

## 10

## Avaliação do efeito da técnica de saturação no comportamento tensão-deformação-resistência: solo residual de Duque de Caxias – DC02.

A apresentação e análise dos resultados do solo residual DC02 segue o mesmo padrão do solo residual T, onde são apresentados primeiramente os ensaios CIU com  $\sigma'_c = 25$  kPa e medida de variação de volume total para então serem analisados os dados referentes às tensões efetivas superiores e subsequente análise comparativa dos dados. Para este solo, ainda foram executados ensaios CID em amostras reconstituídas com o intuito de auxiliar na determinação da resistência na condição última. Na Tabela 45 é apresentado o programa de ensaios triaxiais do solo DC02. A descrição da rotina de saturação empregada encontra-se na Tabela 47. Maiores detalhes sobre as técnicas de saturação constam no capítulo 8.

Tabela 56 – Programa de ensaios triaxiais do solo DC02.

Tipo de Ensaio	Rotina de saturação	Tensão efetiva de adensamento - $\sigma'_c$ (kPa)				
		25	75	150	300	500
CIU	IE-DC02	2*	1	1	1	1
	IA-DC02	1	-	-	-	-
	IU-DC02	1	1	1	1	-
	SIA-DC02	1	1	1	-	-
CID reconstituído	IE-DC02	1	1	-	1	-

\*1 ensaio foi executado com material reconstituído.

Tabela 57 – Descrição das rotinas de saturação avaliadas no solo DC02.

Rotina de saturação	Descrição	
SIA-DC02	Percolação de água – sucção (S)	Incremento automático (IA)
IA-DC02	Sem percolação	Incremento automático (IA)
IU-DC02	Sem percolação	Incremento em um único estágio (IU)
IE-DC02	Sem percolação	Incremento de contrapressão em estágios (IE)

## 10.1.

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

Os índices físicos dos corpos de prova empregados nos ensaios CIU com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa, assim como o parâmetro B de Skempton de saturação, o teor de umidade e o índice de vazios após o adensamento constam na Tabela 58.

Diferentemente do solo residual de Tanguá, as amostras do solo DC02 apresentam variabilidade menor do índice de vazios e do teor de umidade inicial. A homogeneidade deste solo também é perceptível a olho nu, sem terem sido detectados nos corpos de prova planos, veios ou concreções que pudessem originar uma resposta diferenciada em determinado ensaio.

Tabela 58 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU com  $\sigma'_c = 25$  kPa utilizados na avaliação dos processos de saturação do solo DC02.

Ensaio	$w_o$ (%)	$w_i$ (%)	$Y_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$Y_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$e_{adens}$	$n$ (%)	$S_o$ (%)	B
IE-DC02-25	28,60	49,12	15,2	11,82	1,39	1,37	58,1	59,3	0,98
IU-DC02-25	33,39	45,77	15,19	11,40	1,48	1,44	59,7	65,0	0,97
IA-DC02-25	28,22	45,62	15,21	11,86	1,38	1,37	58,0	58,9	0,97
SIA-DC02-25	31,95	45,08	15,46	11,71	1,41	1,39	58,5	65,2	0,97
IE-DC02-25R	30,29	55,17	15,38	11,8	1,39	1,36	58,2	62,7	0,98

\*Ensaio executado em amostra reconstituída

### 10.1.1.

#### Curvas tensão-deformação e trajetórias de tensões

##### i. Comportamento tensão-deformação

Na Figura 203 são mostradas as curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  e  $\Delta u \times \epsilon_a$  para todos os ensaios CIU executados com o solo DC02 para  $\sigma'_c = 25$  kPa. Independentemente da técnica de saturação empregada, os corpos de prova de amostras indeformadas romperam mediante a formação de um pico de resistência bem definido para deformações axiais inferiores a 2%. Nestes ensaios, foi observada a formação de um plano preferencial de ruptura, característico de ruptura frágil. O excesso de poropressão gerado ao final do ensaio foi negativo, com a máxima taxa negativa de geração ocorrendo após o pico de resistência, diferentemente de solos sedimentares pré-adensados, que possuem estes pontos aproximadamente coincidentes. Este padrão de comportamento está de acordo com o de solos com estrutura cimentada

estabelecido por Leroueil e Vaughan (1990) e fortemente estruturado de acordo com a definição de Cuccovillo e Coop (1999).

A influência da estrutura deste solo no seu comportamento mecânico fica ainda mais evidente ao se comparar as curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  dos ensaios executados em amostras indeformadas à correspondente ao material reconstituído com índices físicos equivalentes aos do solo natural, conforme observado na Figura 203a. A rigidez inicial e resistência não-drenada do ensaio IE-DC02-25R são significativamente inferiores às das amostras indeformadas. Além disso, não há indicação de pico de resistência, apesar de uma leve tendência de formação de plano ter sido observada no corpo de prova reconstituído, o que justifica a tendência de geração de poropressão negativa neste ensaio realizado a baixos níveis de tensão efetiva em uma amostra *compactada*.

Ao comparar as curvas tensão-deformação obtidas pelas diferentes técnicas de saturação indicadas na Figura 203, tem-se que os ensaios executados com aumento da contrapressão em etapas, seja de forma contínua ou em estágios (SIA-DC02-25, IA-DC02-25, IE-DC02-25), apresentam resistência não-drenada superior a 230 kPa, enquanto o ensaio executado com incremento único de contrapressão, IU-DC02-25, atinge apenas 188,5 kPa.

Ao se analisar o comportamento do solo em termos de tensão efetiva através da variação da razão das tensões efetivas principais, Figura 204, nota-se que as curvas relacionadas às amostras indeformadas possuem um pico que coincide com o de máxima tensão desviadora. Após este ponto, todas as curvas convergem para a curva do material reconstituído indicando a forte influência da estrutura cimentada no comportamento do solo.

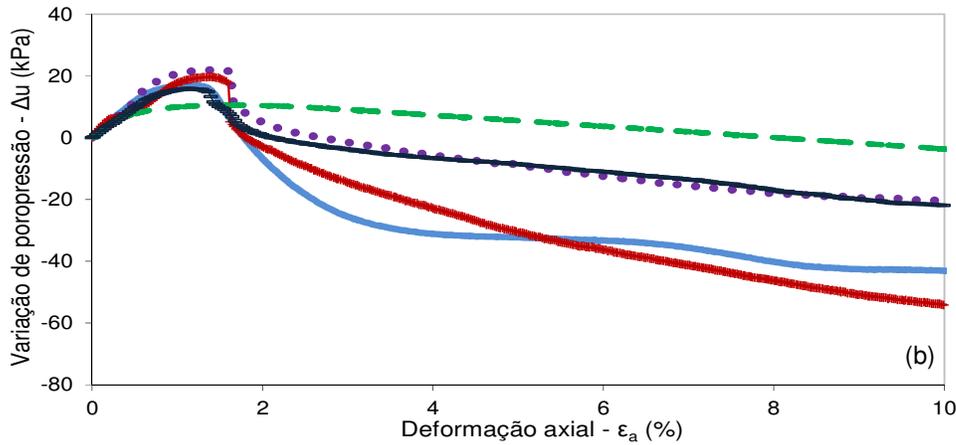
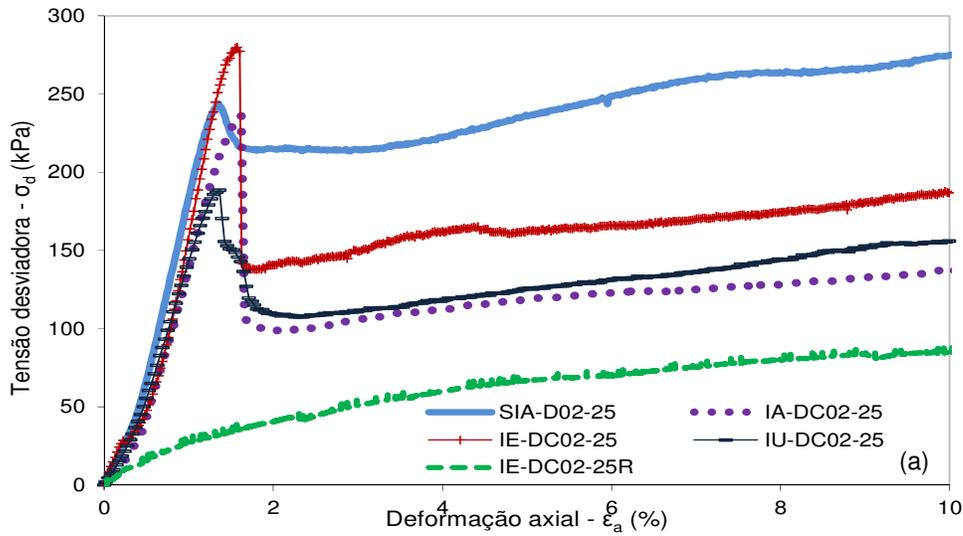


Figura 203 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados na Tabela 47.

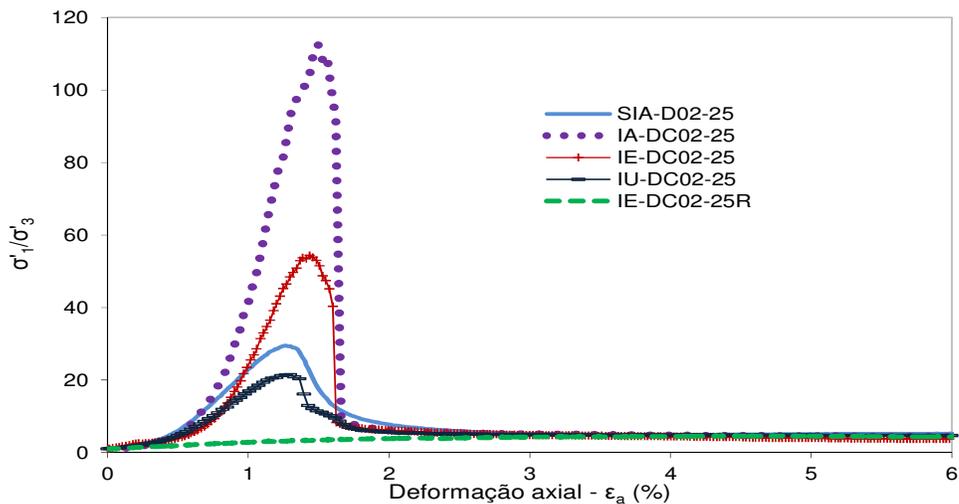


Figura 204 – Variação da razão das tensões efetivas principais dos ensaios executados com  $\sigma'_c = 25$  kPa para diferentes métodos de saturação (solo DC02).

## ii. Módulo de deformação

Os módulos de deformação secante equivalentes a 50% da máxima tensão desviadora dos ensaios em amostras indeformadas, apresentados na Tabela 59, são cerca de sete vezes maiores que o módulo do ensaio executado com o material reconstituído com o mesmo índice de vazios inicial.

Dentre os ensaios executados com amostras indeformadas, os realizados com os métodos de saturação SIA-DC02-25 e IU-DC02-25 possuem o maior e menor módulo de deformação, respectivamente, embora os valores de todos os ensaios sejam próximos.

Tabela 59 - Módulos de deformação para os ensaios executados com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa no solo residual DC02.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)
IE-DC02-25	15,18
IA-DC02-25	13,17
IU-DC02-25	12,92
SIA-DC02-25	16,35
IE-DC02-25R	1,77

## iii. Trajetórias de tensões

As curvas tensão-deformação dos ensaios em amostras indeformadas apresentaram uma queda abrupta de resistência após a ruptura. Segundo Leroueil e Hight (2003), este tipo de ruptura faz com que a resistência pós-pico se aproxime ou coincida com o estado crítico.

São apresentadas na Figura 205 as trajetórias de tensões dos ensaios CIU em amostras indeformadas até valores de  $s'$  e  $t$  obtidos para deformações axiais de cerca de 4 %, ou seja, aproximadamente 2% após a formação do pico. Para o solo reconstituído (amostra IE-DC02-25R), os resultados são apresentados até a deformação máxima atingida, 16%, onde se observa a estabilização da poropressão e da tensão desviadora.

As trajetórias de tensões dos ensaios executados com amostras indeformadas caminham para a direita até a máxima tensão desviadora, acima, provavelmente, da envoltória de resistência última para, então, apresentarem uma queda abrupta nos valores de  $s'$  e  $t$ . Em seguida, as mesmas seguem rumo à envoltória de resistência última devido à geração negativa de poropressão. Dentre os ensaios realizados com amostras indeformadas, o ensaio IU-DC02-25 é o que apresenta menor valor de  $t$ . Ao contrário dos ensaios em amostras indeformadas, a trajetória do ensaio IE-DC02-25R apresenta o maior valor de  $t$

ao atingir a condição última, sem apresentar alteração na direção da trajetória de tensões.

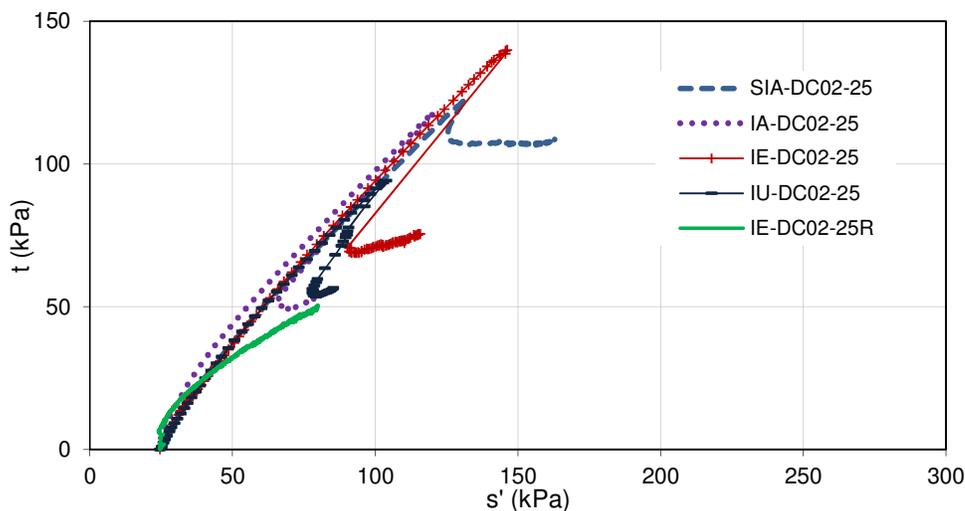


Figura 205 – Trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados no solo DC02 com tensão efetiva de 25 kPa, saturados seguindo os procedimentos apresentados na Tabela 47.

### 10.1.2.

#### Medida de variação de volume total durante o processo de saturação

A medida de variação de volume total durante o processo de saturação dos ensaios CIU executados com diferentes técnicas de saturação e com  $\sigma'_c = 25$  kPa em amostras indeformadas foi efetuada seguindo a metodologia estabelecida no capítulo 8.

No gráfico da Figura 206 constam as curvas de variação de volume total (VVT) e do medidor de variação de volume (MVV) em função da tensão confinante dos ensaios IE-DC02-25, IA-DC02-25, IU-DC02-25 e SIA-DC02-25. A variação de volume total, a registrada pelo medidor de variação de volume, assim como o aumento da tensão confinante com o tempo, são apresentadas nas Figuras 207 a 210 por metodologia de saturação. O resumo dos dados referentes à variação de volume total e a registrada pelo medidor de variação de volume durante a fase de saturação e adensamento são apresentados na Tabela 60.

A curva variação de volume total dos ensaios IE-DC02-25 e IA-DC02-25, executados sem percolação prévia de água, apresentam comportamento semelhante, como indicado na Figura 207. Nestes ensaios, até a tensão confinante de 300 kPa, tem-se um indicativo de contração do corpo de prova,

creditado à compressão de bolhas de ar aprisionadas entre a membrana e o corpo de prova e/ou ao *top cap* e a pedra porosa, alguma bolha de ar remanescente na câmara interna, além de um possível dano à estrutura do solo devido ao processo de saturação. Entre esta tensão e 500 kPa, os corpos de prova apresentam um comportamento expansivo desencadeado pela diminuição da tensão efetiva devido ao aumento do grau de saturação. Acredita-se estar envolvida neste processo, em particular e de forma principal, a dissolução do ar na água. A partir de 500 kPa não se observa mais variação de volume associado ao corpo de prova, assim como a entrada de água pelo MVV tende a cessar, indicando a saturação, comprovada também por um pequeno aumento não-drenado de tensão confinante que indicou um parâmetro B de Skempton superior a 0,96 em ambos os ensaios. Este acréscimo de tensão confinante não gerou variação de volume total dos corpos de prova, corroborando para a constatação da saturação dos mesmos. As variações de volume e da tensão confinante em função do tempo destes ensaios, Figuras 207 e 208, também permitem observar o comportamento descrito.

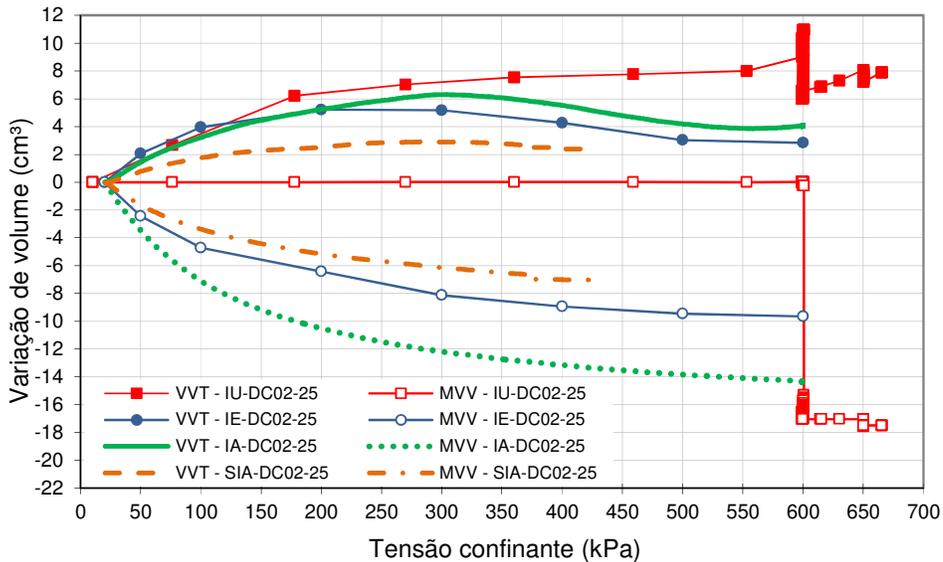


Figura 206 – Variação de volume total (VVT) e do volume de água do medidor de variação de volume (MVV) em função da tensão confinante durante a saturação por diferentes métodos do solo DC02 para  $\sigma'_{c} = 25\text{kPa}$ . IE: incremento de contrapressão em estágios; IU: incremento único de contrapressão, IA: incremento automático de contrapressão; SIA: percolação de água (sucção) e incremento contínuo de contrapressão.

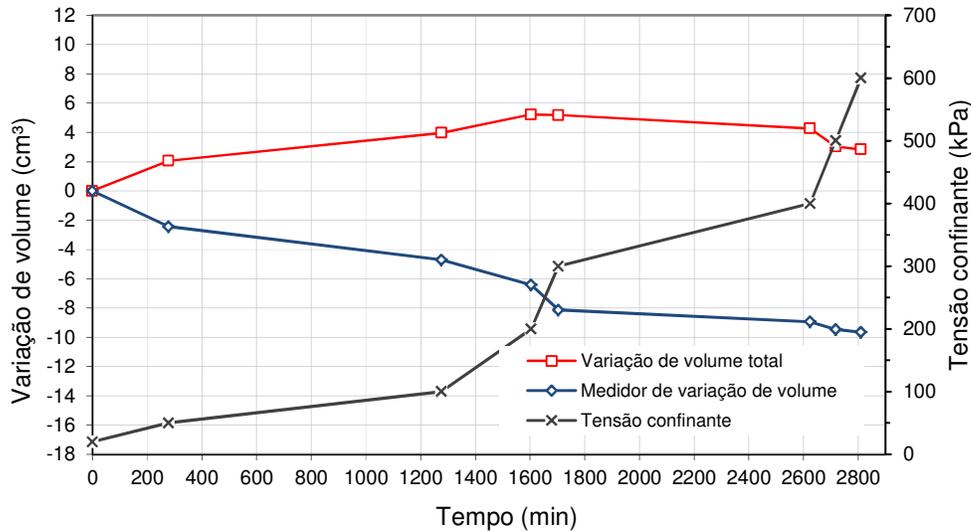


Figura 207 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IE-DC02-25.

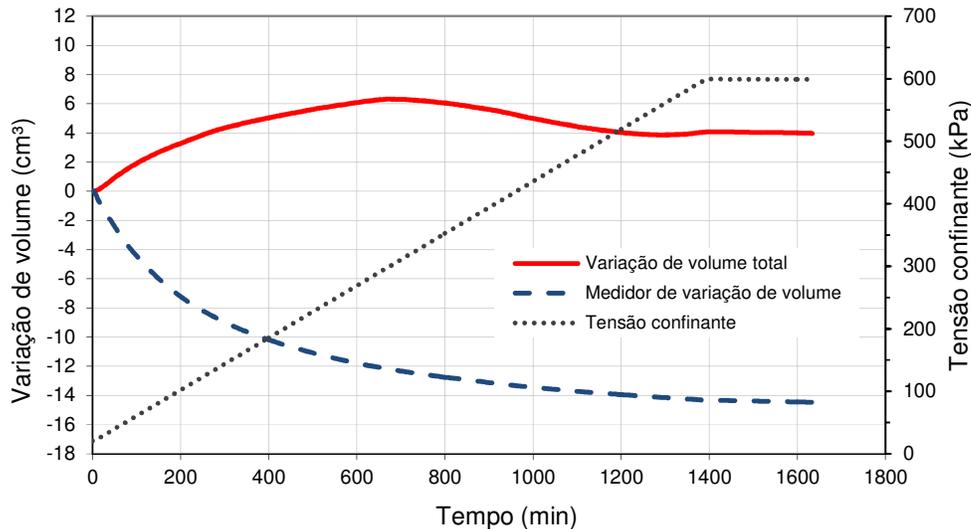


Figura 208 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IA-DC02-25.

A variação de volume total ao final da saturação nos ensaios IE-DC02-25 e IA-DC02-25 foi, respectivamente, de 2,83 cm<sup>3</sup> e 4,00 cm<sup>3</sup>, como consta na Tabela 60. Se esta diminuição de volume for atribuída apenas à compressão na direção radial, ou seja, considerando que a altura do corpo de prova permanece a mesma durante o processo de saturação, ter-se-ia uma redução de apenas 0,6 mm e 1 mm no diâmetro. Vale ressaltar que, nestes valores, ainda estão embutidas eventuais influências da compressão do ar aprisionado e um efeito potencialmente mínimo de penetração da membrana dentre outros fatores desprezados.

A curva de VVT do ensaio SIA-DC02-25 tem um formato similar a dos ensaios IE-DC02-25 e IA-DC02-25. No entanto, o volume equivalente ao maior registro de contração do corpo de prova é quase a metade do correspondente ao ensaio IE-DC02-25. Tal diferença é ocasionada pelo aumento do grau de saturação inicial e minimização do volume de ar entre a membrana e o corpo de prova devido à percolação de água realizada no início do ensaio. A partir de 300 kPa, nota-se uma leve indicação de expansão desencadeada pela redução da tensão efetiva com o aumento gradual do grau de saturação, mas não tão expressiva como nos outros dois ensaios mencionados por causa da menor quantidade de ar a ser dissolvido e maior grau de saturação do corpo ao se iniciar o aumento de contrapressão. A medida de VVT e a entrada de água no corpo de prova tendem a estabilizar após a tensão de 370 kPa, indicando a saturação (Figura 207 e Figura 209). Esta tensão é inferior à necessária para garantir a saturação sem percolação prévia, como esperado, devido ao aumento do grau de saturação no início do ensaio. Um pequeno acréscimo não-drenado de tensão confinante também foi realizado para medir o parâmetro B e ajuste posterior das tensões da fase de adensamento. O valor do parâmetro B obtido foi de 0,97 e não houve variação de volume total devido ao aumento de tensão confinante. A VVT ao final da etapa de saturação do ensaio SIA-DC02-25 foi de 2,77 cm<sup>3</sup>, equivalente a uma diminuição de 0,5 mm de diâmetro, caso seja considerado que não houve variação de altura do corpo de prova. O volume de ar aprisionado também está embtido neste valor.

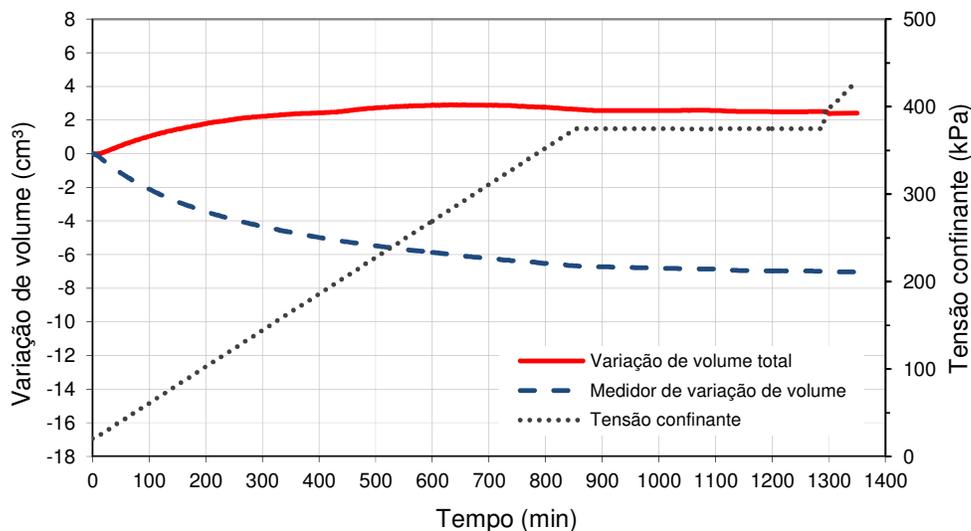


Figura 209 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio SIA-DC02-25.

O ensaio realizado com um único aumento de contrapressão, IU-DC02-25, apresenta uma variação de volume superior aos demais. O acréscimo rápido não drenado de tensão confinante para 600 kPa fez com que ocorresse a compressão de bolhas de ar aprisionadas, e, possivelmente, dano à estrutura do solo. Após a abertura das drenagens, com a contrapressão ajustada em 590 kPa, tem-se a entrada instantânea de um grande volume de água no corpo de prova acompanhada de um indicativo de expansão ocasionada pela diminuição da tensão efetiva e da dissolução das bolhas de ar. Este comportamento é melhor visualizado no gráfico de variação de volume em função do tempo apresentado na Figura 210. Após esperar cerca de 24 horas para que o ar no corpo de prova fosse dissolvido e detectar a estabilização do MVV, um aumento não drenado de tensão confinante foi realizado para verificar a saturação do corpo de prova. Entretanto, um indicativo de compressão foi observado e o parâmetro B medido encontrava-se abaixo de 0,96. Desta forma, este novo estado de tensões foi mantido até a entrada de água no corpo de prova cessar. Mais um aumento de tensão confinante foi feito, mas não houve VVT e o parâmetro B encontrava-se acima de 0,96, indicando desta vez a saturação do corpo de prova. A variação de volume total ao final da etapa de saturação foi de 6,55 cm<sup>3</sup>, que equivale a uma diminuição diametral de 1,5 mm. Esta variação é mais que o dobro das observadas pelas demais técnicas (IA, IE e SIA), indicando que tal procedimento afeta a estrutura do solo. Tal observação é compatível com o comportamento tensão-deformação observado, onde o ensaio IU-DC02-25 apresenta menor resistência não drenada, assim como um valor máximo de  $s'$  e  $t$  na trajetória de tensão significativamente inferior aos dos demais ensaios. Relaciona-se este comportamento à elevada tensão líquida a que partes do corpo de prova, principalmente sua região central, é submetida devido ao aumento não drenado de tensão confinante durante o processo de saturação por este método.

A seguir são apresentados os resultados de ensaios executados pelos métodos de saturação SIA, IE e IU com tensões efetivas de adensamento superior a 25 kPa. O método IA não foi testado para maiores tensões efetivas de adensamento devido à similaridade do comportamento do ensaio IA-DC02-25 com os realizados com as técnicas de saturação SIA e IE.

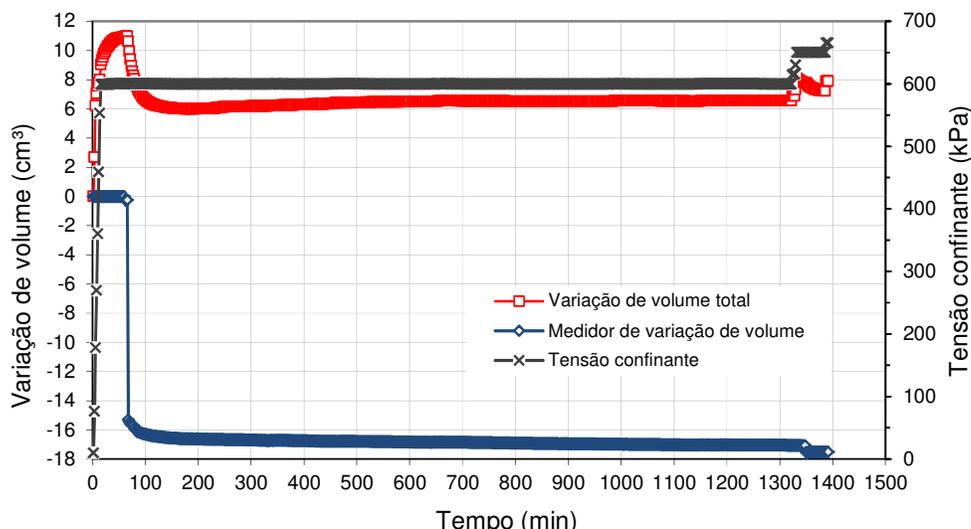


Figura 210 – Variação do volume total, variação do volume de água do medidor (MVV) e da tensão confinante ao longo do processo de saturação do ensaio IU-DC02-25.

Tabela 60 – Variação de volume durante a saturação e adensamento dos ensaios no solo DC02 com  $\sigma'_c = 25$  kPa e medida de variação de volume total.

Ensaio	Variação de volume durante o processo de saturação (cm³)		Variação de volume total durante a percolação (cm³)	Variação de volume durante o adensamento (cm³)	B
	VVT*	MVV**			
IE-DC02-25	2,83	-9,66	-	0,62	0,98
IA-DC02-25	4,00	-14,45	-	0,41	0,97
SIA-DC02-25	2,50	-7,02	0,27	0,65	0,97
IU-DC02-25	6,55	-17,50	-	1,10	0,97
IE-DC02-25R	-	-	-	1,27	0,98

\* VVT = variação de volume total (sinal positivo compressão do solo); \*\* MVV = variação de volume de água do medidor de variação de volume (sinal negativo indica entrada de água no corpo de prova).

### 10.1.3.

#### Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento IE – solo DC02.

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios CIU executados com a metodologia de saturação IE com as tensões efetivas de adensamento de 75, 150, 300 e 500 kPa. Na Tabela 61 constam os dados referentes aos corpos de prova.

Tabela 61 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento IE .

Ensaio	$\sigma'_c$ (kPa)	$w_o$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m³)	$\gamma_d$ (kN/m³)	$e_o$	$e_{adens}$	$n$ (%)	$S_o$ (%)	B
IE-DC02-75	75	33,42	47,74	15,84	11,87	1,38	1,36	58,0	69,8	0,97
IE-DC02-150	150	34,43	44,84	15,61	11,61	1,43	1,39	58,9	69,3	0,97
IE-DC02-300	300	29,6	61,8	15,37	11,86	1,38	1,29	58,0	61,8	0,98
IE-DC02-500	500	21,40	32,98	15,37	12,66	1,23	1,14	55,1	49,2	0,96

### **i. Comportamento tensão-deformação**

Na Figura 211 são apresentadas as curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  e  $\Delta u \times \epsilon_a$ , onde também estão inseridas as curvas do ensaio IE-DC02-25. As máximas tensões desviadoras alcançadas nos ensaios com tensões efetivas entre 75 e 300 kPa são próximas. O excesso de poropressão gerado aumenta de acordo com a tensão efetiva de adensamento.

Analisando os ensaios individualmente, tem-se que no ensaio IE-DC02-75, um pico de resistência precede a máxima taxa de geração negativa de poropressão, que ocorre devido ao colapso da estrutura do solo por cisalhamento. Este mesmo comportamento foi observado no ensaio IE-DC02-25.

No ensaio IE-DC02-150, a máxima tensão desviadora é mantida até  $\epsilon_a=2,1$  %, quando ocorre uma queda abrupta da resistência não-drenada. A máxima taxa de geração negativa de poropressão coincide com o trecho em que a máxima tensão desviadora é sustentada. Este comportamento poderia ser descrito como de transição entre o estabelecido por Leroueil e Vaughan (1990) para solos com estrutura cimentada quando submetidos a baixos níveis de tensão efetiva e para um intervalo intermediário.

Nos ensaios IE-DC02-300 e IE-DC02-500 o solo apresenta comportamento *strain-softening* associado à geração positiva de poropressão, similar ao descrito por Leroueil e Vaughan (1990) para um nível intermediário de tensão efetiva de um solo com estrutura cimentada.

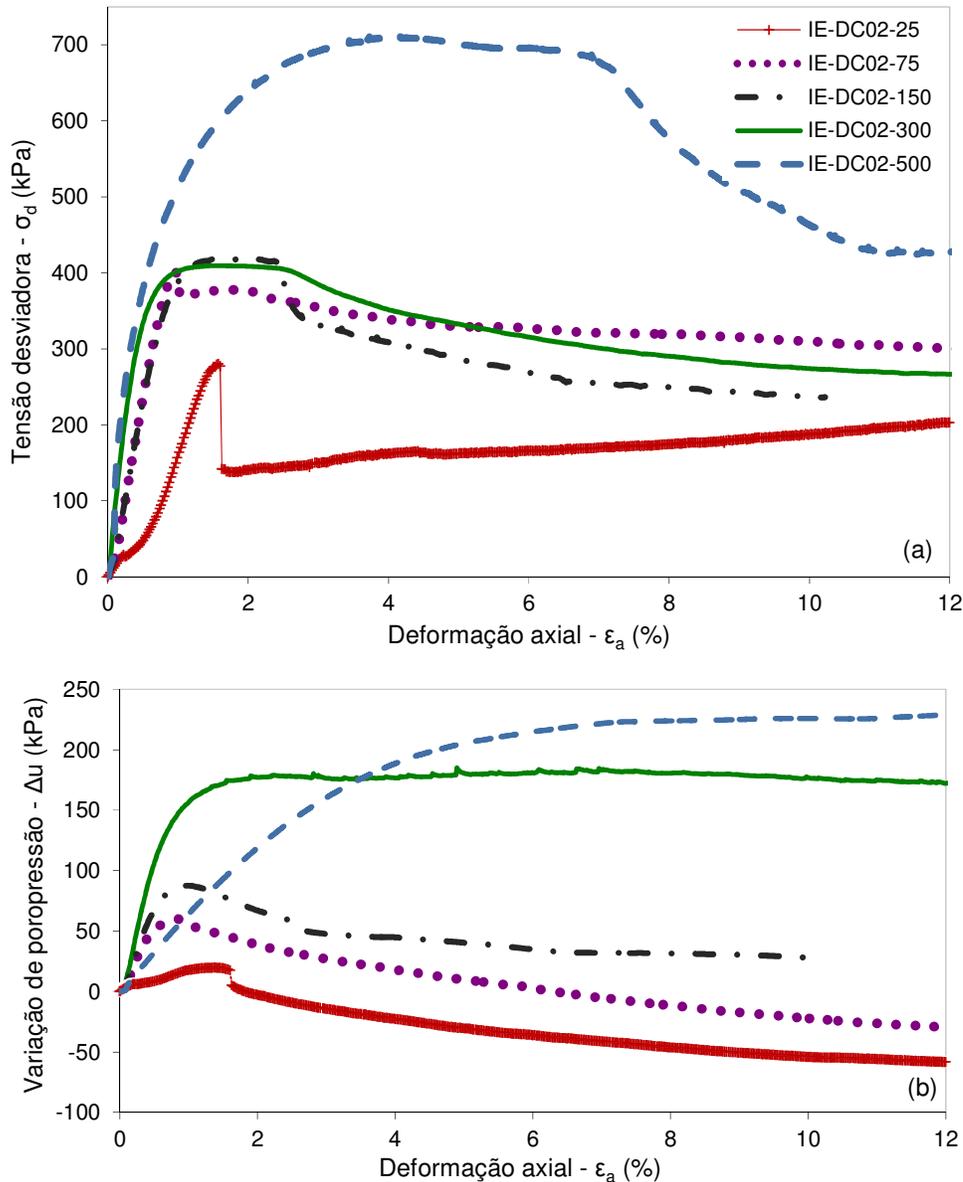


Figura 211 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IE-DC02.

Ao normalizar a tensão desviadora pela tensão efetiva de adensamento, tem-se que os maiores valores desta razão são alcançados nos ensaios executados com menor tensão efetiva (Figura 212). O aumento da tensão efetiva de adensamento resulta na diminuição da influência da estrutura do solo e na maior interferência desta tensão em seu comportamento mecânico, com as curvas  $\sigma_d/\sigma'_c \times \epsilon_a$  correspondentes aos ensaios com  $\sigma'_c = 300$  e  $500$  kPa sendo quase coincidentes. Tal aspecto fica ainda mais evidente ao se plotar a razão

das tensões efetivas principais em função da deformação axial, como será mostrado adiante.

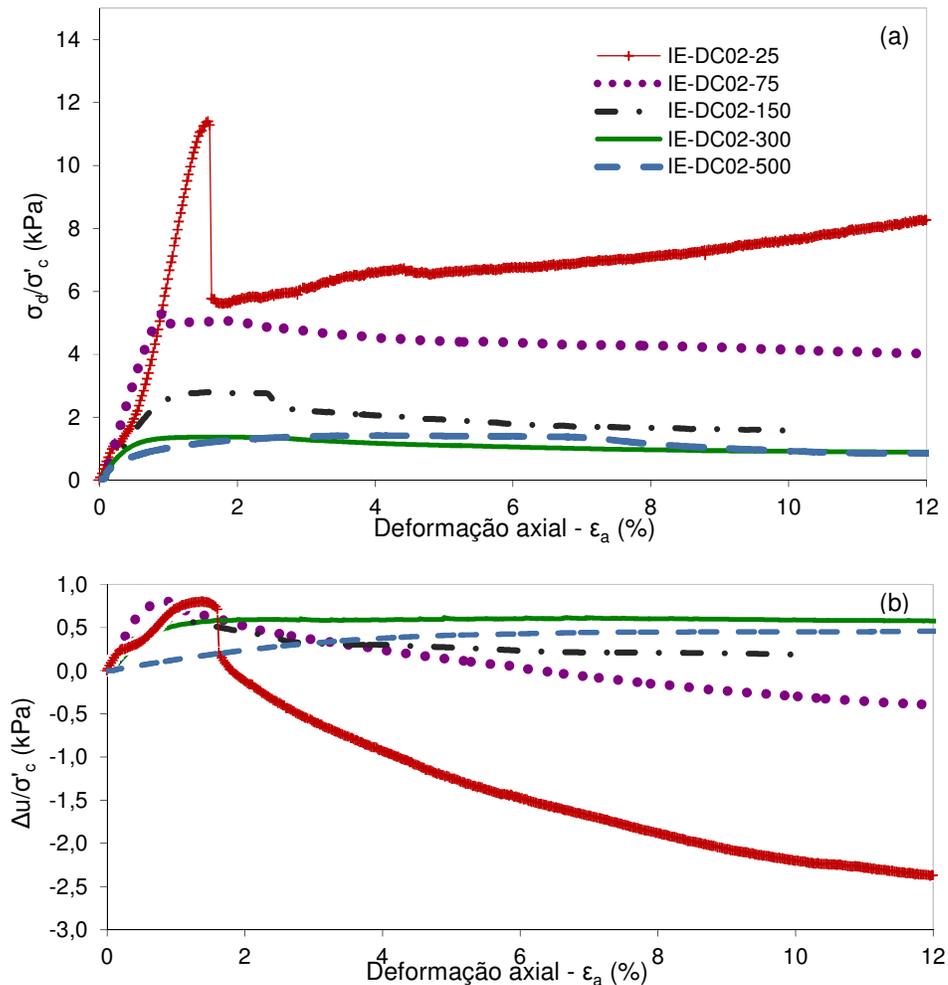


Figura 212 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o método IE.

## ii. Módulo de deformação

O módulo de deformação secante correspondente a 50% da máxima tensão desviadora e o mesmo normalizado pela tensão efetiva de adensamento dos ensaios IE-DC02 constam na Tabela 59. Os ensaios realizados com as tensões efetivas de 75 e 150 KPa apresentam o mesmo módulo  $E_{s50\%}$ . Também possuem os módulos coincidentes os ensaios IE-DC02-300 e IE-DC02-500. O módulo de deformação normalizado tende a diminuir com o aumento da tensão efetiva de adensamento. Espera-se que quando a total desestruturação da amostra ocorrer durante a fase de adensamento, o módulo normalizado seja praticamente constante.

Tabela 62 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IE no solo residual DC02.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)	$E_{s50\%}/\sigma'_c$
IE-DC02-25	15,18	610
IE-DC02-75	46,43	620
IE-DC02-150	46,37	310
IE-DC02-300	84,27	282
IE-DC02-500	83,00	166

### iii. Trajetórias de tensão e resistência

As trajetórias de tensões referentes aos ensaios saturados pelo método IE constam na Figura 213. As referentes aos ensaios executados com  $\sigma'_c = 25, 75$  e 150 kPa seguem para a direita. Após a máxima tensão desviadora ser alcançada, tem-se uma queda acentuada nos valores de  $t$ , indicando que a ruptura ocorreu acima da envoltória de resistência última. Tal comportamento é típico de solos com cimentação cuja tensão efetiva imposta não foi suficiente para desencadear a plastificação completa da estrutura cimentada ainda na fase de adensamento.

Quanto aos ensaios IE-DC02-300 e IE-DC02-500, embora haja uma inclinação acentuada em suas trajetórias para a direita, próximo à ruptura estas se curvam para a esquerda em função da geração contínua de excesso de poropressão positiva. No caso do ensaio IE-DC02-300, o mesmo deve, assim como os ensaios executados para tensões inferiores, ultrapassar a envoltória de resistência última e tender a esta após a ruptura.

A tensão de cedência adotada para análise dos ensaios triaxiais foi baseada no ensaio de adensamento edométrico (600 kPa), tendo em vista que as tensões alcançadas no adensamento isotrópico não foram suficientes para desencadear a plastificação da estrutura cimentada do solo. Além disso, as curvas e  $x \log \sigma'_v$  eram praticamente coincidentes, sendo considerado razoável assumir este valor. No entanto, esta tensão não deve ser tomada como valor único, pois representa, na verdade, uma região de plastificação. Apesar de diferentes tensões efetivas de adensamento terem sido empregadas nos ensaios IE-DC02-75, IE-DC02-150 e IE-DC02-300, o máximo valor de  $t$  gira em torno de 200 kPa nestes ensaios, indicando a influência da estrutura do solo.

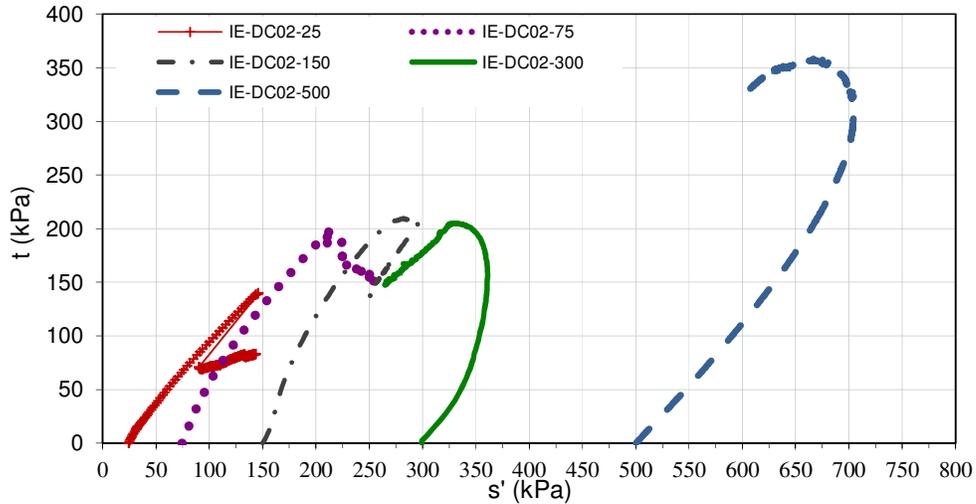


Figura 213 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IE-DC02.

Os critérios de ruptura empregados para determinação da envoltória de resistência são os mesmos do solo residual de Tanguá, sendo os dados apresentados no Anexo I. De forma geral, tem-se que as resistências não drenadas correspondentes aos dois critérios empregados são próximas para todas as tensões efetivas. O parâmetro A de poropressão aumenta com a tensão efetiva de adensamento, chegando a 0,52 no ensaio IE-DC02-500.

Na Figura 214 consta a variação da razão entre as tensões efetivas principais em função da deformação axial. Para a tensão efetiva de 25 kPa, a curva apresenta um pico intenso e bem definido. Com o aumento da tensão efetiva, os picos das curvas ficam menos intensos, até se apresentar suave no ensaio IE-DC02-300 e não ocorrer no ensaio IE-DC02-500. Nos ensaios executados com maior tensão efetiva, as curvas são bastante próximas. Nesta representação fica claro o aumento gradual da influência da tensão efetiva de adensamento no processo de desestruturação do solo.

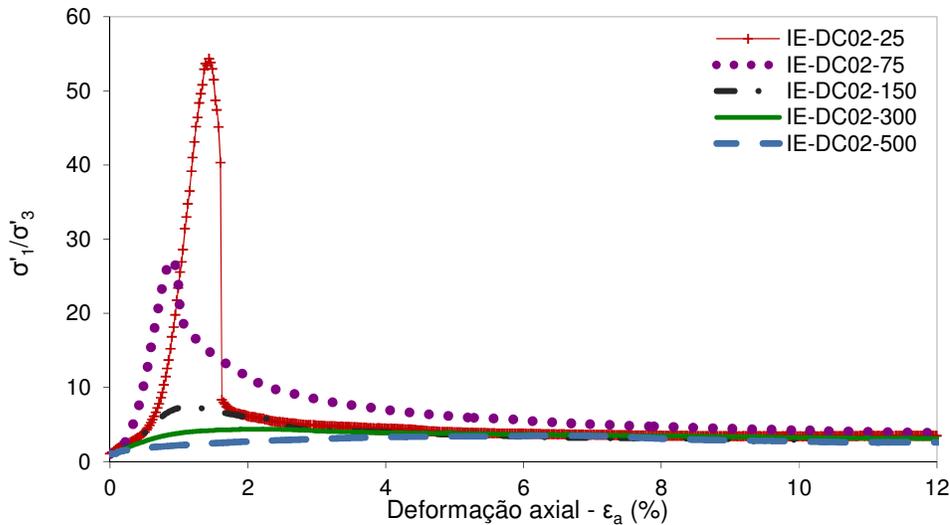


Figura 214 – Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios IE-DC02.

As envoltórias lineares de resistência de ruptura, apresentadas na Figura 215 no plano  $s'$  x  $t$ , foram traçadas considerando os dados dos ensaios executados para tensões efetivas iguais e inferiores a 300 kPa, pois os ensaios executados aplicando os outros métodos de saturação não ultrapassaram tal tensão. No entanto, o caráter não linear da envoltória de resistência para baixos valores de  $\sigma'_c$  devido à presença de cimentação no solo fica evidente na distribuição espacial dos dados referentes à ruptura, sendo também refletido no elevado valor do intercepto coesivo, 105,8 kPa, e no baixo valor do ângulo de atrito, 21,5°.

Denardin (2005) e Futai *et al.* (2007), ao estudarem o comportamento de solos com estrutura cimentada empregando uma faixa mais ampla de tensões efetivas, obtiveram bons resultados ao determinarem uma envoltória de resistência bi-linear. O trecho linear da envoltória determinada por Denardin (2005), correspondente às menores tensões efetivas de adensamento apresenta, assim como o solo DC02, alto valor de  $c'$  (42,3 kPa) e baixo valor de  $\phi'$  (22,3°).

Na Figura 216 é apresentada uma proposta de envoltória não linear considerando que próxima à tensão de cedência do solo e acima desta a resistência de ruptura do solo coincide com a resistência última.

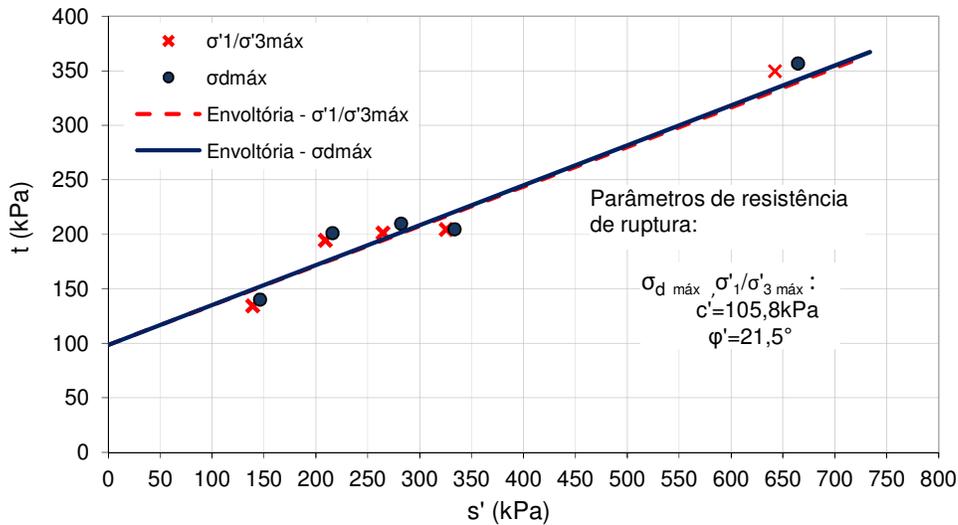


Figura 215 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_3 \text{ máx}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_d \text{ máx}$ ) para os ensaios IE-DC02.

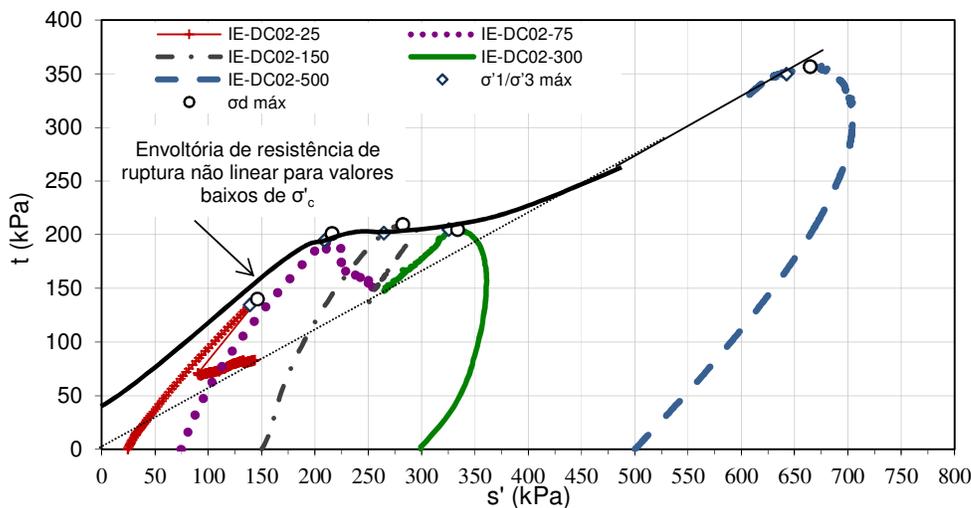


Figura 216 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de  $\sigma'_c$  - IE-DC02.

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

Ao se tentar relacionar o volume específico ( $1+e$ ) com a resistência ao cisalhamento utilizando os dados dos ensaios realizados até 300 kPa de tensão efetiva de adensamento, não se obtém uma relação satisfatória ( $R^2 < 0,12$ ), indicando que outras propriedades da estrutura do solo que não apenas o índice de vazios (e.g. cimentação, distribuição espacial dos grãos) exercem forte influência em seu comportamento para este intervalo de tensões. No entanto, ao

ser adicionado nas análises o ensaio IE-DC02-500, o fator de correlação aumenta consideravelmente (ver Figura 217a). O mesmo é observado quando se tenta correlacionar a tensão efetiva de adensamento com a resistência (Figura 217b). Apenas os dados obtidos com o critério  $\sigma'_1/\sigma'_{3\text{máx}}$  foram utilizados devido à proximidade com os referentes ao critério  $\sigma_{\text{dmáx}}$ .

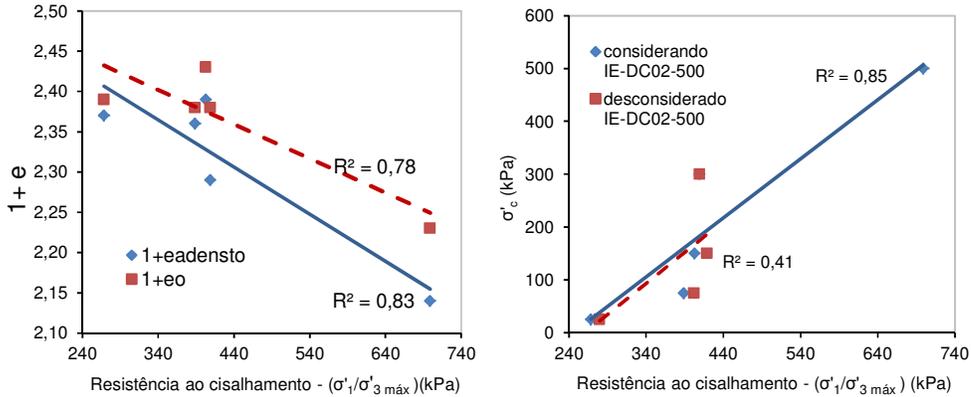


Figura 217 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento considerando o ensaio IE-DC02-500 (a) e entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência ao cisalhamento na ruptura desconsiderando e considerando o ensaio executado com tensão efetiva próxima a de cedência do solo (IE-DC02-500)(b).

#### 10.1.4.

#### Ensaios CIU – corpos de prova saturados com o procedimento SIA – solo DC02.

Os dados dos corpos de prova referentes aos ensaios CIU com tensão efetiva acima de 25 kPa executados aplicando o método de saturação SIA constam na Tabela 63. No início destes ensaios, devido a um problema no motor de passo e/ou válvula responsáveis pela aplicação da pressão na câmara, uma tensão confinante de cerca de 300 kPa foi aplicada de forma não drenada. Para prosseguir o ensaio, a mesma foi reduzida para a tensão referente ao início do ensaio. Como será exposto a seguir, tal evento pode ter influenciado no comportamento mecânico do solo.

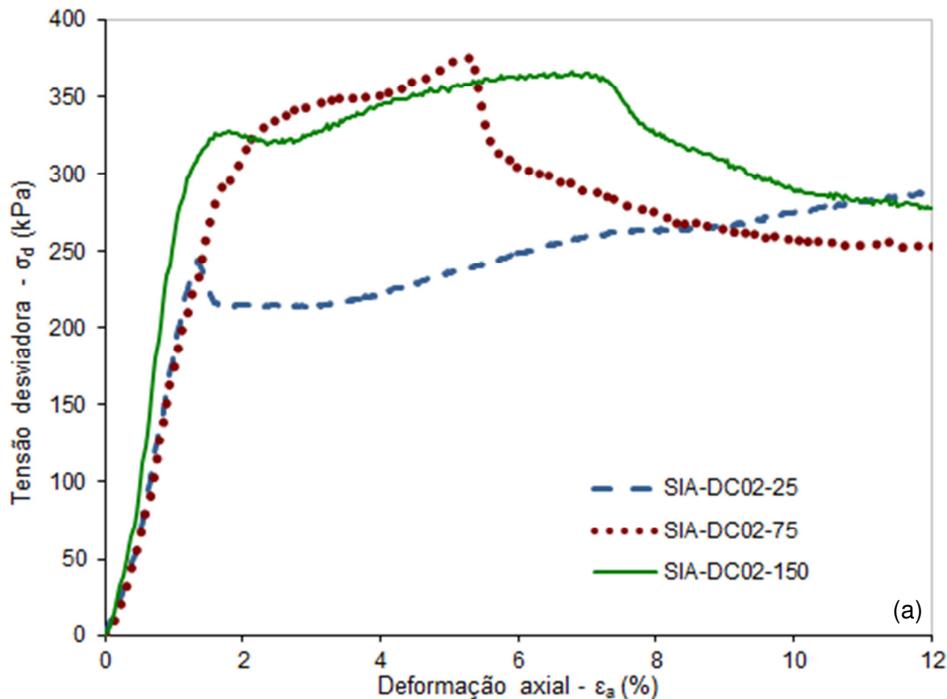
Tabela 63 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento SIA.

Ensaio	$\sigma'_c$ (kPa)	$w_o$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m³)	$\gamma_d$ (kN/m³)	$e_o$	$e_{\text{adens}}$	$n$ (%)	$S_o$ (%)	B
SIA-DC02-75	75	29,05	-	14,85	11,49	1,45	1,43	59,3	57,5	0,97
SIA-DC02-150	150	35,27	45,12	15,81	11,70	1,42	1,37	58,6	71,7	0,96

#### i. Comportamento tensão-deformação

As curvas  $\sigma_d \times \varepsilon_a$  destes, incluindo o ensaio CIU-DC02-25, são apresentados na Figura 218. Na curva  $\sigma_d \times \varepsilon_a$  do ensaio SIA-DC02-75, após a queda acentuada de rigidez, a resistência não-drenada tende a aumentar com a deformação até cair de forma abrupta para  $\varepsilon_a = 5\%$ . Associa-se a este comportamento a maior taxa de geração negativa de poropressão (decréscimo da poropressão positiva).

A curva correspondente ao ensaio SIA-DC02-150 apresenta um pico de resistência para  $\varepsilon_a < 2\%$ , que também está relacionado à maior taxa negativa de geração de poropressão. Após a queda da tensão desviadora, não é observada a geração de excesso de poropressão e a resistência não-drenada tende a aumentar até a deformação axial de 7%. A partir desta deformação, a resistência diminui inicialmente a uma taxa elevada e, em seguida, de forma gradual até atingir um patamar. As tensões desviadoras máximas observadas nas curvas dos ensaios adensados para  $\sigma'_c = 75$  e 150 kPa possuem valores próximos, assim como nos ensaios IE.



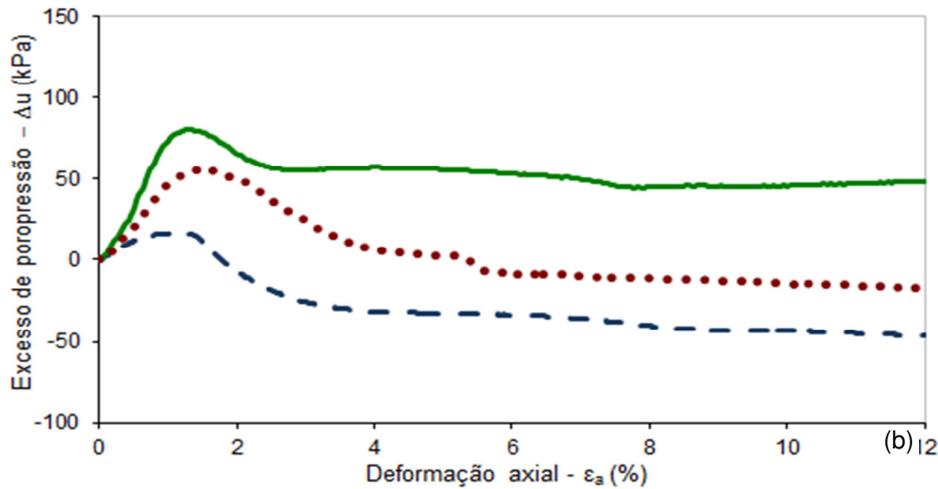


Figura 218 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento SIA-DC02.

Ao normalizar a tensão desviadora pela tensão efetiva de adensamento, a curva correspondente ao ensaio SIA-DC02-25 encontra-se afastada das demais. A estrutura do solo é afetada com o aumento da tensão efetiva de adensamento. Quando ocorre a completa desestruturação do solo devido à magnitude da tensão efetiva, as curvas normalizadas para tensões superiores a esta tenderão a coincidir. Para o nível de tensão efetiva empregado nestes ensaios, inferior a tensão de cedência, não se tem esta convergência de comportamento.

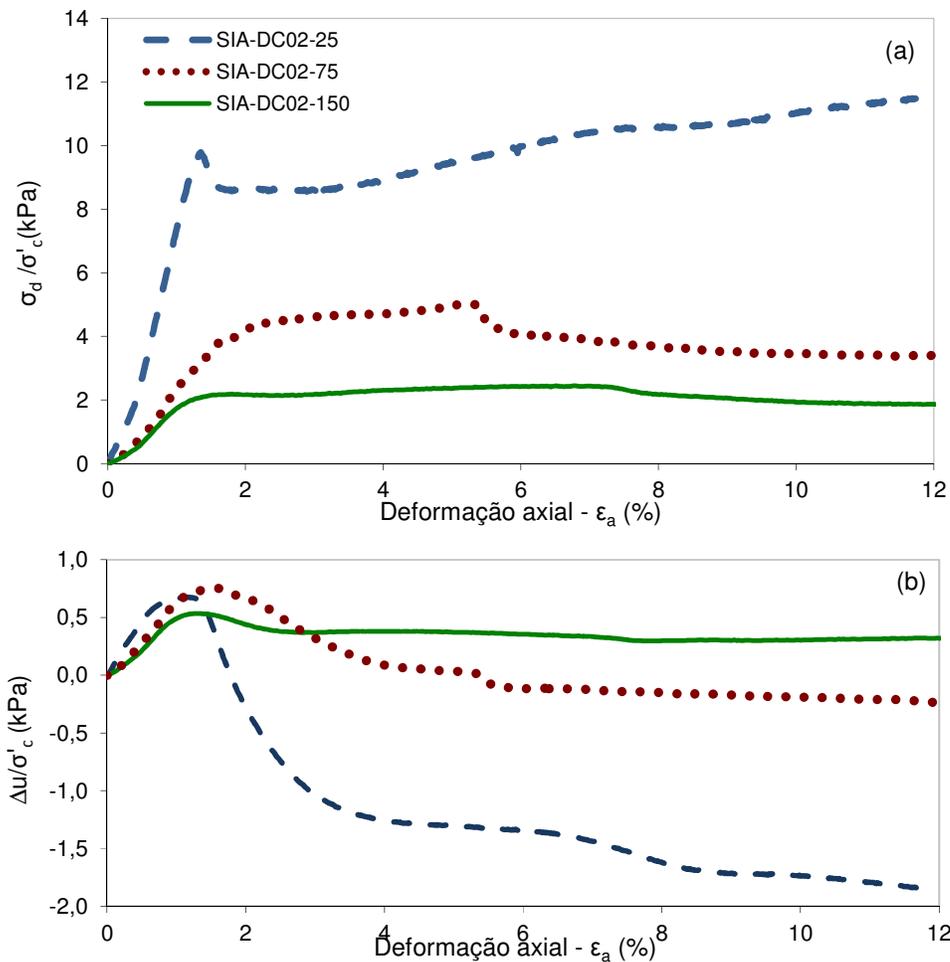


Figura 219 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o método SIA.

## ii. Módulo de deformação

Na

Tabela 64 são apresentados os módulos de deformação secante correspondente a 50% da máxima tensão desviadora e o mesmo normalizado pela tensão efetiva de adensamento dos ensaios SIA-DC02. Os módulos tendem a aumentar com a tensão efetiva. Entretanto, as diferenças não são significativas entre os módulos dos ensaios SIA-DC02-25 e SIA-DC02-75.

Tabela 64 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IE no solo residual DC02.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)	$E_{s50\%}/\sigma'_c$
SIA-DC02-25	16,35	654
SIA-DC02-75	17,65	235
SIA-DC02-150	25,31	162

### iii. Trajetórias de tensão e resistência

As trajetórias de tensões referentes aos ensaios saturados pelo método SIA constam na Figura 220. Todas as trajetórias caminham para a direita e, após atingir o máximo valor de  $t$ , seguem em direção à envoltória de resistência última, não representada neste gráfico. Caso ensaios com tensões de adensamento superiores tivessem sido executados, esperar-se-ia que as trajetórias evoluíssem até seguirem quase que verticalmente para tensões efetivas próximas a de cedência e, para tensões maiores que esta, caminhassem para a esquerda devido ao excesso de poropressão positiva gerado decorrente da completa desestruturação do solo ainda na fase de adensamento.

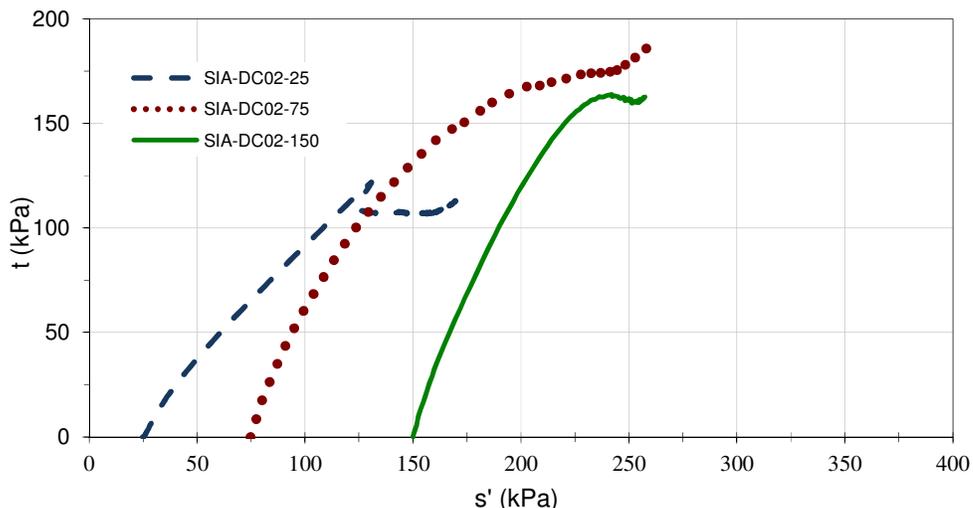


Figura 220 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento SIA-DC02.

As curvas da razão das tensões efetivas principais em função da deformação axial para a determinação da resistência ao cisalhamento na ruptura constam na Figura 221. Todas apresentam pico, sendo menos intenso para a tensão de adensamento maior. Os dados referentes à ruptura são apresentados no Anexo 1. As envoltórias e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb constam no gráfico da Figura 222. Assim como nos ensaios IE, o intercepto coesivo é elevado para os dois critérios de ruptura aplicados e o valor do ângulo de atrito reduzido devido à determinação da envoltória ter sido realizada para baixos valores de  $\sigma'_c$ , onde a estrutura tende a comandar o comportamento mecânico do solo. Uma envoltória não linear é proposta na Figura 225.

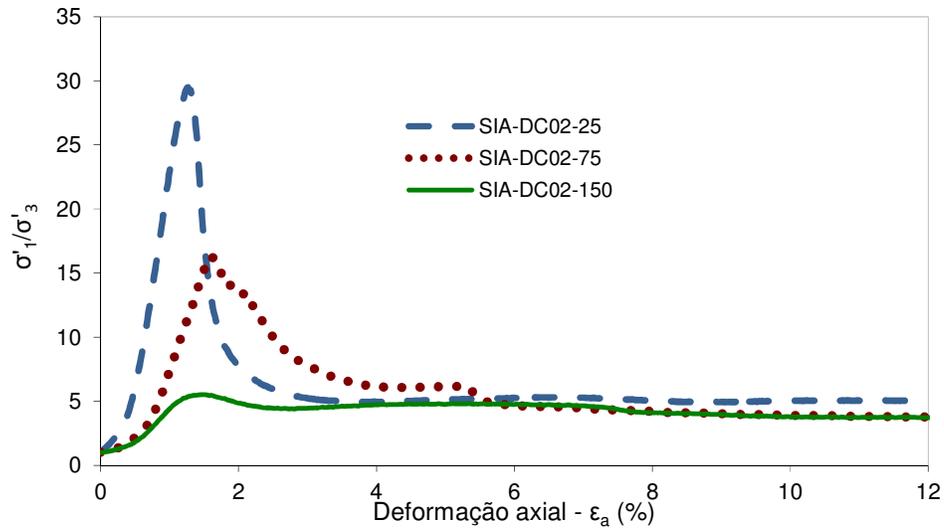


Figura 221 - Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios SIA-DC02.

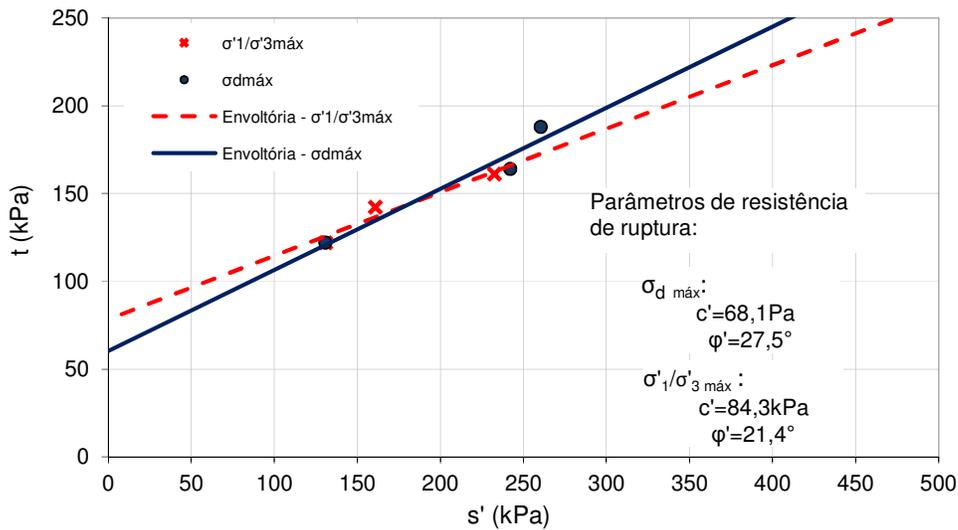


Figura 222 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_3\text{máx}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_{d\text{máx}}$ ) para os ensaios SIA-DC02.

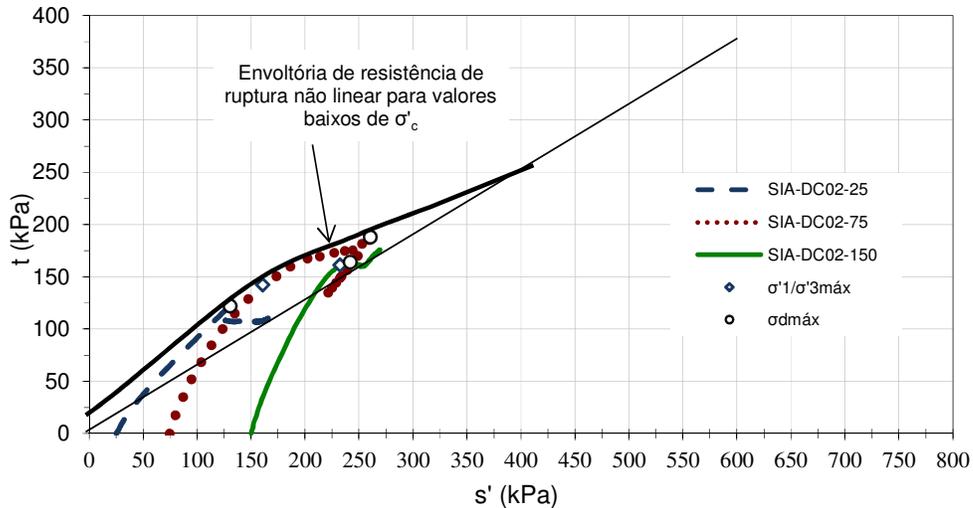


Figura 223 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de  $\sigma'_c$  - SIA-DC02.

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

Na Figura 224 são apresentadas as relações obtidas entre a resistência ao cisalhamento na ruptura de acordo com o critério  $\sigma_{dmáx}$  e o volume específico inicial e após o adensamento. Uma correlação razoável,  $R^2=0,82$ , só é obtida entre o volume específico antes do adensamento. Nenhuma correlação é observada se o critério de ruptura adotado for o de  $\sigma'_1/\sigma'_3 máx$ . Um fator de correlação superior a 0,90 é encontrado ao se tentar relacionar a resistência de ruptura determinada a partir do critério  $\sigma'_1/\sigma'_3 máx$  (Figura 224).

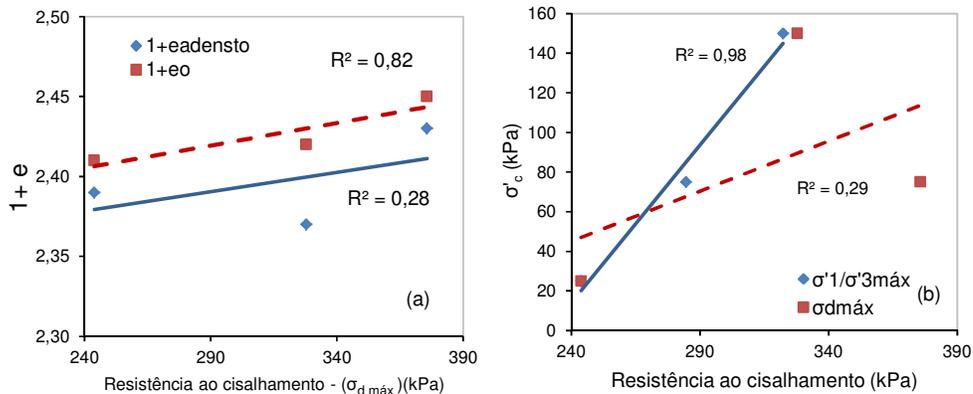


Figura 224 – Correlação entre o volume específico (1+e) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento de acordo com o critério  $\sigma_{dmáx}$  (a) e a entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência ao cisalhamento na ruptura (b).

### 10.1.5.

#### Ensaio CIU – corpos de prova saturados com o procedimento IU – solo DC02.

Os dados referentes aos corpos de prova dos ensaios realizados com as tensões efetivas de 75, 150 e 300 kPa e saturados com incremento único de contrapressão constam na Tabela 65.

Tabela 65 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CIU do solo DC02 saturado com o procedimento IU.

Ensaio	$\sigma'_c$ (kPa)	$w_o$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$e_{adens}$	$n$ (%)	$S_o$ (%)	B
IU-DC02-75	75	36,86	48,24	16,00	11,7	1,41	1,38	58,6	75,1	0,96
IU-DC02-150	150	31,72	44,61	15,93	12,1	1,33	1,25	57,2	68,5	0,98
IU-DC02-300	300	29,65	43,59	15,72	12,13	1,33	1,22	57,1	64,3	0,96

#### i. Comportamento tensão-deformação

Nas curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  dos ensaios IU, apresentadas na Figura 225a, tem-se que a resistência não-drenada aumenta com a tensão de adensamento. A mesma tendência é observada nas curvas  $\Delta u \times \epsilon_a$  (Figura 225b). Os ensaios executados com  $\sigma'_c = 75$  e 150 kPa apresentam resistência de pico ocorrendo simultaneamente com a máxima taxa negativa de geração de poropressão, ao contrário do ensaio executado com 25 kPa de tensão efetiva, onde a máxima taxa negativa de geração de poropressão ocorre após a resistência de pico.

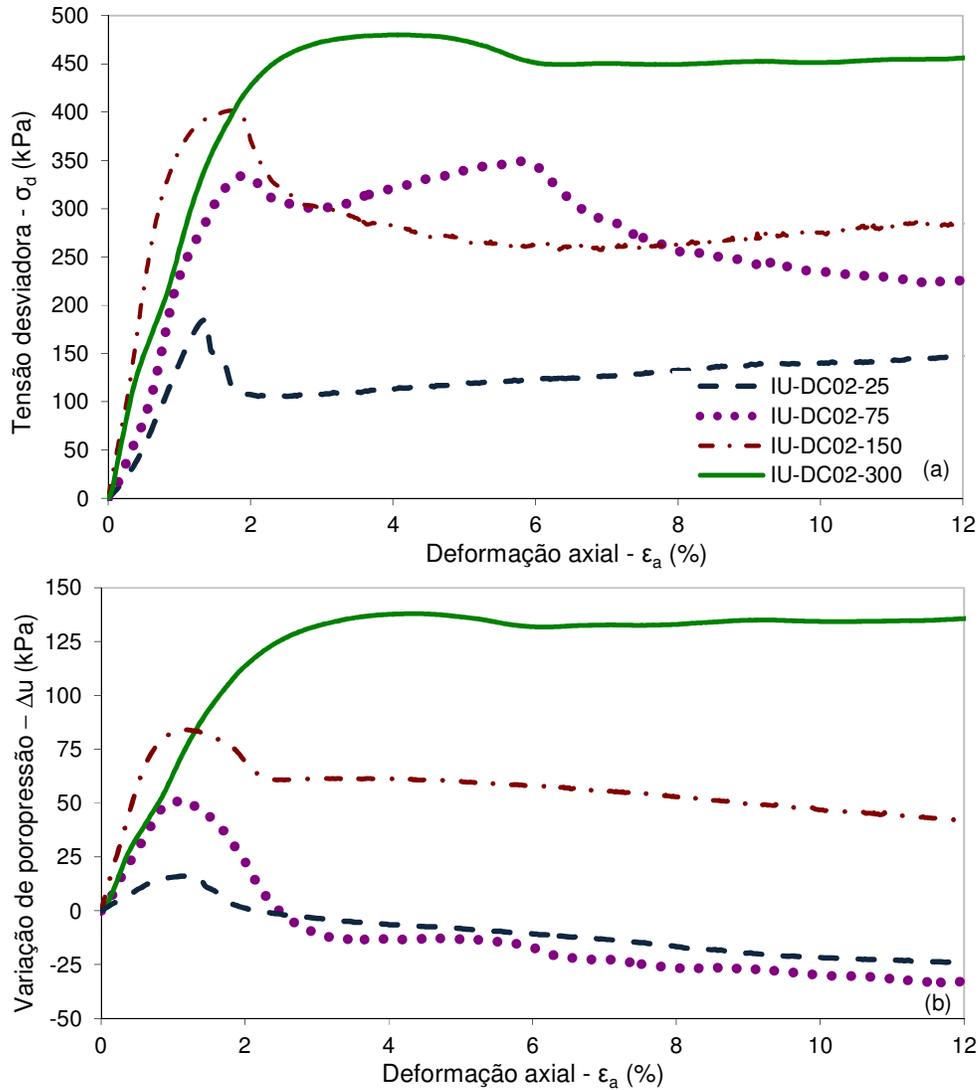


Figura 225 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) variação de poropressão *versus* deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IU.

A tensão desviadora normalizada pela tensão efetiva de adensamento é maior nos ensaios executados com menor tensão efetiva, com a curva  $\sigma_d/\sigma'_c \times \epsilon_a$  dos ensaios IU-DC02-150 e IU-DC02-300 tendendo para um mesmo patamar (Figura 226a). Já a poropressão normalizada não segue um padrão de comportamento de acordo com a tensão efetiva de adensamento.

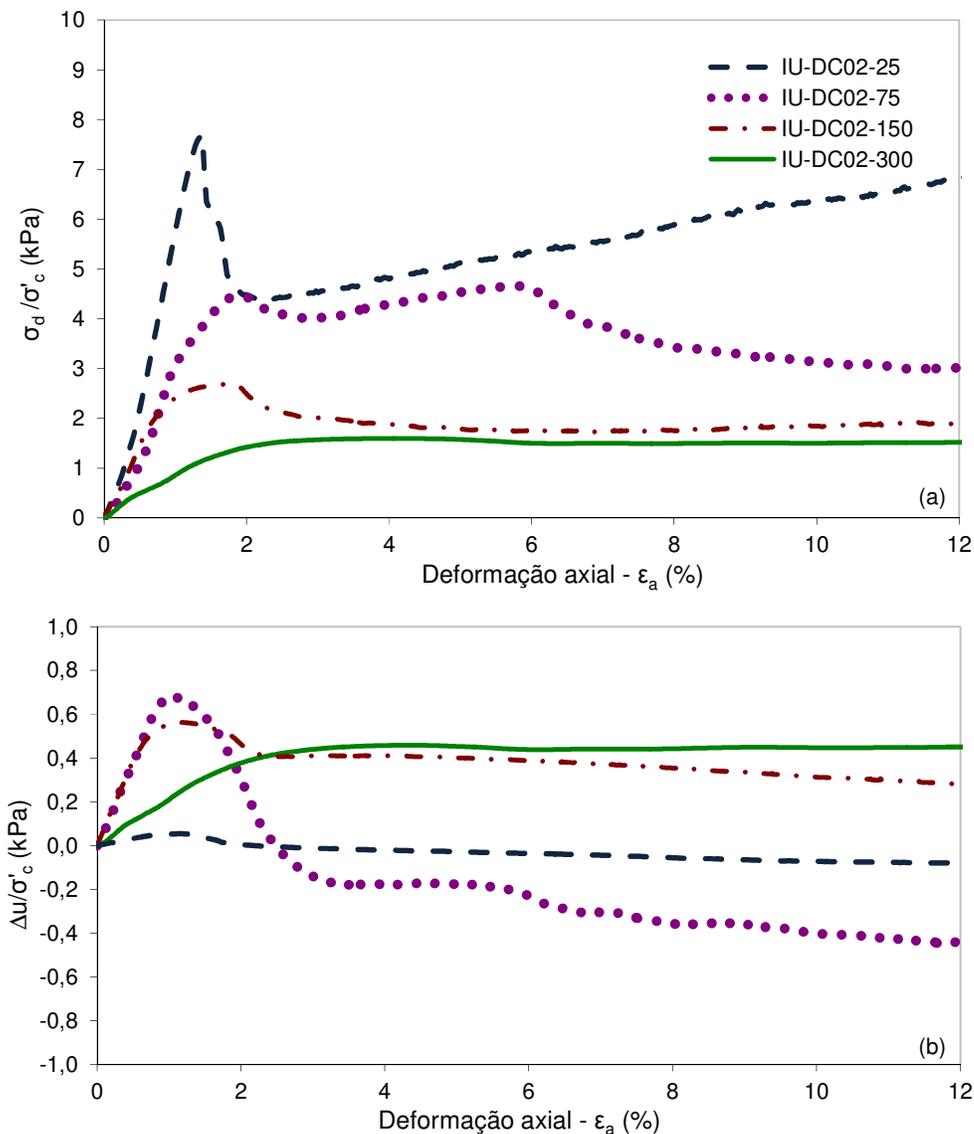


Figura 226 – Curvas (a) tensão desviadora normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial e (b) variação de poropressão normalizada por  $\sigma'_c$  x deformação axial dos ensaios CIU executados no solo DC02 empregando o método IU de saturação.

## ii. Módulo de deformação

Na Tabela 66 são apresentados os módulos de deformação secante correspondente a 50% da máxima tensão desviadora e o mesmo normalizado pela tensão efetiva de adensamento dos ensaios saturados com incremento único de contrapressão. Nota-se uma tendência de aumento do módulo até a tensão efetiva de 150 kPa. Para  $\sigma'_c = 300$  kPa tem-se um decréscimo do módulo para um nível similar ao do ensaio IU-DC02-75. A magnitude do módulo normalizado diminui com a tensão efetiva, sem ser observada estabilização do mesmo no intervalo de tensão testado.

Tabela 66 - Módulos de deformação para os ensaios executados com o método de saturação IU no solo residual DC02.

Ensaio	$E_{s50\%}$ (MPa)	$E_{s50\%}/\sigma'_c$
IU-DC02-25	12,92	516
IU-DC02-75	21,13	281
IU-DC02-150	40,00	267
IU-DC02-300	25,59	85

### iii. Trajetórias de tensão e resistência

As trajetórias de tensões dos ensaios executados com tensão efetiva de adensamento até 150 kPa curvam-se para a direita com a concavidade voltada para baixo, apresentando queda acentuada na magnitude de  $t$  após atingir a máxima tensão desviadora. Embora o ensaio IU-DC02-300 caminhe também para a direita, a mesma possui concavidade para cima. O máximo valor de  $t$  nos ensaios aumenta de acordo com a tensão efetiva de adensamento.

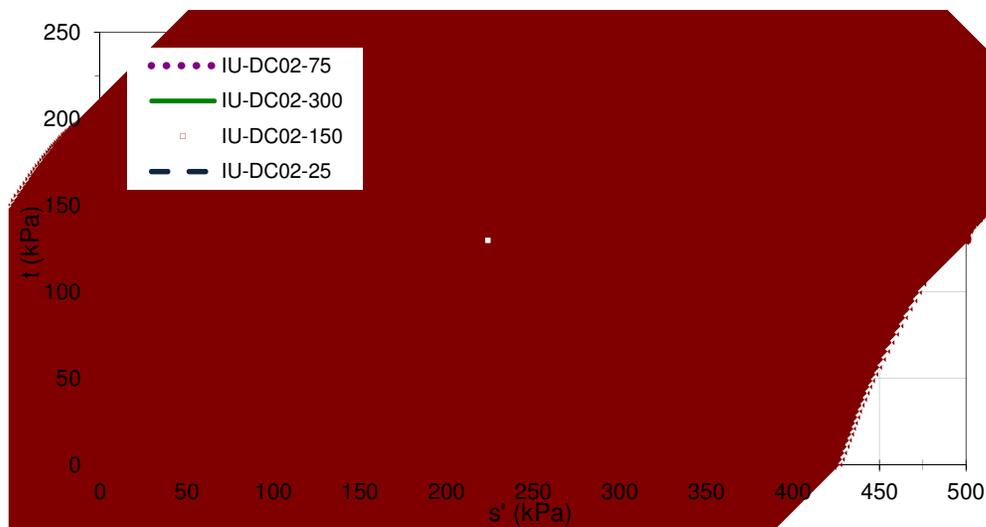


Figura 227 – Trajetórias dos ensaios CIU executados no solo DC02 saturado empregando o procedimento IU-DC02.

Na Figura 228 constam as curvas  $\sigma'_1/\sigma'_3 \times \epsilon_a$ . Os dados referentes à ruptura determinados seguindo os critérios de ruptura  $\sigma'_1/\sigma'_3$  máx e  $\sigma_d$  máx são apresentados no Anexo 1. De forma geral, tem-se que a resistência de ruptura tende a aumentar com a tensão efetiva, assim como o parâmetro A de poropressão.

As envoltórias e os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb são apresentados na Figura 229. Como os valores de  $s'$  e  $t$  obtidos pelos dois critérios adotados são próximos, as envoltórias coincidem. Da mesma forma que

nos ensaios IE e SIA, uma envoltória não linear para baixas tensões é sugerida na Figura 223.

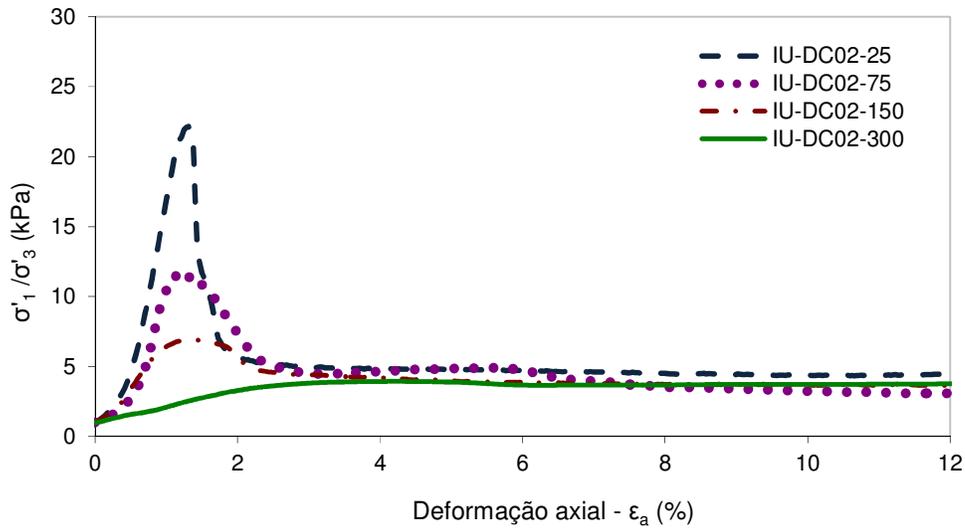


Figura 228 - Curvas da razão das tensões principais efetivas x deformação axial dos ensaios IU-DC02

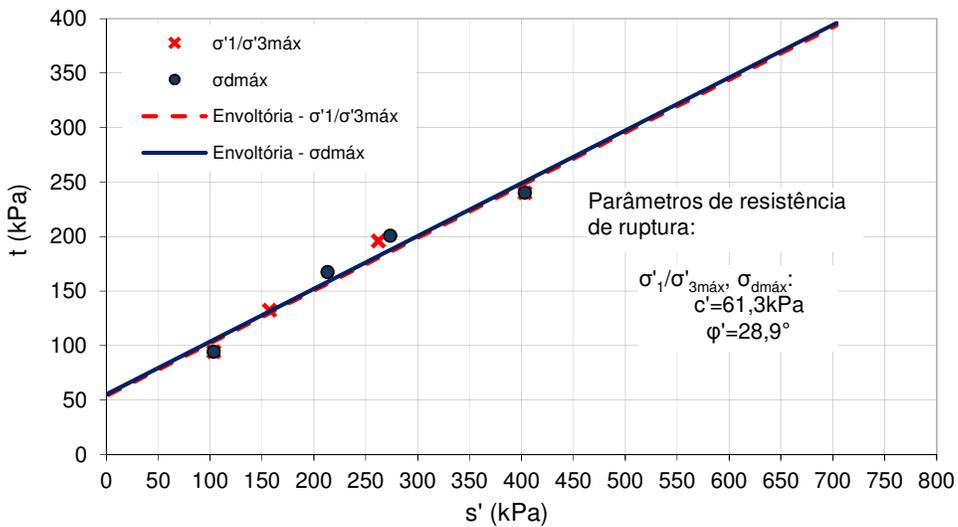


Figura 229 – Envoltórias e parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb obtidos considerando os critérios de ruptura de razão entre as tensões principais efetiva máxima ( $\sigma'_1/\sigma'_{3 \text{ máx}}$ ) e tensão desviadora máxima ( $\sigma_{d \text{ máx}}$ ) para os ensaios IU-DC02.

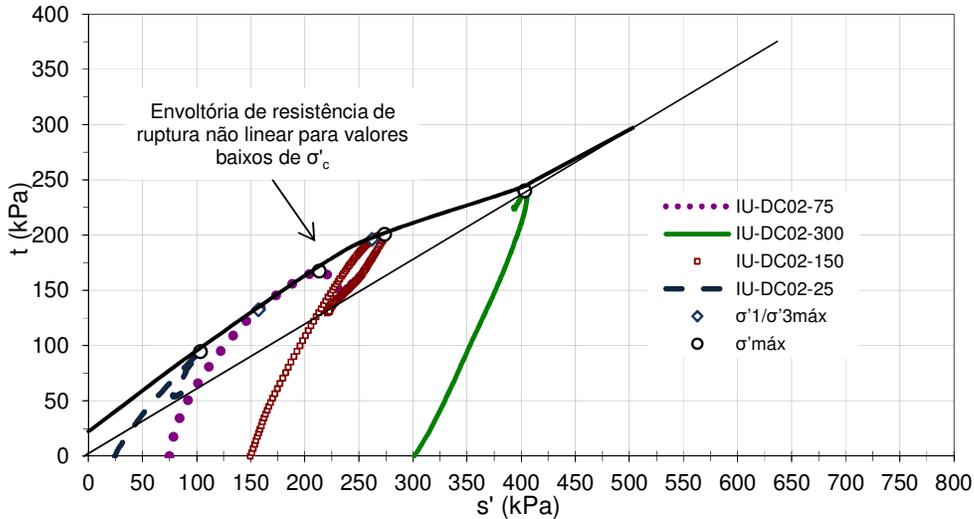


Figura 230 – Proposta de envoltória de resistência não linear para baixos valores de  $\sigma'_c$  - IU-DC02.

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

As relações entre a resistência ao cisalhamento na ruptura e o volume específico inicial e após o adensamento são apresentadas na Figura 231. Independente do critério de ruptura, uma boa correlação é obtida com o volume específico, seja o inicial ou após o adensamento, ao contrário dos ensaios IE. A mesma tendência é observada ao se correlacionar a resistência ao cisalhamento com a tensão efetiva de adensamento (Figura 232).

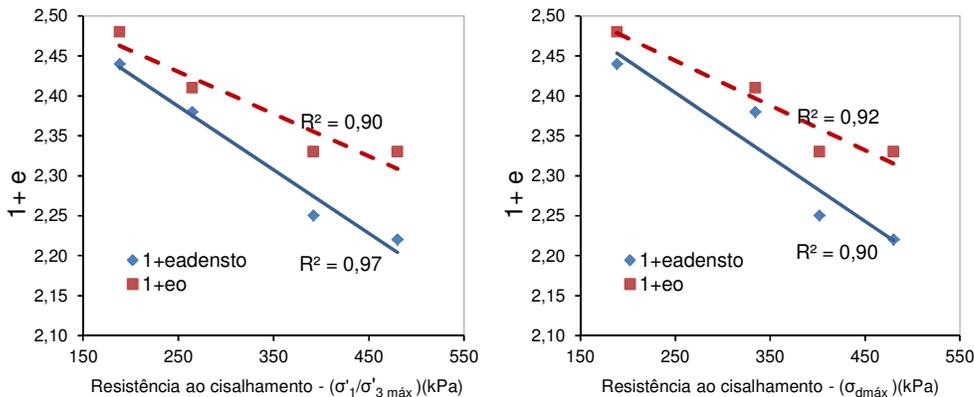


Figura 231 – Correlação entre o volume específico ( $1+e$ ) antes e após o adensamento e a resistência ao cisalhamento (a) de acordo com o critério  $\sigma'_1/\sigma'_{3\text{ máx}}$  e (b)  $\sigma_{dmáx}$ .

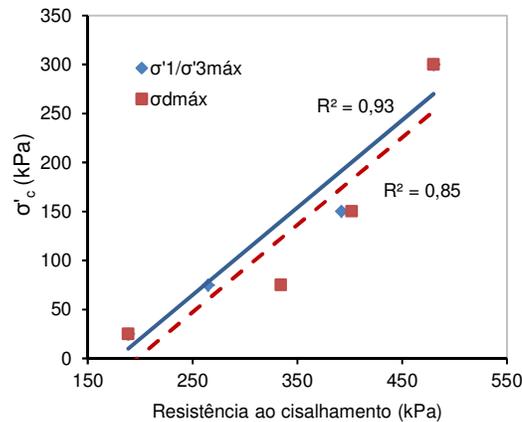


Figura 232 – Correlação entre a tensão efetiva de adensamento e a resistência ao cisalhamento na ruptura.

#### 10.1.6.

#### Determinação da resistência correspondente à condição última do solo DC02.

A envoltória de resistência é aqui definida com o principal objetivo de servir como referência para análise comparativa das trajetórias de tensões dos ensaios realizados com diferentes técnicas de saturação.

Todos os ensaios realizados em amostras indeformadas, independente da tensão efetiva de adensamento e do método de saturação, apresentaram um plano de ruptura bem definido. De acordo com Leroueil e Hight (2003), quando este tipo de ruptura está associado a um comportamento frágil do solo, rapidamente o estado crítico é atingido após a ruptura ou a tensão pós-pico encontra-se próxima a este. Logo, para os ensaios onde a curva tensão-deformação apresentou um pico bem definido, a resistência da condição última foi assumida como sendo a correspondente a cerca de 2% de deformação axial após a ruptura. Nos ensaios de difícil identificação deste ponto, assim como nos que possuem um comportamento atípico, como ganho de resistência após uma queda ou estabilização da mesma após a ruptura (e.g. ensaios IU-DC02-75, SIA-DC02-150), e que ainda podem estar associados ou não a não estabilização da resistência não drenada e do excesso de poropressão, adotou-se como critério a estabilização da razão entre as tensões efetivas principais. De forma geral, nos ensaios onde o pico de resistência é facilmente identificado, a resistência correspondente a 2% de deformação após a ruptura coincide com a estabilização da razão entre estas tensões efetivas principais.

Para auxiliar na determinação da envoltória de resistência na condição última, 3 ensaios CID com  $\sigma'_c$  igual a 25, 75 e 300 kPa em amostras reconstituídas foram executados. Os dados referentes aos corpos de prova constam na Tabela 67. As curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  e  $\epsilon_v \times \epsilon_a$  são expostas na Figura 233. Os ensaios executados com as tensões efetivas de 25 e 75 kPa apresentaram uma tendência de estabilização da tensão cisalhante e das deformações volumétricas para grandes deformações. Embora uma deformação axial de 20% tenha sido alcançada, este comportamento não foi observado no ensaio CID-DC02-300R. Ao longo do ensaio, o corpo de prova apresentou um comportamento contrátil, com uma redução de 28% do seu volume inicial, sem evidenciar um tipo comum de ruptura (barril ou formação de plano). Tal comportamento pode estar relacionado à composição mineralógica deste solo, que é formado por pacotes de biotita extremamente alterada e com baixo teor de quartzo. Como a cimentação é eliminada durante a remoldagem, o solo fica mais susceptível à ação da tensão efetiva de adensamento. Neste ensaio, só na fase de adensamento, houve uma redução de 10 % do volume, o que fez com que o contato grão a grão se tornasse mais intenso. Como a biotita intemperizada é um mineral pouco resistente, principalmente nas extremidades, por onde se inicia a alteração, acredita-se que a quebra contínua deste mineral seja o fator determinante para a observação do comportamento dúctil. Na Figura 234 têm-se as fotos dos corpos de prova ao final dos ensaios CID-DC02-75R e CID-DC02-300R.

Tabela 67 - Dados dos corpos de prova dos ensaios CID do solo DC02 executados em amostras com material reconstituído.

Ensaio	$\sigma'_c$ (kPa)	$w_o$ (%)	$w_f$ (%)	$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_o$	$e_{adens}$	$n$ (%)	$S_o$ (%)	B
CID-DC02-25R	25	35,51	57,86	14,70	10,85	1,60	1,58	61,6	63,8	0,98
CID-DC02-75R	75	37,03	52,04	14,67	10,71	1,64	1,54	62,1	65,2	0,98
CID-DC02-300R	300	30,06	38,61	14,30	11,00	1,56	1,17	60,9	55,5	1,00

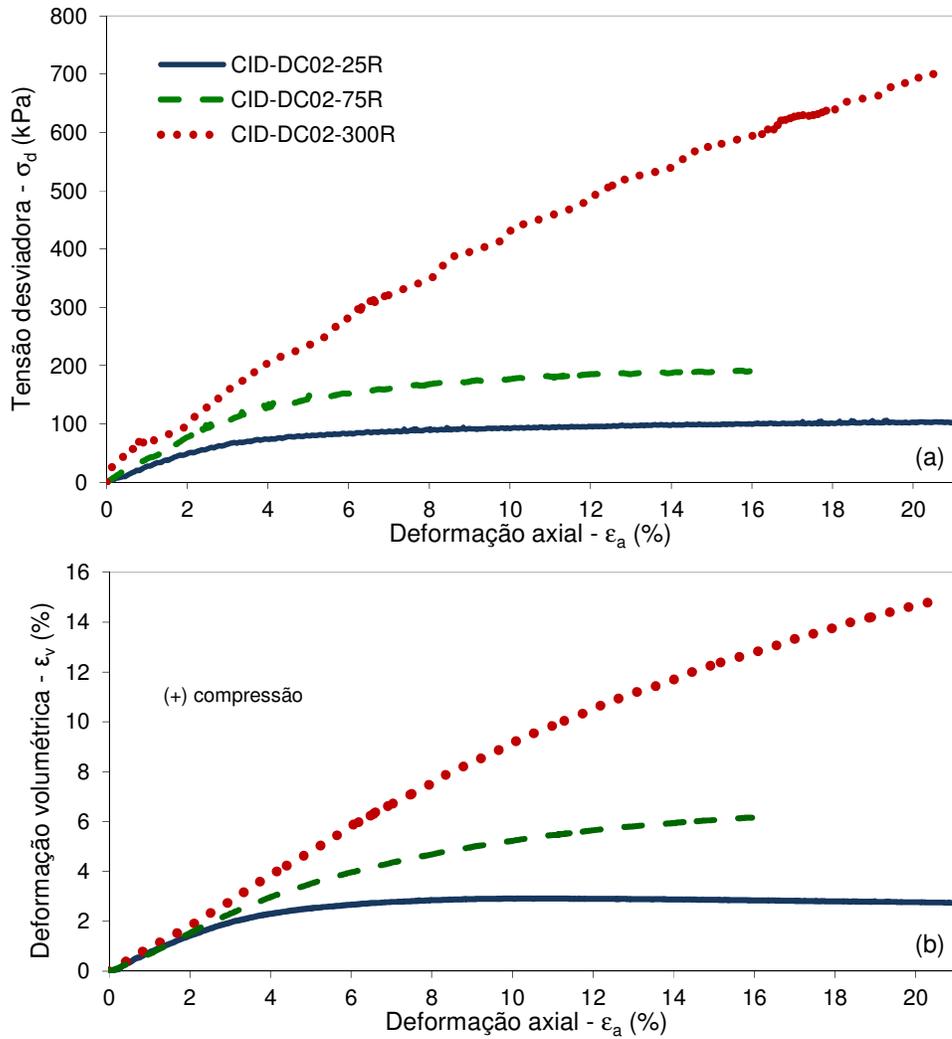


Figura 233 – Curvas (a) tensão desviadora *versus* deformação axial e (b) deformação volumétrica *versus* deformação axial dos ensaios CID executados em amostras reconstituídas do solo DC02.



Figura 234 – Corpos de prova ao final dos ensaios CID-DC02-75R, evidenciando a ruptura tipo barril (a), e CID-DC02-300R indicando o comportamento contrátil do CP.

Para a determinação da envoltória de resistência última do solo DC02, que acredita-se estar próxima ou coincidir com a linha do estado crítico, foram empregados, além dos dados de todos os ensaios CIU executados, os ensaios CID-DC02-25R e CID-DC02-75R, cuja tendência de estabilização da deformação volumétrica e das tensões desviadoras foi possível para o intervalo de deformação investigado. A envoltória e os parâmetros relativos à condição última do solo são apresentados na Figura 235. Os pontos vazados representam os ensaio CIU e os sólidos em vermelho os ensaios CID com  $\sigma'_c$  igual a 25 e 75 kPa. Apesar de não ter sido empregado na estimativa da envoltória, o resultado do ensaio CID-DC02-300R é representado (ponto sólido azul).

Assumindo que a condição última coincida ou se aproxime do estado crítico, as linhas do estado crítico no espaço de Cambridge  $p' [(\sigma'_1+2\sigma'_3)/3] \times q$  ( $\sigma'_1 - \sigma'_3$ ) e  $p' \times v$  são traçadas na Figura 236 com o objetivo de caracterizar o material. O resultado referente ao ensaio CID-DC02-300R, apesar de estar representado, não foi considerado no ajuste das linhas. 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;  
 $\Gamma$  = volume específico na condição do estado crítico para  $p' = 1\text{kPa}$ ;  
 $\psi$  = inclinação da linha do estado crítico no plano  $\ln p': v$ .

Na Tabela 68 são apresentados tais parâmetros para o solo DC02.

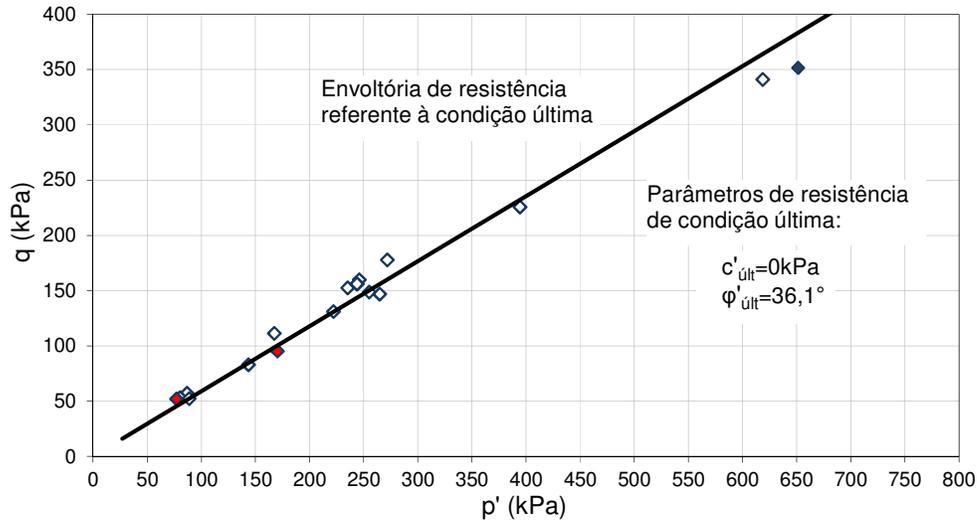


Figura 235 – Envolvória de resistência do solo DC02 para a condição última empregando os dados de todos os ensaios CIU e dos CID em material reconstituído com  $\sigma'_c = 25$  e  $75$  kPa (pontos em vermelho). Apesar de não ter sido empregado na estimativa da envolvente, o ponto correspondente ao ensaio CID-DC02-300R é representado pelo ponto azul sólido.

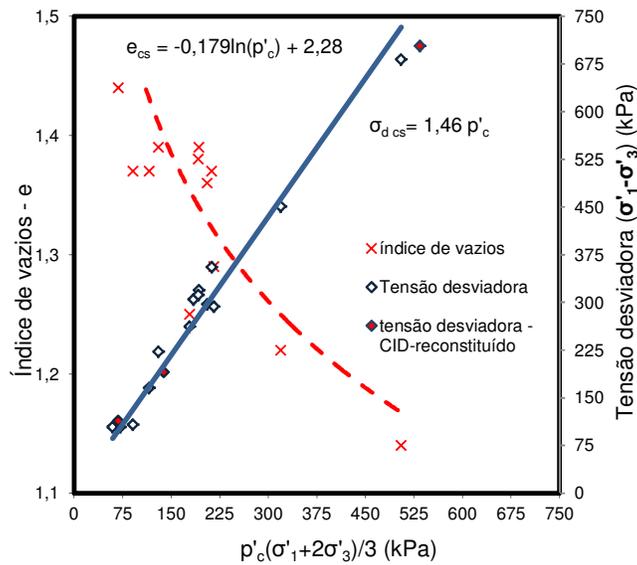


Figura 236 – Estimativa das linhas do Estado Crítico do solo DC02 representadas no espaço de Cambridge.

Tabela 68 – Parâmetros de Estado Crítico do solo DC02.

M	$\Gamma$	$\psi$
1,46	3,28	0,179

### 10.1.7.

#### **Comparação dos resultados dos ensaios executados com os diferentes métodos de saturação (IE, IU e SIA)**

As características estruturais de um solo residual influenciam diretamente em seu comportamento mecânico. Outros fatores como amostragem, moldagem e técnicas adotadas durante a execução dos ensaios também interferem em sua resposta. Alguns aspectos de ordem estrutural tais como presença de cimentação, mineralogia, arranjo espacial das partículas podem ser extrapolados para amostras retiradas de um mesmo bloco, salvo os casos em que diferenças são visíveis a olho nu. Quanto ao efeito das técnicas de ensaio, como amostragem e moldagem, estas podem ser desconsideradas se o intuito é fazer uma análise comparativa dos resultados, o que não justifica a execução destas etapas sem a adoção dos procedimentos corretos.

O solo DC02 possui aspecto visual homogêneo e tem como característica estrutural principal a predominância de pacotes de biotita alterada ligados por agentes cimentantes cujos componentes principais são argilominerais, principalmente caulinita, e óxi-hidróxido de ferro. Desta forma, para analisar o comportamento do solo residual DC02, além das comparações diretas dos resultados principais (curvas tensão-deformação, trajetórias de tensões e parâmetros de resistência) e da variação de volume total registrada durante o processo de saturação, outros aspectos como índice de vazios, apesar da pouca variabilidade, e variação de volume durante o adensamento também foram considerados.

#### **i. Comportamento tensão-deformação**

As curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  e  $\Delta u \times \epsilon_a$  dos ensaios CIU executados com o emprego de diferentes técnicas de saturação no solo DC02 são apresentadas na Figura 237 por tensão efetiva de adensamento. Seguindo o mesmo tipo de apresentação, constam na Figura 238 as curvas da razão das máximas tensões efetivas principais.

Nos ensaios com  $\sigma'_c$  igual a 25 kPa a principal diferença no comportamento tensão-deformação está associada à resistência de ruptura. Enquanto a resistência obtida nos ensaios IE-DC02-25 e SIA-DC02-25 é superior a 230 kPa, a atingida pelo ensaio IU-DC02-25 é de 188,5 kPa, que corresponde a uma redução de 22,5%. As diferenças persistem ao serem comparadas as curvas da razão das tensões efetivas principais (Figura 238a). Além disso, a variação de volume total durante a fase de saturação do ensaio IU-

DC02-25 foi superior à registrada nos ensaios SIA-DC02-25 e IE-DC02-25. Vale ressaltar que este volume engloba outros processos que não apenas a compressão da estrutura do solo. Por isso, o mesmo é aqui tomado para uma análise comparativa-qualitativa. Outro aspecto interessante é a variação de volume do corpo de prova durante a fase de adensamento. Assim como observado na avaliação da variação de volume total, o corpo de prova correspondente ao ensaio IU-DC02-25 apresentou uma redução de volume igual a, aproximadamente, o dobro dos outros dois ensaios em questão. Diante do exposto, credita-se as diferenças no comportamento mecânico deste solo ao dano causado à estrutura durante a fase de saturação baseada no incremento único de contrapressão (IU) devido à elevada tensão confinante aplicada, mesmo sendo esta sob condições não drenadas e por um espaço de tempo da ordem de segundos, que o corpo de prova é submetido durante este processo. Assim como nos ensaios SIA-DC02-25 e IE-DC02-25, a maior taxa negativa de geração de poropressão sucede o pico de resistência não drenada, comportamento este típico de solos com estrutura cimentada mencionado por Leroueil e Vaughan (1990). Nestes ensaios, a plastificação total da estrutura ocorre por cisalhamento e coincide com a máxima tensão desviadora, como descrito por Vaughan *et al.* (1988). De acordo com Martins (2001), a influência da estrutura de um solo em seu comportamento mecânico pode ainda ser atribuída a toda e qualquer diferença de comportamento observada em relação ao material reconstituído na mesma porosidade e submetido ao mesmo carregamento do material indeformado. Tal diferença fica evidente no ensaio executado em material reconstituído (IE-DC02-25R) que, ao contrário dos ensaios executados em amostras indeformadas, independente do método de saturação, não apresenta pico de resistência e a máxima tensão desviadora e a máxima razão das tensões efetivas principais coincidem com a do estado último.

Apenas no ensaio IE-DC02-75, dentre os ensaios executados com tensão efetiva de 75 kPa, o pico de resistência ocorre imediatamente antes da máxima taxa negativa de geração de poropressão, como nos ensaios com  $\sigma'_c = 25$  kPa. Nos outros dois ensaios, IU-DC02-75 e SIA-DC02-75, estes pontos coincidem. Vale ressaltar que o ensaio SIA-DC02-75 foi submetido a um estado de tensões indesejado durante o processo de saturação ocasionado pelo aumento não intencional da tensão confinante até cerca de 300 kPa, sem permissão da drenagem, o que pode ter gerado dano à estrutura do solo. Logo, caso não tivesse ocorrido tal incidente neste ensaio, para o solo em questão, cuja tensão

de cedência é de 600 kPa, não seria de se esperar diferenças significativas entre este método e o IE.

Para a tensão efetiva de 150 kPa, os ensaios executados pelos diferentes métodos de saturação apresentam a máxima tensão desviadora coincidindo com a máxima taxa negativa de geração de poropressão. Assim como no ensaio SIA-DC02-75, uma elevada tensão confinante foi aplicada de forma não intencional no ensaio SIA-DC02-150. A curva tensão-deformação dos ensaios IE-DC02-150 e IU-DC02-150 apresentam o mesmo comportamento, com a tensão desviadora máxima do primeiro sendo um pouco superior (Figura 237e). Tal semelhança também é refletida nas curvas  $\sigma'_1 / \sigma'_3 \times \varepsilon_a$  (Figura 238c). O ensaio SIA atinge uma menor tensão desviadora que estes ensaios e possui um pico de resistência não drenada pouco expressivo para pequenas deformações seguido de um aumento contínuo para então apresentar uma nova queda de resistência correspondente à deformação axial de 7%. Apesar do grau de saturação inicial dos ensaios SIA-DC02-150 e IU-DC02-150 serem próximos e a tensão confinante aplicada durante a fase de saturação no ensaio SIA-DC02-150 acidentalmente ser a metade da imposta no ensaio IU-DC02-150, o ensaio IU-DC02-150 apresenta maior resistência considerando o critério  $\sigma'_1 / \sigma'_3$ .

Os ensaios realizados com tensão efetiva de 300 kPa apresentam comportamento tipo *strain-softening* e as curvas de excesso de poropressão, ao contrário dos ensaios executados com  $\sigma'_c < 300$  kPa, não apresentam pico (Figura 237g e h). Este comportamento é relacionado por Leroueil e Vaughan (1990) a solos com estrutura cimentada e submetidos a um estágio intermediário de tensão de adensamento. O ensaio executado com incremento único de contrapressão (IU) apresentou menor rigidez e maior resistência não drenada. De fato, valores mais elevados de tensão efetiva de adensamento fazem com que a plastificação da estrutura ocorra ou tenha início ainda na fase de adensamento, o que faz com que outros aspectos do solo, como o índice de vazios, gerem diferenças na resposta do solo. Os resultados destes ensaios associados às observações feitas nos ensaios realizados com tensão efetiva de 150 kPa, fizeram com que uma possível influência do índice de vazios dos corpos de prova, mesmo que a variação observada seja pequena, fosse avaliada.

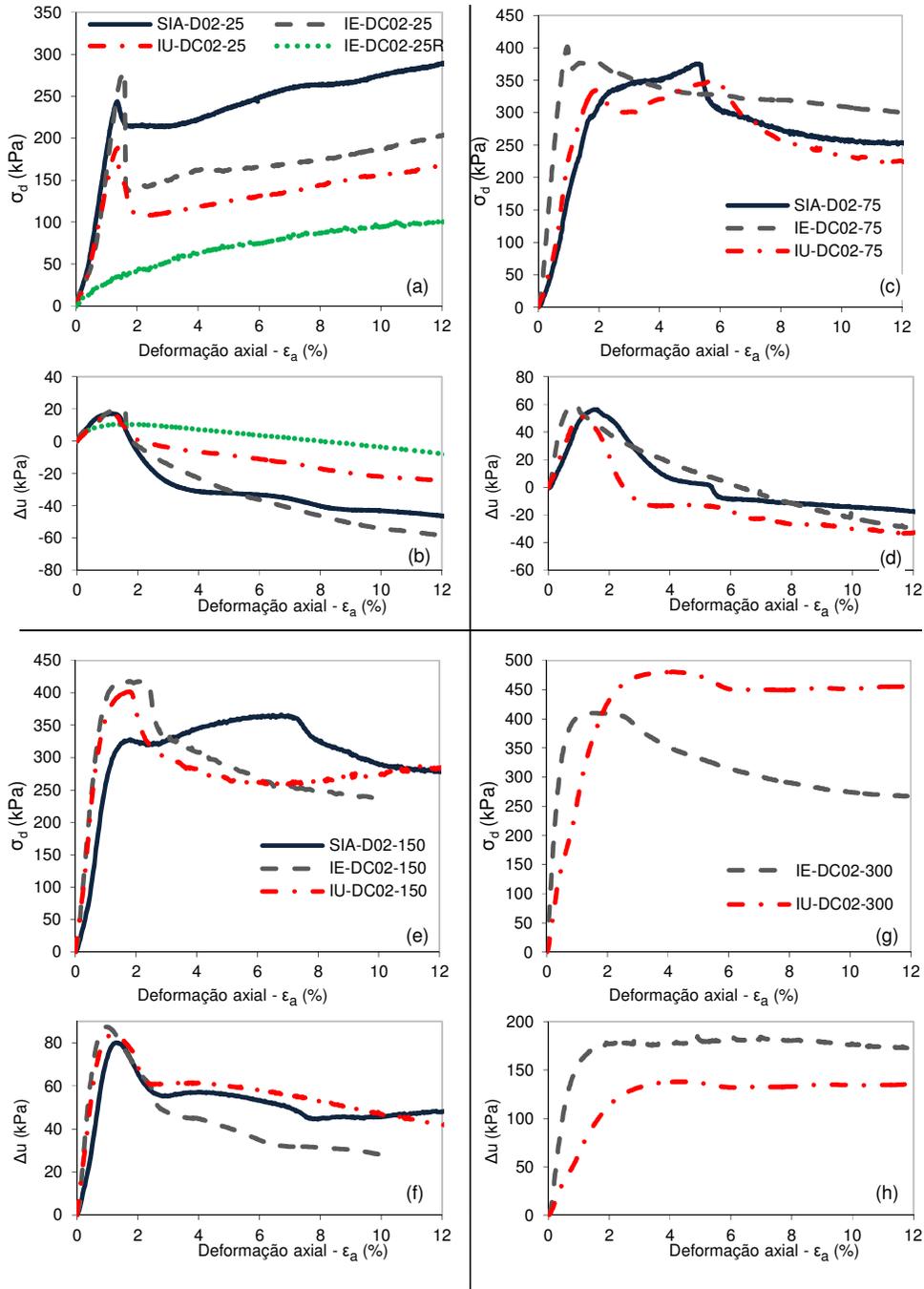


Figura 237 – Comparação das curvas  $\sigma_d \times \epsilon_a$  e  $\Delta u \times \epsilon_a$  dos ensaios CIU do solo DC02 executados com diferentes técnicas de saturação no solo DC02.

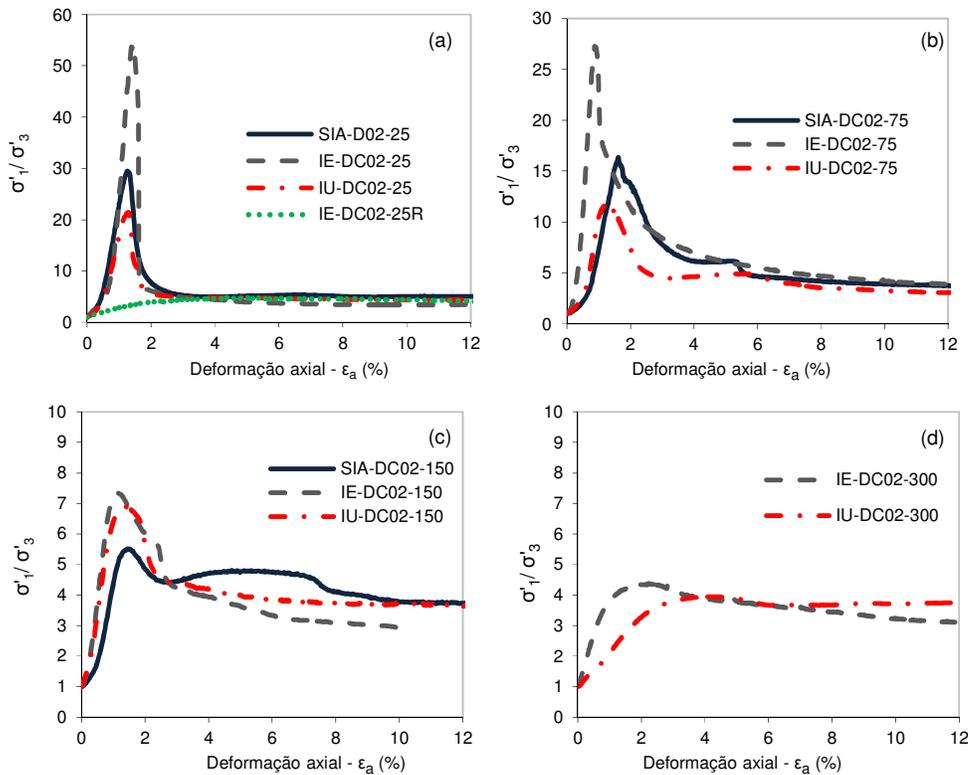


Figura 238 – Comparação das curvas  $\sigma'_1/\sigma'_3 \times \epsilon_a$  dos ensaios CIU do solo DC02 executados com diferentes técnicas de saturação.

## ii. Índice de vazios inicial

Para averiguar uma possível interferência do índice de vazios inicial no comportamento do solo, foram associados a este a máxima tensão desviadora obtida para cada nível de tensão efetiva testado, como mostrado na Figura 239a. Além disso, por acreditar que, caso o processo de saturação gere dano à estrutura do solo, este efeito será refletido na variação de volume durante o adensamento, também foi relacionado à tensão efetiva a variação de volume nesta fase (Figura 239b). Nos ensaios realizados com  $\sigma'_c$  igual a 25 kPa, tem-se que a máxima tensão desviadora está relacionada ao ensaio que possui menor índice de vazios (IE-DC02-25) e a menor ao ensaio com maior índice de vazios (IU-DC02-25). A variação volumétrica registrada na fase de adensamento do último é quase o dobro dos outros dois ensaios realizados em amostras indeformadas, como mencionado, e igual ao do material reconstituído. No entanto, para a tensão efetiva de 75 kPa, a amostra do ensaio SIA-DC02-75 possui maior índice de vazios que a do ensaio IU-DC02-75 e, mesmo assim a variação volumétrica durante o adensamento da primeira (SIA-DC02-75) é

inferior e a máxima tensão desviadora, assim como a maior razão entre as tensões efetivas da amostra SIA-DC02-75 são superiores. Isto sugere que o índice de vazios inicial não constitui fator relevante.

A pouca influência do índice de vazios inicial na avaliação do processo de saturação fica ainda mais evidente ao se observar os resultados referentes à tensão efetiva de 150 kPa. Apesar do corpo de prova do ensaio IE-DC02-150 possuir um maior índice de vazios, igual a 1,43, a tensão desviadora máxima alcançada é maior que nos demais ensaios. Além disso, o ensaio IU-DC02-150, submetido à maior acréscimo de tensão confinante na fase de saturação, apresentou uma variação volumétrica durante o adensamento duas vezes superior ao ensaio IE-DC02-150, mesmo apresentando um índice de vazios inicial de 1,33, 7% inferior ao do ensaio IE-DC02-150.

Apesar da máxima tensão desviadora apresentada pelo ensaio IU-DC02-300 ser superior ao do ensaio IE-DC02-300, o mesmo não possui nenhuma tendência de formação de pico na curva  $\sigma'_1/\sigma'_3$ , apresenta menor rigidez e atinge a máxima tensão desviadora próximo a envoltória de resistência última, ao contrário do ensaio IE-DC02-300.

Para tensões efetivas ainda mais próximas da tensão de cedência do solo, a plastificação da estrutura ocorre totalmente na fase de adensamento, tendendo o material a apresentar comportamento semelhante ao de um solo sedimentar normalmente adensando, onde a tensão efetiva passar a ser o fator mais influente.

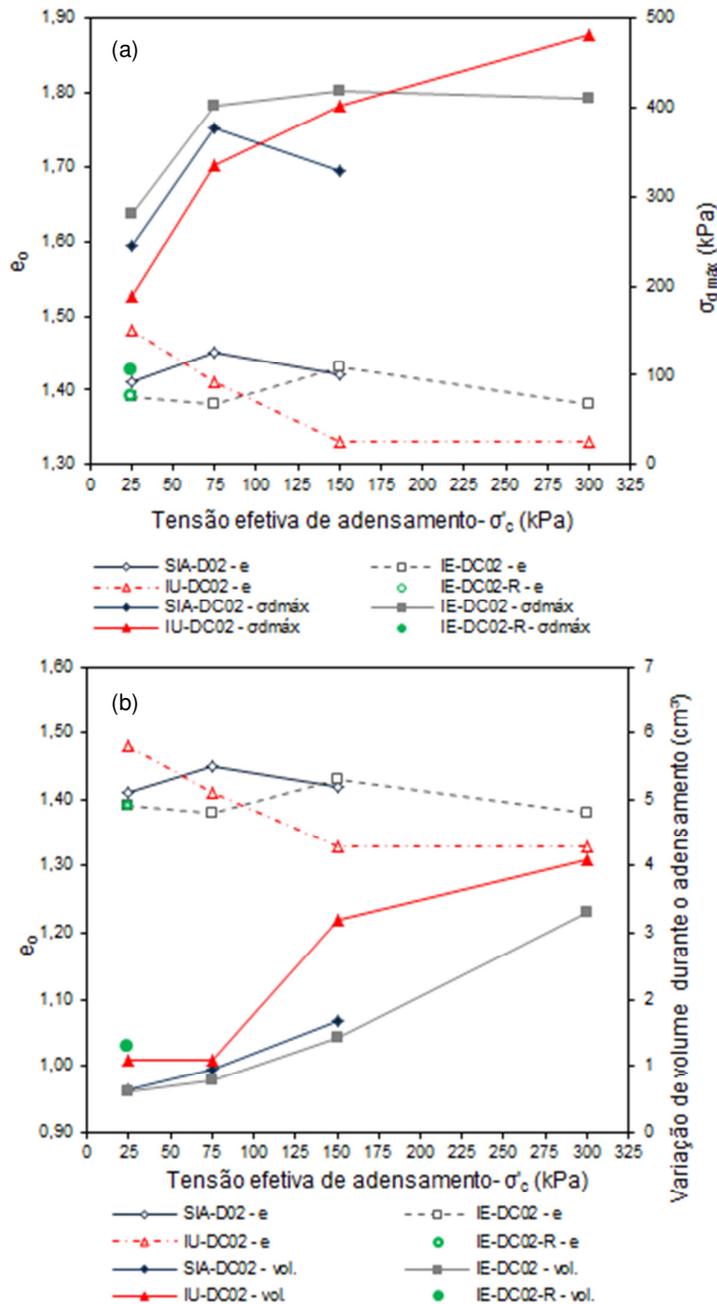


Figura 239 – Relação entre índice de vazios inicial e a máxima tensão desviadora (a) e a variação de volume durante o adensamento (b) para cada nível de tensão efetiva e método de saturação empregado.

### iii. Módulo de deformação

A título de comparação são apresentadas na Figura 240 as variações dos módulos de deformação secante entre 0,25 e 2% de deformação axial para cada tensão efetiva e método de saturação. Nos ensaios realizados com tensão efetiva de 25 kPa, a influência da estrutura na rigidez do solo é notada ao se comparar os resultados dos ensaios em amostras indeformadas com o material

reconstituído. Os ensaios realizados com os métodos de saturação SIA e IE para esta tensão apresentam maiores módulos que o ensaio IU. Para as demais tensões efetivas, a magnitude dos módulos de deformação dos ensaios IE foi superior aos dos outros ensaios. Obviamente, o mesmo padrão é observado na variação do módulo de deformação secante correspondente a 50% da tensão desviadora máxima (Figura 241). Ressalta-se novamente que, os ensaios SIA-DC02-75 e SIA-DC02-150 foram submetidos a um estado de tensões indesejado devido ao aumento não intencional de tensão confinante durante o processo de saturação.

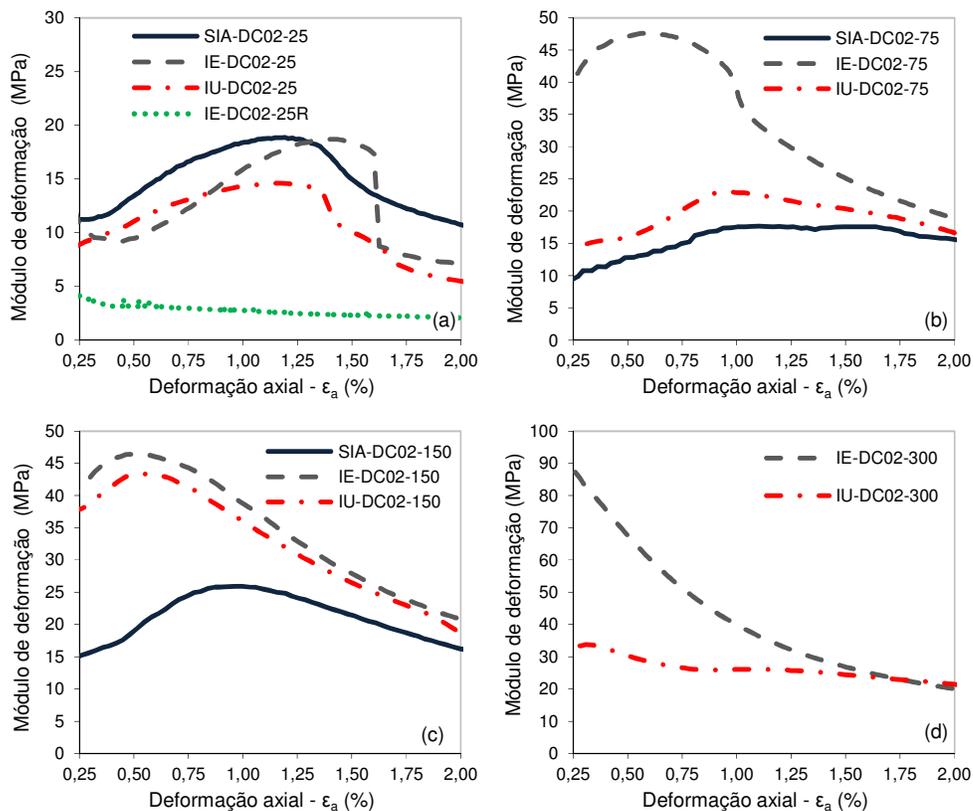


Figura 240 – Variação do módulo de deformação secante com a deformação axial para cada nível de tensão efetiva de adensamento testado (análise qualitativa, dada a falta de instrumentação interna).

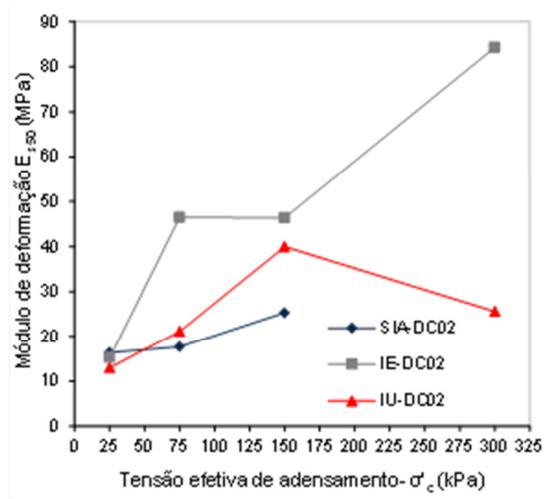


Figura 241 – Variação do módulo de deformação secante correspondente a 50% da máxima tensão desviadora.

#### iv. Curva de plastificação da estrutura

Uma das formas de se comparar o efeito do processo de saturação na estrutura do solo é através da curva de plastificação (estado limite). Leroueil e Vaughan (1990) definem três regiões no espaço  $s':t$  que compreendem a plastificação da estrutura por cisalhamento (I), compressão (II) e expansão (III) (Figura 7). No presente trabalho é determinada apenas a região I a partir dos ensaios CIU. Ensaios de compressão isotrópica e anisotrópica são os mais adequados para caracterizar a região II, que encontra-se abaixo da linha do estado crítico. A região III ocorre preferencialmente em solos que possuem material expansivo. Futai (2002) lançou mão da execução de ensaios com aumento monotônico de poropressão para definir esta região.

Para a determinação do ponto de plastificação dos ensaios CIU, utilizou-se o critério sugerido por Graham *et al.* (1988), em escala aritmética, semilogarítmica e bi-logarítmica da curva  $\sigma_d:\varepsilon_a$  (como também recomendado por Vaughan, 1988). Todos os métodos forneceram valores muito próximos e foram determinados nos pontos de inflexão das curvas.

As curvas de plastificação referentes à região I dos ensaios IE, SIA e IU são apresentadas na Figura 242, no plano  $s':t$ . Os ensaios IU-DC02-300 e IE-DC02-500, que são do tipo CIU, foram descartados na estimativa da curva de plastificação para este processo de saturação por se encontrarem abaixo da linha do estado crítico, não sendo este tipo de ensaio o recomendado para a obtenção da curva nesta faixa do gráfico  $s':t$ . Na Tabela 69 são apresentados os valores de  $s'$  e  $t$  correspondentes ao ponto de plastificação para cada ensaio. A

plastificação da estrutura nos ensaios realizados com 25 kPa de tensão efetiva, independente da técnica de saturação, coincidem com a ruptura. Para tensões superiores, o mesmo ocorre apenas no ensaio IE-DC02-75. Nos demais ensaios tais tensões encontram-se um pouco abaixo da resistência de pico.

A curva correspondente aos ensaios IE encontra-se mais deslocada para direita e acima das relacionadas aos ensaios SIA e IU, indicando que tensões mais elevadas são necessárias para desencadear a plastificação da estrutura do solo quando saturado por este método. Além disso, a curva de plastificação do ensaio IE é a que mais se aproxima da envoltória de resistência de pico não linear sugerida anteriormente.

Uma melhor definição da curva de plastificação da estrutura do solo está vinculada a execução de mais ensaios de resistência (CIU e CID) e/ou com  $s'$  constante e ensaios de adensamento anisotrópico e isotrópico, com tensão efetiva de adensamento suficientemente elevada para uma determinação adequada da tensão de cedência.

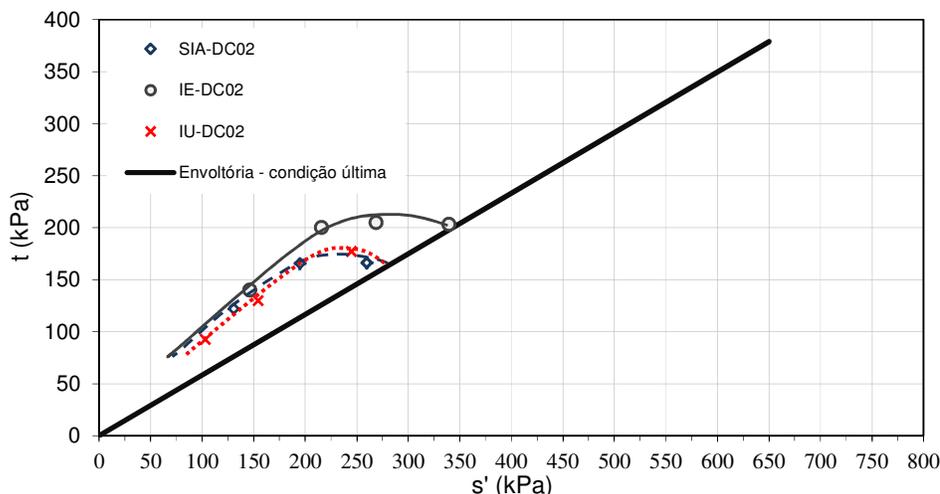


Figura 242 – Curvas de plastificação obtidas pelos diferentes métodos de saturação correspondente a região de plastificação da estrutura por cisalhamento, definida por Leroueil e Vaughan (1990).

Tabela 69 – Pontos de plastificação obtidos nos ensaios CIU do solo DC02.

$\sigma'_c$ (kPa)	Ensaio	$s'$ (kPa)	$t$ (kPa)
25	IE-DC02-25	146,3	139,9
	SIA-DC02-25	130,8	122,0
	IU-DC02-25	103,7	94,3
75	IE-DC02-75	216,1	201,0
	SIA-DC02-75	195,0	165,5
	IU-DC02-75	154,4	129,8
150	IE-DC02-150	268,8	204,8
	SIA-DC02-150	259,9	166,1
	IU-DC02-150	245,0	177,1
300	IE-DC02-300	339,6	203,3
	IU-DC02-300*	404,6	227,8
500	IE-DC02-500*	688,1	347

\*Abaixo da linha do estado crítico

## v. Trajetórias de tensões e resistência

As trajetórias de tensão dos ensaios CIU são reunidas nos gráficos da Figura 243. Sob níveis de confinamento inferiores a 300 kPa, todas as trajetórias dos ensaios realizados com amostras indeformadas ultrapassam a envoltória de resistência última, assumida como próxima ou coincidente com o estado crítico, para só após a ruptura caminharem em direção a esta. O único ensaio CIU realizado com material reconstituído atinge a envoltória de resistência última próximo a máxima tensão desviadora.

Enquanto nos ensaios realizados com técnica de saturação IU há um aumento no valor máximo de  $t$  com a tensão efetiva de adensamento, nos ensaios IE o máximo valor de  $t$  entre as tensões efetivas de 75 e 300kPa são quase os mesmos, indicando uma menor susceptibilidade à tensão efetiva de adensamento dos ensaios IE.

Embora o máximo valor de  $t$  atingido pela trajetória de tensões do ensaio IE-DC02-300 seja inferior ao do ensaio IU-DC02-300, o mesmo está localizado acima da envoltória de resistência última, indicando ainda a influência da estrutura cimentada para este nível de tensão efetiva. Já o ensaio IU-DC02-300 apresenta o máximo valor de  $t$  próximo à envoltória, sem ultrapassá-la.

Apesar da envoltória de resistência de ruptura para solos com estrutura cimentada ser curva para tensões inferiores a de cedência, envoltórias lineares foram estimadas para os métodos de saturação avaliados. Os parâmetros obtidos constam na Tabela 70. Na Figura 244 as envoltórias são traçadas no plano  $s' \times t$  juntamente com a envoltória de resistência última. Apesar dos problemas ocorridos durante a execução dos ensaios SIA-DC02-75 e SIA-DC02-150, os resultados destes ensaios foram incluídos na determinação da envoltória apresentada.

A forte influência da estrutura cimentada no comportamento do solo DC02 fica evidente nos parâmetros obtidos pelo método de saturação baseado em incrementos de contrapressão em estágio (IE), refletindo no elevado valor de intercepto coesivo efetivo e baixo ângulo de atrito efetivo. Com a estrutura do solo sendo afetada pelo processo de saturação IU (único incremento de contrapressão), tem-se uma redução de cerca de 40 % no valor de  $c'$ , e aumento no valor de  $\phi'$ , sugerindo uma maior influência da tensão efetiva de adensamento nestes ensaios que nos realizados com a técnica de saturação (IE). Para o método de saturação SIA, caso não tivessem ocorrido problemas com o aumento indesejado de tensão confinante na fase de saturação em dois

dos três ensaios empregados para estimar a envoltória, esperava-se que o resultado fosse próximo ao obtido pelo método IE. Entretanto, para os valores determinados de fato por este método, os parâmetros de resistência são próximos aos dos ensaios IU, se considerado o critério de ruptura  $\sigma_{dm\acute{a}x}$ .

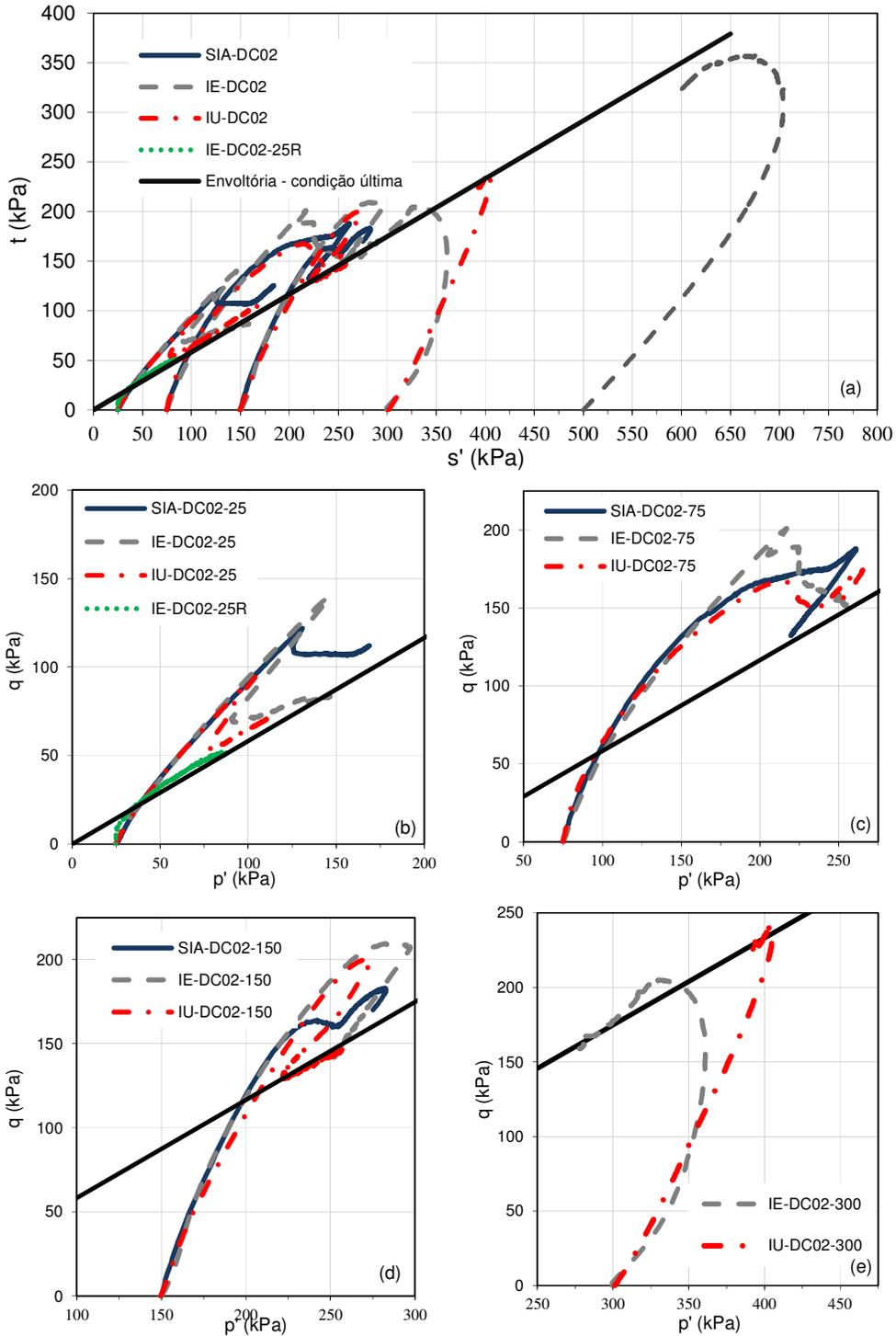


Figura 243 – Comparação das trajetórias de tensões dos ensaios CIU executados com diferentes técnicas de saturação – solo DC02.

Se mais ensaios com tensões efetivas de adensamento acima da tensão de cedência fossem realizados e considerados na estimativa dos parâmetros de resistência de ruptura, provavelmente, as diferenças observadas nos parâmetros obtidos pelos diferentes métodos de saturação seriam menores, pois o dano causado à estrutura pelo processo de saturação seria encoberto pelo efeito da tensão efetiva de adensamento. Este efeito é previsto por Leroueil e Vaughan (1990) ao descreverem o comportamento esperado de um solo com estrutura cimentada.

Tabela 70 – Parâmetros de resistência de ruptura obtidos a partir dos ensaios executados com diferentes técnicas de saturação. Solo DC02.

Método de saturação	Parâmetros de resistência na ruptura	
	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
IE	105,8	21,5
IU	61,3	28,9
SIA#	68,1*	27,5*
	84,3**	21,4**

Critério de ruptura  $\sigma'_{dm\acute{a}x}$  e  $\sigma'_1/\sigma'_{3m\acute{a}x}$ . Para os demais métodos, as envoltórias para estes dois critérios são coincidentes.

#Dois dos três ensaios executados foram submetidos a tensões indesejadas durante o processo de saturação.

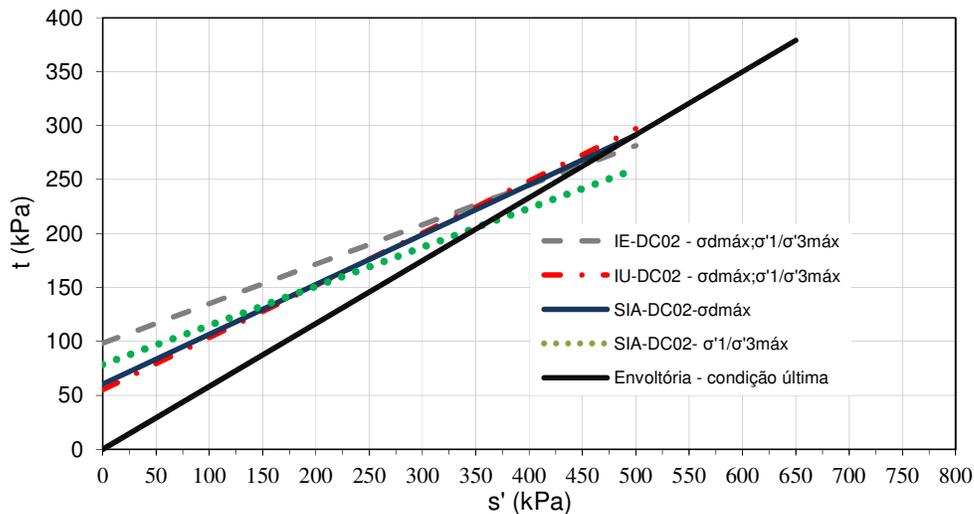


Figura 244 – Envoltórias de resistência de ruptura dos ensaios.