveis, tendo em vista que o dano causado à estrutura pelo processo de saturação é superado pelo efeito da tensão efetiva de adensamento e a tensão de cedência do solo é baixa.

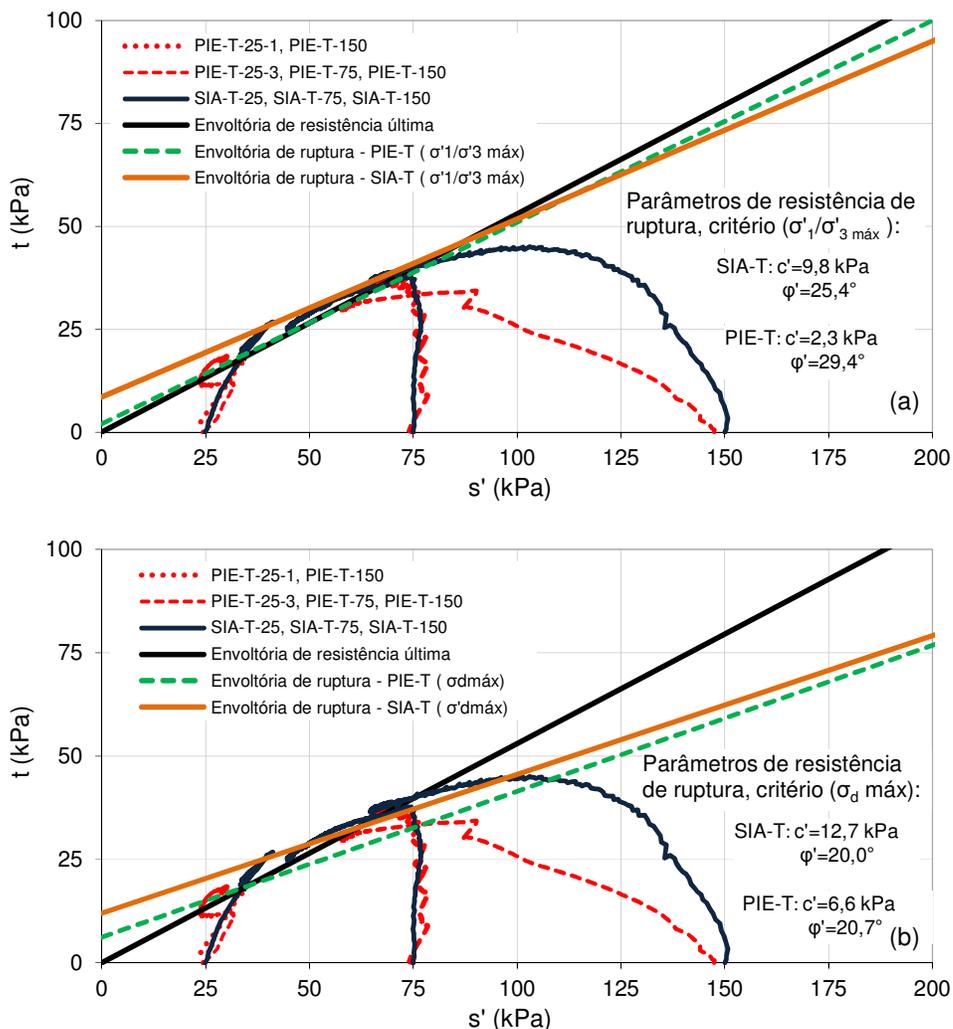


Figura 202 - Comparação das envoltórias de resistência de ruptura do solo residual T quando saturado pelo método PIE e SIA critério de ruptura (a) σ'_1/σ'_3 máx e (b) σ_d máx.