

## 6 Comportamento mecânico

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de resistência realizados com o solo residual jovem (triaxiais) e com o coluvionar (cisalhamento direto), assim como o resultado de um ensaio edométrico realizado com o solo residual jovem no estado natural.

### 6.1. Adensamento edométrico – solo residual jovem natural

#### 6.1.1. Introdução

O objetivo principal da realização do ensaio edométrico convencional foi determinar a tensão de escoamento do solo residual jovem no estado natural. De forma complementar, foram calculados os parâmetros que podem ser obtidos a partir deste ensaio.

#### 6.1.2. Apresentação e análise dos resultados

O corpo de prova utilizado tinha 7,15 cm de diâmetro e 1,95 cm de altura. As características iniciais do corpo de prova são listadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Características iniciais do corpo de prova do ensaio de adensamento edométrico (solo residual natural)

| $e_o$ | $W_o$ (%) | $S_o$ (%) | $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) |
|-------|-----------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1,16  | 32,23     | 72,87     | 15,86                           | 12,00                           |

A amostra foi submersa antes de iniciar o carregamento. As tensões adotadas variaram de 9,81 kPa a 1569,07 kPa. A partir do último estágio de carregamento, foram realizados os seguintes estágios de descarregamento: 784,54 kPa, 392,27 kPa e 49,03 kPa. O tempo de duração de cada estágio foi o suficiente para proporcionar a estabilização das deformações. A Figura 6.1 ilustra as curvas recalque x raiz do tempo, obtidas nas fases de carregamento do corpo de prova, utilizadas para obtenção de  $t_{100}$ . Os dados obtidos a partir de cada estágio de adensamento constam na Tabela 6.2.

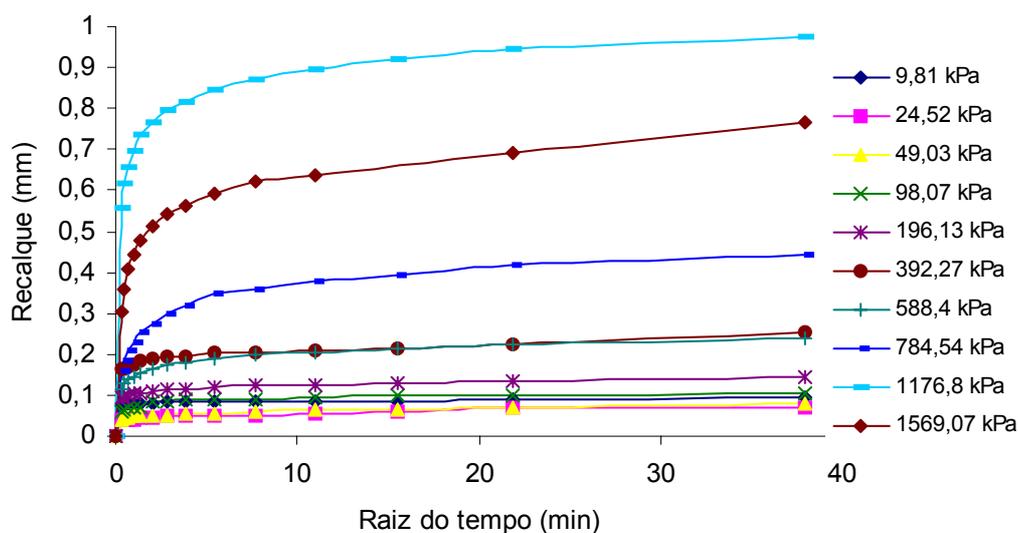


Figura 6.1 – Curvas recalque x raiz do tempo, solo residual natural

Tabela 6.2 – Dados obtidos a partir dos estágios de adensamento edométrico (solo residual natural)

| Estágio (kPa) | e    | $t_{100}$ (s) | $C_v$ ( $10^{-1}$ ) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) | $a_v$ ( $10^{-4}$ ) ( $\text{kPa}^{-1}$ ) | $m_v$ ( $10^{-4}$ ) ( $\text{kPa}^{-1}$ ) | $k$ ( $10^{-6}$ ) ( $\text{cm}/\text{s}$ ) |
|---------------|------|---------------|--|---|---|--|
| 9,81          | 1,15 | 8,4           | 2,01   | 10,7                                      | 4,99                                      | 9,88                                       |
| 24,52         | 1,14 | 12,0          | 1,39   | 5,20                                      | 2,43                                      | 3,33                                       |
| 49,03         | 1,13 | 12,0          | 1,38   | 3,66                                      | 1,72                                      | 2,34                                       |
| 98,07         | 1,12 | 12,6          | 1,30   | 2,40                                      | 1,13                                      | 1,45                                       |
| 196,13        | 1,11 | 8,4           | 1,93   | 1,61                                      | 0,76                                      | 1,45                                       |
| 392,27        | 1,08 | 8,4           | 1,89   | 1,42                                      | 0,69                                      | 1,28                                       |
| 588,40        | 1,05 | 17,4          | 0,89   | 1,36                                      | 0,66                                      | 0,58                                       |
| 784,54        | 1,00 | 27,6          | 0,54   | 2,50                                      | 1,25                                      | 0,66                                       |
| 1176,80       | 0,90 | 13,8          | 1,00   | 2,76                                      | 1,46                                      | 1,43                                       |
| 1569,07       | 0,81 | 24,0          | 0,52   | 2,17                                      | 1,20                                      | 0,61                                       |

Vaughan (1985) sugere que os resultados dos ensaios de adensamento sejam representados utilizando escalas diferentes das convencionais (semi-logarítmicas) para uma melhor identificação do ponto de escoamento. A curva que correlaciona o índice de vazios e a tensão efetiva de adensamento foi traçada na escala convencional (semi-logarítmica) e nas escalas sugeridas por Vaughan (1985) (escala aritmética e escala bilogarítmica) (ver Figura 6.2).

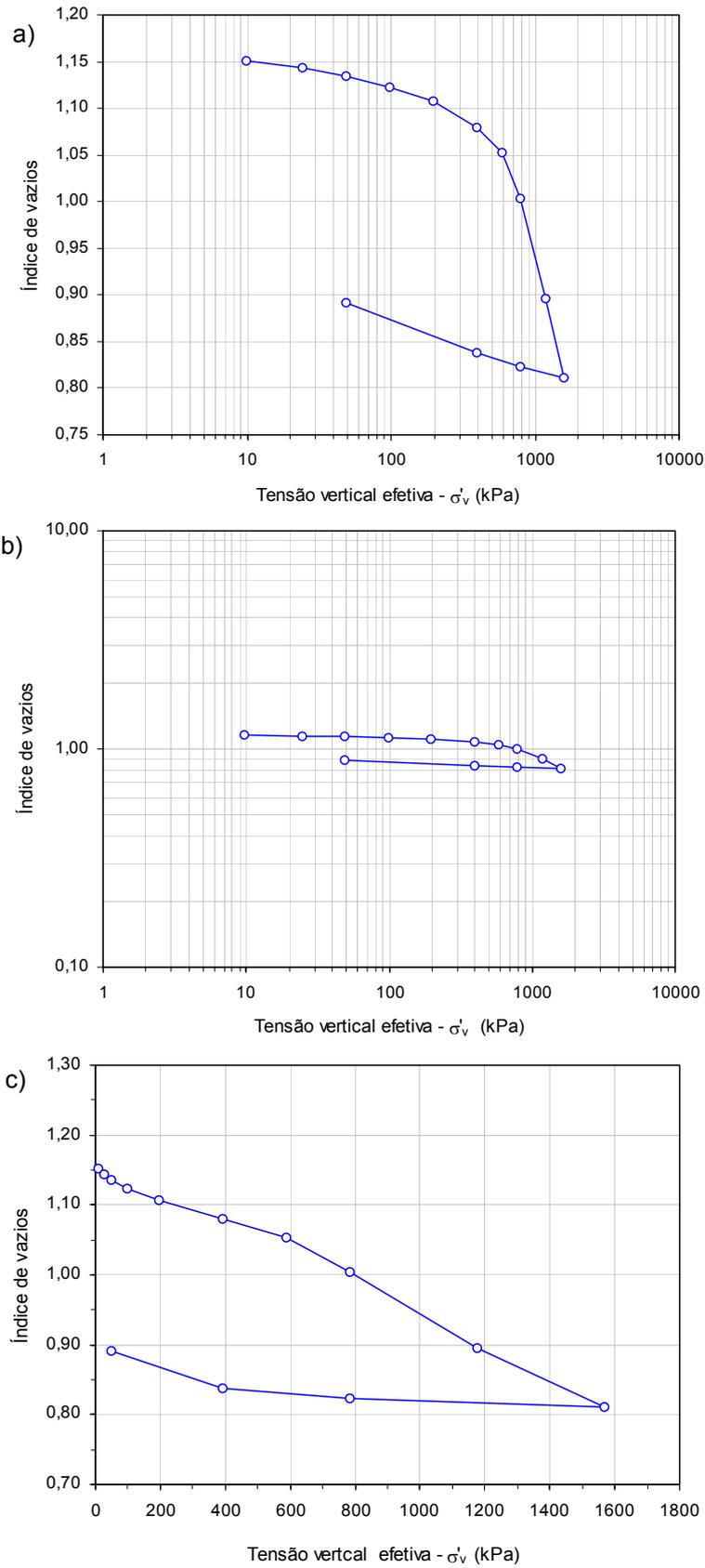


Figura 6.2 – Formas de representação dos resultados de adensamento edométrico a) e  $\log \sigma'_v$ , b)  $\log e$  x  $\log \sigma'_v$  e c)  $e$  x  $\sigma'_v$

Nas três formas de representação, observa-se, de maneira clara, uma mudança no gradiente das curvas, indicando a existência de uma tensão de escoamento. A tensão de escoamento apresentada na Tabela 6.3 foi determinada pelo método de Pacheco Silva na escala semi-logarítmica. Percebe-se que a mudança do gradiente nas demais escalas também ocorre próxima à tensão vertical efetiva de 600 kPa. Os outros parâmetros apresentados na tabela foram determinados a partir do gráfico traçado na escala semi-logarítmica ( $C_c$  – índice de compressão,  $C_s$  – índice de expansão e  $C_r$  – índice de recompressão).

Vale ressaltar, que se espera que o índice de vazios inicial do corpo de prova influencie o comportamento do solo neste ensaio.

Tabela 6.3 – Parâmetros do ensaio de adensamento edométrico

| $\sigma'_{es}$ (kPa) | $C_c$ | $C_r$ | $C_s$ |
|----------------------|-------|-------|-------|
| 600                  | 0,64  | 0,04  | 0,06  |

Analisando a curva na escala semi-logarítmica, percebe-se que há um trecho inicial em que o solo exibe comportamento mais rígido, com variação muito pequena do índice de vazios de acordo com a tensão vertical efetiva, como consequência das ligações interpartículas. Após a tensão de escoamento, o solo exibe grandes deformações plásticas com o aumento das tensões verticais.

## 6.2. Ensaio triaxiais

### 6.2.1. Introdução

O objetivo principal da realização dos ensaios triaxiais foi estudar a influência das interações físico-químicas, ocorridas entre o solo e o licor, no comportamento tensão-deformação e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo. Para tal, dois tipos de ensaios foram executados: no primeiro, os corpos de prova foram saturados com água (ensaio convencional), e no outro, o fluido intersticial (água) foi substituído pelo licor cáustico. Isto permitiu comparar o comportamento do solo em seu estado natural com o seu comportamento estando contaminado. Apenas o solo residual jovem foi

submetido a ensaios triaxiais, sendo os corpos de prova obtidos a partir de amostras indeformadas.

O programa de ensaios estabelecido está apresentado na Tabela 6.4. Dois ensaios CID com tensão efetiva de adensamento de 25 kPa foram realizados, sendo um com solo natural e outro com solo contaminado. Os ensaios CID foram executados com o intuito de melhor definir as envoltórias de resistência para baixos níveis de tensão.

A metodologia empregada na execução dos ensaios está descrita no Capítulo 4.

Tabela 6.4 – Campanha de ensaios triaxiais com os corpos de prova saturados com água e com licor cáustico

| Ensaio triaxial | $\sigma'_c$ (kPa) | Fluido intersticial dos corpos de prova |                |
|-----------------|-------------------|---|----------------|
|                 |                   | Água                                    | Licor cáustico |
| CIU             | 25                | X*                                      | X              |
|                 | 50                | X                                       | X*             |
|                 | 77                | X                                       | -              |
|                 | 100               | X                                       | X              |
|                 | 200               | X*                                      | X              |
|                 | 400               | -                                       | X              |
| CID             | 25                | X                                       | X              |

\* Dois ensaios realizados

Neste item, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios triaxiais. A princípio, pensou-se em analisar os resultados dos ensaios apenas por comparação (solo natural com solo contaminado), no entanto, ao longo da realização da campanha de ensaios, observou-se a forte influência do índice de vazios na resistência ao cisalhamento. Por isso, optou-se por também analisar a influência deste parâmetro no comportamento do solo.

## 6.2.2. Apresentação dos resultados

### 6.2.2.1. Índices físicos dos corpos de prova

Nas Tabelas 6.5 e 6.6, são listados os índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios CIU e CID, respectivamente. Conforme mostrado no Capítulo 5, a densidade relativa dos grãos deste solo é 2,627.

Tabela 6.5 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios CIU

| Fluido de saturação | $\sigma'_c$<br>(kPa) | $e_o$ | $e_{adensito}$ | $w_o$<br>(%) | $S_o$<br>(%) | $\gamma_t$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|----------------------|-------|----------------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Água                | 25(a)                | 1,25  | 1,25           | 44,97        | 94,40        | 16,59                              | 11,44                              |
|                     | 25(b)                | 1,15  | 1,15           | 36,48        | 83,40        | 16,36                              | 11,99                              |
|                     | 50                   | 1,47  | 1,46           | 50,39        | 89,80        | 15,66                              | 10,41                              |
|                     | 77                   | 1,31  | 1,30           | 46,82        | 93,80        | 16,36                              | 11,14                              |
|                     | 100                  | 1,34  | 1,32           | 36,94        | 72,30        | 15,06                              | 11,00                              |
|                     | 200(a)               | 1,49  | 1,43           | 48,93        | 86,10        | 15,39                              | 10,33                              |
|                     | 200(b)               | 1,26  | 1,19           | 44,49        | 93,10        | 16,50                              | 11,42                              |
| Licor               | 25                   | 1,29  | 1,27           | 43,42        | 88,40        | 16,13                              | 11,24                              |
|                     | 50(a)                | 1,51  | 1,48           | 48,35        | 84,00        | 15,21                              | 10,25                              |
|                     | 50(b)                | 1,32  | 1,28           | 45,16        | 89,90        | 16,12                              | 11,11                              |
|                     | 100                  | 1,33  | 1,28           | 47,84        | 94,80        | 16,37                              | 11,07                              |
|                     | 200                  | 1,46  | 1,26           | 45,01        | 81,00        | 15,19                              | 10,47                              |
|                     | 400                  | 1,18  | 0,93           | 42,86        | 95,40        | 16,88                              | 11,81                              |

Tabela 6.6 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios CID

| Fluido de saturação | $\sigma'_c$<br>(kPa) | $e_o$ | $e_{adensito}$ | $w_o$<br>(%) | $S_o$<br>(%) | $\gamma_t$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|---------------------|----------------------|-------|----------------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Água                | 25,00                | 1,06  | 1,06           | 33,6         | 81,00        | 16,67                              | 12,48                              |
| Licor               | 25,00                | 1,21  | 1,21           | 39,29        | 83,80        | 16,25                              | 11,67                              |

Nota-se, nestas tabelas, uma grande variação do índice de vazios natural do solo residual (1,06 a 1,51).

### 6.2.2.2.

#### Curvas tensão desviadora x deformação axial

Nos ensaios triaxiais CIU e CID, todos os corpos de prova romperam formando plano (ver ilustrações na Figura 6.3), tanto nos ensaios realizados com solo natural, como nos executados com solo contaminado. Por isso, foi necessário corrigir os valores da tensão desviadora após a ruptura. As correções foram feitas tanto para a mudança de área, que diminui ao longo do tempo após a ruptura, como para a membrana, que passa a colaborar de maneira significativa na resistência. As metodologias empregadas nestas correções estão no Anexo II. As curvas tensão desviadora x deformação axial, já corrigidas, e as de excesso de poropressão x deformação axial, do solo ensaiado com água e licor cáustico, estão ilustradas nas Figuras 6.4 e 6.5, respectivamente. Os resultados referentes aos dois ensaios CID são apresentados na Figura 6.6.

Os coeficientes de adensamento e o valor da permeabilidade encontrada no ensaio triaxial são apresentados no Apêndice II.



$\sigma'_c = 25 \text{ kPa (a) - água}$

$\sigma'_c = 400 \text{ kPa - licor}$

Figura 6.3 – Corpos de prova após a ruptura (formação de plano)

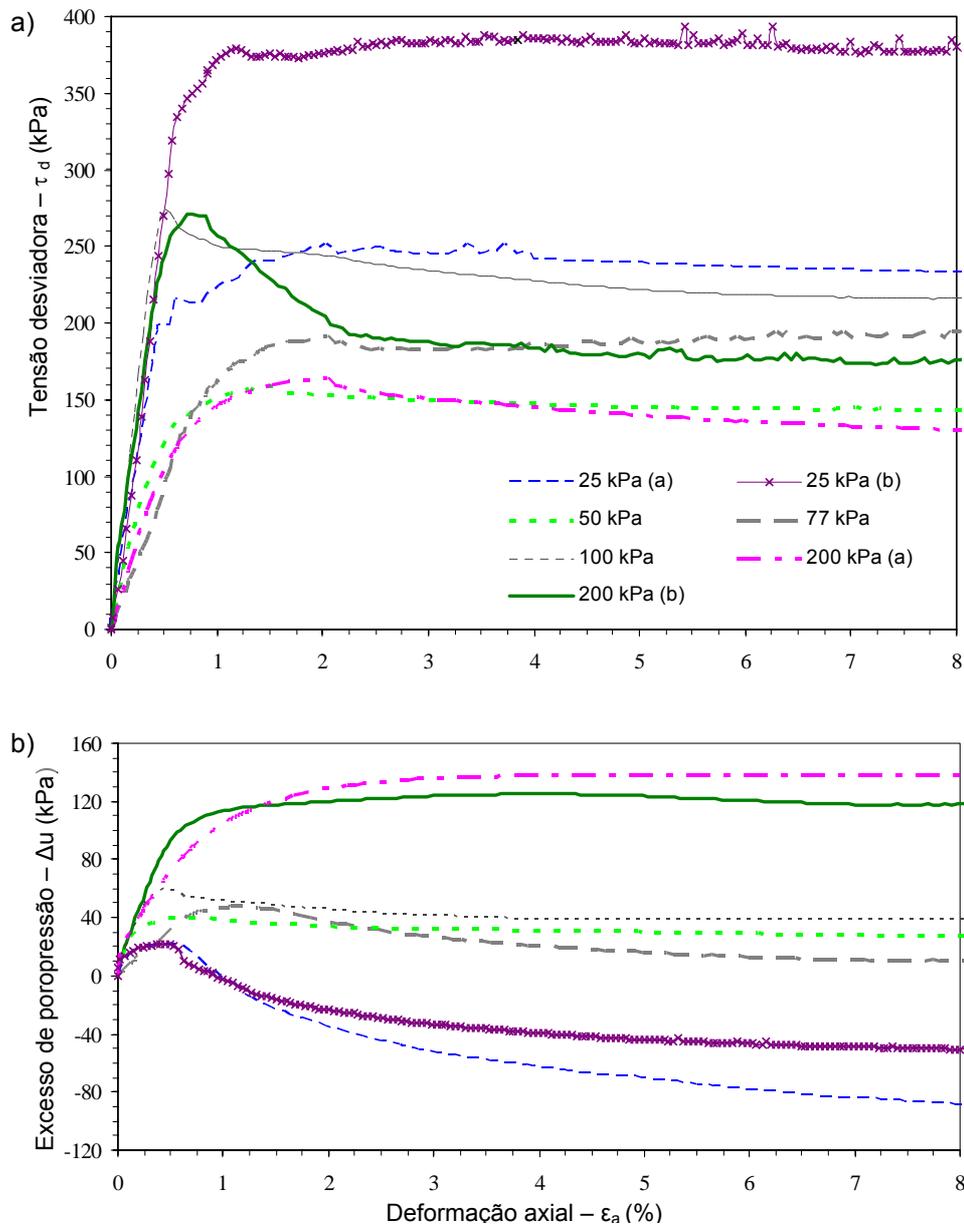


Figura 6.4 – Curvas do solo natural (ensaios CIU) a) tensão desviadora x deformação axial; b) excesso de poropressão x deformação axial

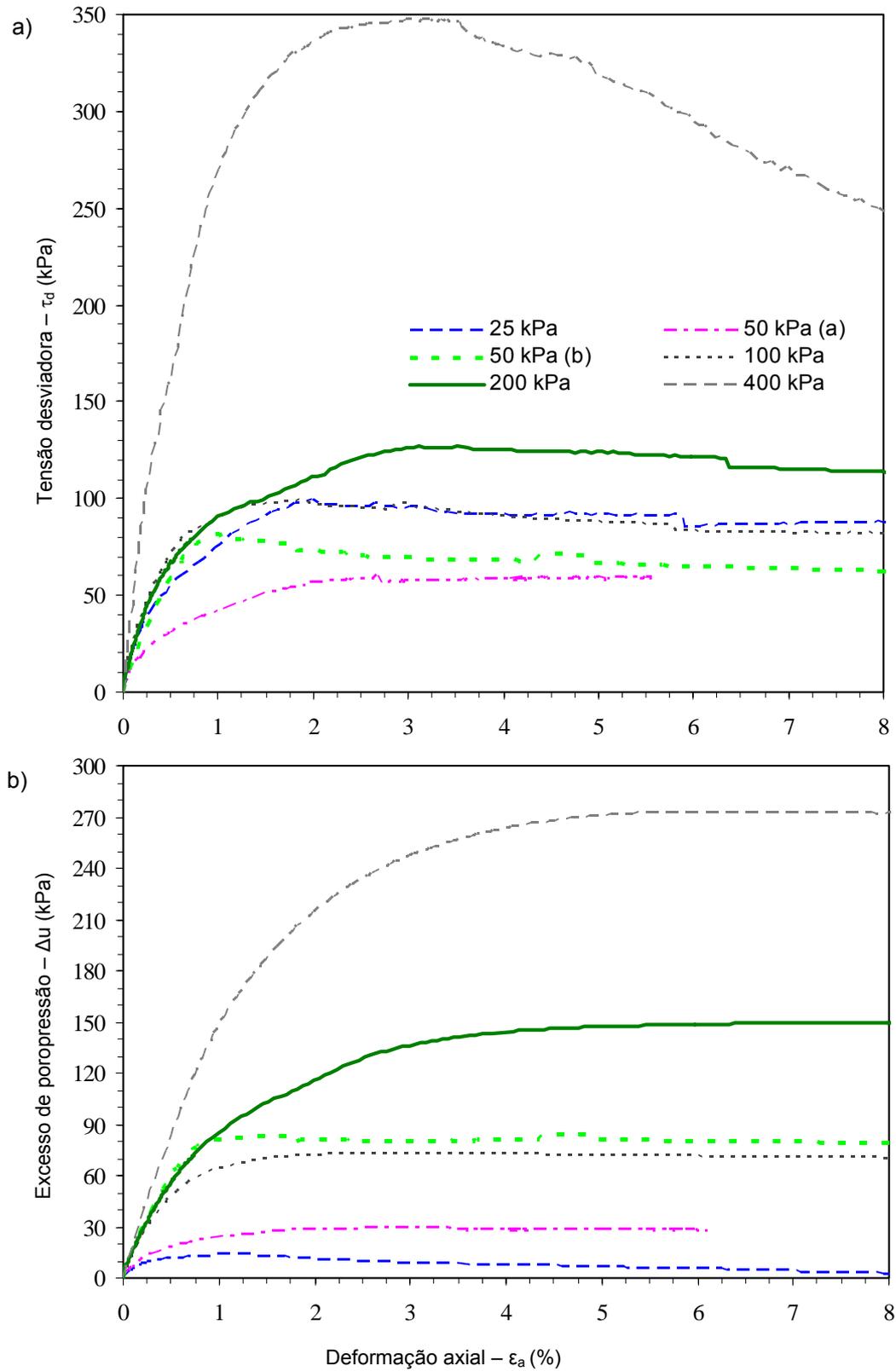


Figura 6.5 - Curvas do solo contaminado (ensaios CIU) a) tensão desviadora x deformação axial; b) excesso de poropressão x deformação axial

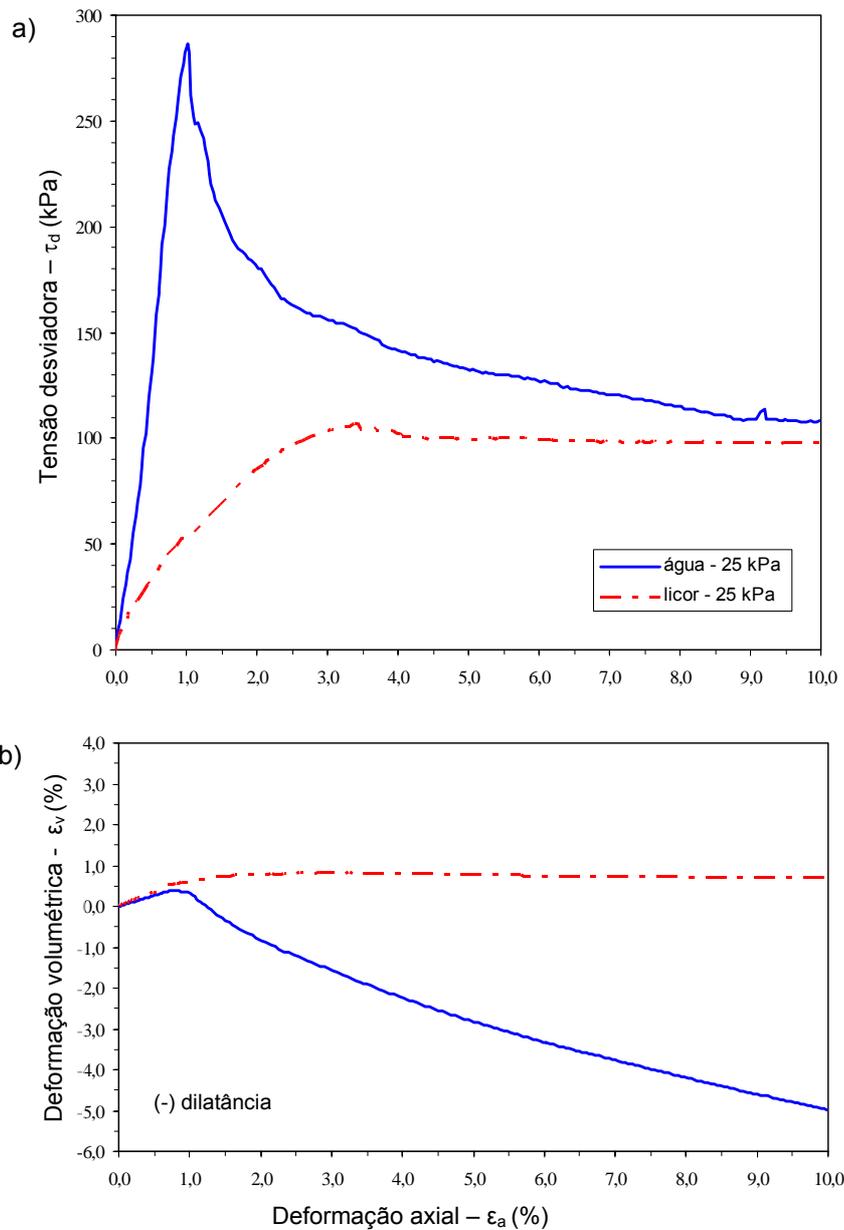


Figura 6.6 – Curvas do solo residual natural e contaminado (ensaios CID) a) tensão desviadora x deformação axial; b) deformação volumétrica x deformação axial

### 6.2.2.3.

#### Trajétórias de tensões efetivas e envoltórias de resistência

No caso de formação de plano na ruptura, a poropressão medida não representa necessariamente a que está atuando no plano de cisalhamento formado, já que a medida desta é realizada apenas na base do corpo de prova. Tentando minimizar o erro no traçado das trajetórias de tensões efetivas ocasionado pela medida de poropressão após a ruptura, estas foram plotadas

até valores de  $p'$  e  $q$  correspondentes, a no máximo, a uma deformação de 4% (valor um pouco acima das deformações obtidas na ruptura).  $p'$  e  $q$  são definidos pelas expressões:

$$p' = (\sigma'_v + \sigma'_h)/2 \quad \text{e} \quad q = (\sigma'_v - \sigma'_h)/2$$

Para obtenção das envoltórias correspondentes ao estado crítico, interpolou-se a linha K a partir das trajetórias de tensões efetivas dos ensaios CIU e do ponto de “resistência última”, obtido no ensaio triaxial CID. Os coeficientes lineares ( $d'$ ) e angulares ( $\theta'$ ) da linha K foram relacionados com os parâmetros de ruptura pelo critério de Mohr-Coulomb, conforme as expressões abaixo, obtendo-se assim o intercepto de coesão efetiva ( $c'$ ) e o ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ).

$$\text{tg } \theta' = \text{sen } \phi' \quad \text{e} \quad c' = d'/\text{cos } \phi'$$

As trajetórias de tensões efetivas, as envoltórias de resistência e os valores de  $c'$  e  $\phi'$  obtidos a partir dos ensaios com água e com licor são apresentados nas Figuras 6.7 e 6.8, respectivamente.

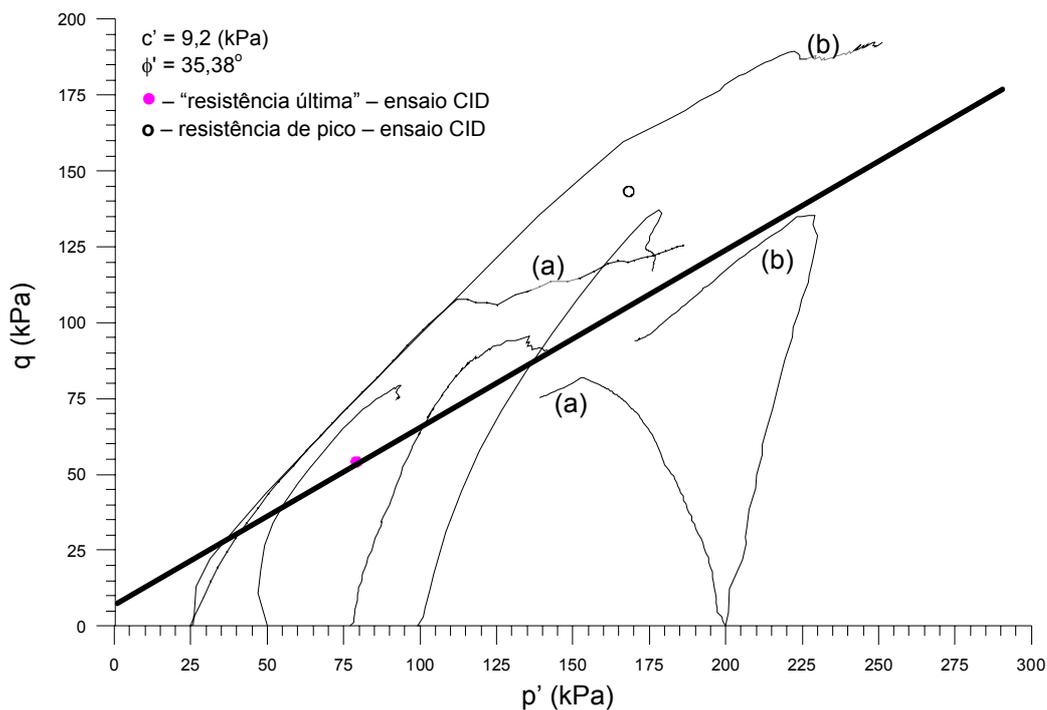


Figura 6.7 – Trajetórias de tensões efetivas (CIU) e envoltória de resistência (estado crítico) – água

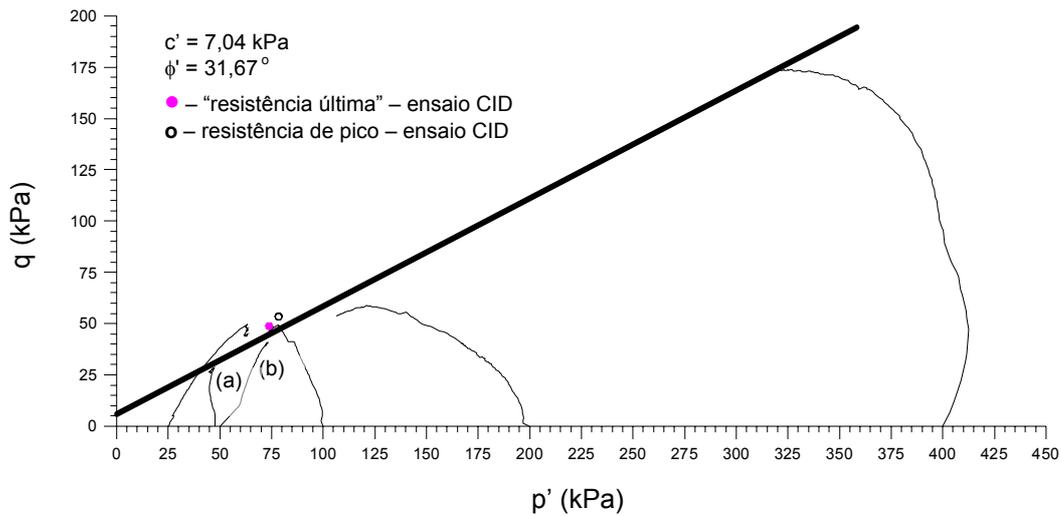


Figura 6.8 – Trajetórias de tensões efetivas (CIU) e envoltória de resistência (estado crítico) – licor cáustico

#### 6.2.2.4. Dados na ruptura

Os valores da tensão desviadora, deformação axial, excesso de poropressão, coeficiente de poropressão e os valores de  $p'$  e  $q$  na ruptura, nos ensaios CIU, são listados na Tabela 6.7, assim como o valor da tensão desviadora para uma deformação axial de 8%. Constam na Tabela 6.8, dados na ruptura e o valor da tensão desviadora para uma deformação de 10% dos ensaios CID. Foi assumida que a ruptura ocorreu ao ser atingida a tensão desviadora máxima nos dois tipos de ensaio.

Tabela 6.7 – Dados na ruptura e tensão desviadora para uma deformação axial de 8%. Ensaios CIU realizados com água e licor

| Fluido de saturação | $\sigma'_c$ (kPa) | $\tau_{dr}$ (kPa) | $\epsilon_{ar}$ (%) | $\Delta u_r$ (kPa) | $A_r$ | $p'_r$ (kPa) | $q_r$ (kPa) | $\tau_{d8\%}$ (kPa) |
|---------------------|-------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------|--------------|-------------|---------------------|
| Água                | 25 (a)            | 251,00            | 1,8                 | -35,51             | -0,14 | 186,10       | 125,08      | 232,90              |
|                     | 25 (b)            | 376,23            | 1,0                 | -16,21             | -0,04 | 229,30       | 188,11      | 376,23              |
|                     | 50                | 158,80            | 1,4                 | 35,72              | 0,22  | 93,70        | 79,40       | 143,47              |
|                     | 77                | 190,92            | 1,6                 | 36,64              | 0,19  | 135,80       | 95,46       | 194,00              |
|                     | 100               | 257,31            | 0,5                 | 59,00              | 0,23  | 178,10       | 137,36      | 216,00              |
|                     | 200 (a)           | 164,03            | 1,8                 | 129,23             | 0,79  | 15,80        | 82,01       | 130,53              |
|                     | 200 (b)           | 269,60            | 0,9                 | 111,57             | 0,41  | 223,22       | 34,79       | 175,70              |
| Licor               | 25                | 99,00             | 2,0                 | 10,92              | 0,11  | 63,35        | 49,50       | 87,64               |
|                     | 50 (a)            | 56,31             | 2,0                 | 28,25              | 0,50  | 47,10        | 28,16       | 52,34               |
|                     | 50 (b)            | 81,40             | 1,0                 | 82,00              | 1,01  | 123,30       | 40,68       | 62,50               |
|                     | 100               | 98,90             | 1,9                 | 71,46              | 0,72  | 122,40       | 58,56       | 82,10               |
|                     | 200               | 117,12            | 3,0                 | 136,21             | 1,16  | 78,00        | 49,44       | 113,64              |
|                     | 400               | 346,54            | 2,8                 | 248,07             | 0,72  | 330,10       | 173,27      | 248,34              |

Tabela 6.8 – Dados na ruptura e tensão desviadora para uma deformação axial de 10 %. Ensaio CID realizados com água e licor

| Fluido de saturação | $\sigma'_c$ (kPa) | $\tau_{dr}$ (kPa) | $\varepsilon_{ar}$ (%) | $\varepsilon_{vr}$ (%) | $\tau_{\sigma_{d10\%}}$ (kPa) |
|---------------------|-------------------|-------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Água                | 25                | 286,56            | 1,01                   | 0,322                  | 108,35                        |
| Licor               | 25                | 107,64            | 3,43                   | 0,823                  | 97,87                         |

### 6.2.2.5. Módulos de deformação

A Tabela 6.9 apresenta os módulos de deformação secante para 50 % da tensão desviadora máxima ( $E_{s50\%}$ ) e o tangencial inicial ( $E_{ti}$ ) referentes aos ensaios CID e CIU.

Tabela 6.9 – Módulos de deformação

| Fluido de saturação | $\sigma'_c$ (kPa) | $E_{ti}$ (MPa) |      | $E_{s50\%}$ (MPa) |       |
|---------------------|-------------------|----------------|------|-------------------|-------|
|                     |                   | CIU            | CID  | CIU               | CID   |
| Água                | 25 (a)            | 45,50          | 25   | 44,80             | 27,11 |
|                     | 25 (b)            | 56,40          | -    | 53,70             | -     |
|                     | 50                | 38,90          | -    | 31,80             | -     |
|                     | 77                | 25,00          | -    | 19,00             | -     |
|                     | 100               | 64,50          | -    | 71,50             | -     |
|                     | 200 (a)           | 25,00          | -    | 22,80             | -     |
|                     | 200 (b)           | 54,20          | -    | 40,90             | -     |
| Licor               | 25                | 2,00           | 12,5 | 11,30             | 5,89  |
|                     | 50 (a)            | 14,3           | -    | 68,70             | -     |
|                     | 50 (b)            | 16,70          | -    | 12,70             | -     |
|                     | 100               | 30,80          | -    | 17,70             | -     |
|                     | 200               | 25,00          | -    | 15,40             | -     |
|                     | 400               | 43,40          | -    | 33,40             | -     |

### 6.2.3. Análise e discussão dos resultados

#### 6.2.3.1. Ensaio com solo natural – CIU

Analisando os resultados ilustrados na Figura 6.4, observa-se que as curvas ( $\tau_d \times \varepsilon_a$ ) apresentam comportamentos distintos para os níveis de tensões efetivas de adensamento utilizados. As tensões desviadoras máximas são alcançadas para deformações axiais da ordem de 0,8 % ( $\sigma'_c = 25$  kPa (b), 100 kPa e 200 kPa (b)) e 1,7 % ( $\sigma'_c = 25$  kPa (a), 50 kPa, 77 kPa e 200 kPa (a)). As curvas ( $\tau_d \times \varepsilon_a$ ) para  $\sigma'_c = 100$  kPa e 200 kPa (b) apresentam picos bem definidos, com queda significativa de resistência após a ruptura. Estes picos não estão associados a dilatância, pois os excessos de poropressão nestes casos

foram sempre positivos. As demais curvas apresentam um pico suave, com as resistências permanecendo praticamente as mesmas após a ruptura. O solo mostra comportamento dilatante para os dois ensaios em que  $\sigma'_c = 25$  kPa e, nos ensaios onde  $\sigma'_c = 50$  kPa, 77 kPa e 100 kPa, desenvolve excessos de poropressão decrescentes logo após a ruptura para só então estabilizar.

A resistência do solo é pouco influenciada pela tensão efetiva de adensamento. Isto pode ser facilmente detectado nos gráficos tensão desviadora (na ruptura e para uma  $\varepsilon_a = 8\%$ ) *versus* tensão efetiva de adensamento (Figura 6.9). Nestes gráficos, percebe-se que não é possível estabelecer uma relação satisfatória entre as resistências e a tensão efetiva de adensamento. Na realidade, nota-se a tendência da resistência diminuir com o aumento da tensão confinante, o contrário do que se esperaria em um solo sedimentar, por exemplo.

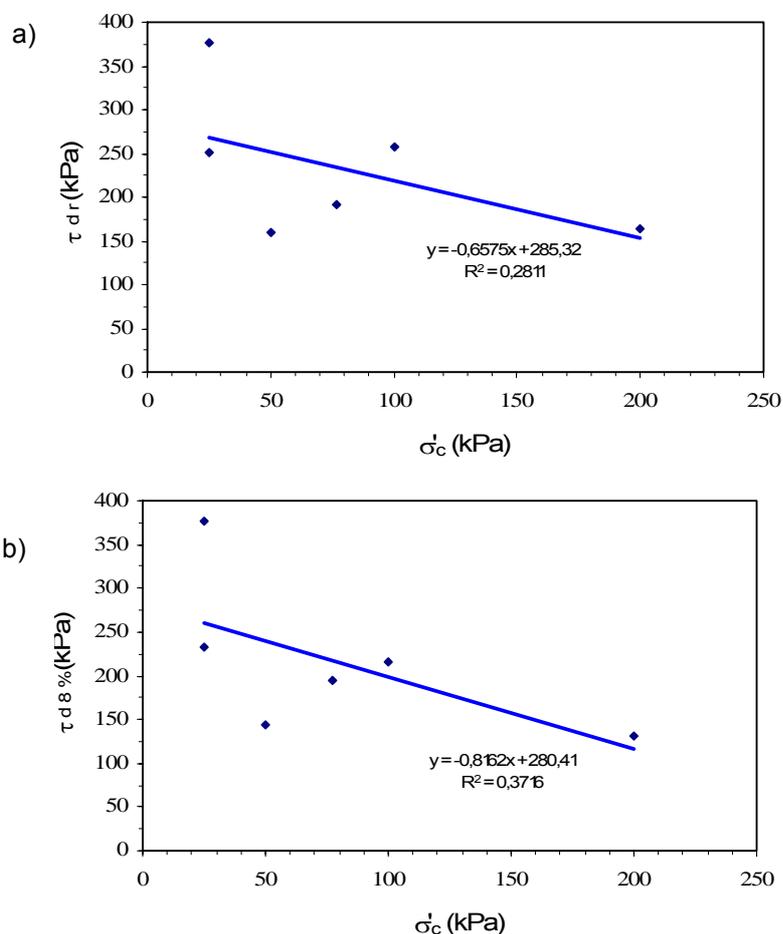


Figura 6.9 – Relação entre: a) tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento (Ensaio com água - CIU)

A tensão de escoamento para solos residuais, como mencionado na revisão bibliográfica, é consequência da história de intemperismo e resulta

principalmente de dois fatores: ligações entre partículas e índice de vazios. Logo, para valores de tensão efetiva de adensamento inferiores à tensão de escoamento, espera-se que haja uma grande influência destes dois componentes no comportamento do solo. A tensão de escoamento encontrada para o solo residual no estado natural foi de 600 kPa, valor este acima das tensões de adensamento utilizadas nos ensaios triaxiais. Isto possivelmente justifica o fato de não se estabelecer uma relação entre as tensões desviadoras (na ruptura e para uma  $\varepsilon_a = 8\%$ ) e as tensões efetivas de adensamento.

A Figura 6.10 mostra a relação entre os índices de vazios (inicial e após o adensamento) e as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação axial de 8%). Observa-se que, conforme seria de se esperar, as resistências tendem a aumentar com a diminuição do índice de vazios. Nota-se que há uma melhor correlação entre os índices de vazios e a tensão desviadora correspondente à deformação axial de 8%.

O índice de vazios variou pouco na fase de adensamento. Nos ensaios onde  $\sigma'_c = 25$  kPa este permaneceu o mesmo, havendo maior variação nos ensaios com  $\sigma'_c = 200$  kPa (decréscimo de cerca de 5%). Para as demais tensões efetivas de adensamento, houve variação de, no máximo, 1,5% do índice de vazios. Isto mostra que as tensões efetivas afetaram pouco a estrutura do solo e justifica as boas correlações obtidas nos gráficos da Figura 6.10.

Apesar de não se obter uma relação satisfatória entre a tensão efetiva de adensamento e as tensões desviadoras (máxima e para uma deformação axial de 8%), percebe-se, por meio dos gráficos excesso de poropressão x deformação axial, que, apesar das tensões efetivas de adensamento utilizadas estarem bem abaixo da de escoamento, o aumento destas faz com que o solo tenda a ter um comportamento de contração cada vez mais acentuado.

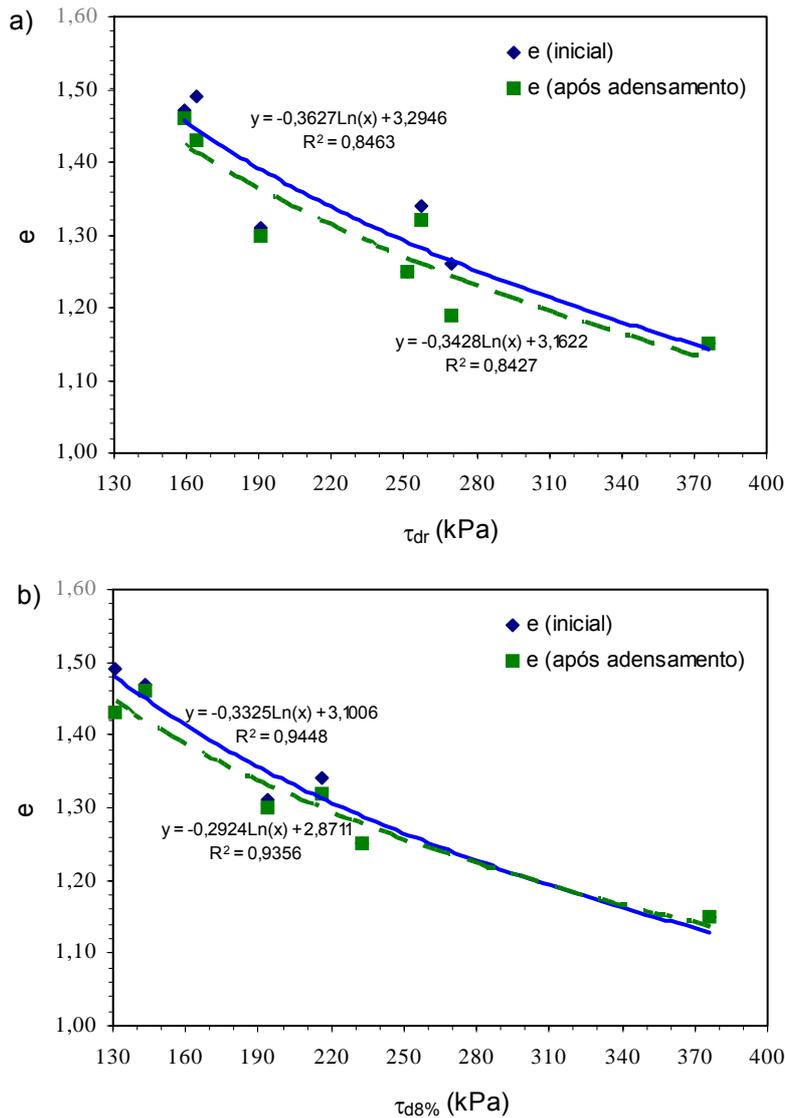


Figura 6.10 – Relação entre: a) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora na ruptura; b) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % (ensaios com água - CIU)

As trajetórias de tensões efetivas para todos os ensaios, com exceção apenas de  $\sigma'_c = 200$  kPa (a), curvam-se para direita, comportamento este semelhante ao de solos sedimentares pré-adensados (Figura 6.7). Para o ensaio onde  $\sigma'_c = 25$  kPa (b), observa-se que a resistência suportada pelo solo é maior que nos demais. Isto se deve possivelmente a três fatores: a) para este nível de tensão efetiva de adensamento, a estrutura do solo não é afetada (não houve alteração no índice de vazios na fase de adensamento); b) o índice de vazios inicial neste ensaio é menor que nos demais; c) o excesso de poropressão gerado é negativo (comportamento dilatante). Este último fator está diretamente ligado à estrutura.

As trajetórias de tensões efetivas (exceto para  $\sigma'_c = 200$  kPa) tendem a aproximar-se da envoltória de cima para baixo, sendo este comportamento também reflexo da estrutura do solo. Com o aumento da tensão efetiva de adensamento, espera-se que haja a quebra progressiva das ligações entre as partículas, implicando na diminuição da influência da estrutura no comportamento do solo, de maneira que esta se torne praticamente nula ao ser atingida a tensão de escoamento. Obteve-se como parâmetros de resistência um intercepto de coesão efetiva no valor de 9,2 kPa (reflexo exclusivamente da estrutura do solo) e um ângulo de atrito interno efetivo de 35,38°.

Outra alternativa para o traçado da envoltória seria realizar ensaios com tensões efetivas superiores as utilizadas, inclusive maiores que a tensão de escoamento. Sandroni (1974), ao estudar o comportamento de solos residuais, considerou a envoltória de resistência curva até próxima da tensão de escoamento, e acima desta admitiu o comportamento semelhante ao de solos sedimentares normalmente adensados. Esta curvatura da envoltória é devido, principalmente, à presença de cimentações. Desta forma, os ensaios aqui realizados estariam na parte curva da envoltória, caso esta fosse traçada como sugerido por Sandroni (1974). Ao traçar a envoltória linear e abaixo das resistências alcançadas nos ensaios realizados com as tensões efetivas de adensamento menores, está se desprezando a resistência alcançada por este solo devido à sua estrutura.

### 6.2.3.2.

#### Ensaio com solo contaminado – CIU

Os resultados apresentados na Figura 6.5 mostram que as curvas ( $\tau_d \times \epsilon_a$ ) para  $\sigma'_c = 50$  kPa, 100 kPa e 200 kPa apresentam picos suaves e, após a ruptura, as tensões desviadoras diminuem um pouco, formando em seguida um patamar que coincide com a estabilização dos excessos de poropressão. O ensaio onde  $\sigma'_c = 25$  kPa também apresenta um pico suave, porém, após a ruptura, o excesso de poropressão começa a decrescer e tender a zero. Já para  $\sigma'_c = 400$  kPa não há estabilização da tensão desviadora após a ruptura, que tende a decrescer até a deformação axial máxima atingida, que é de 8 %, quando foi interrompido o ensaio. Os excessos de poropressão gerados durante o cisalhamento são sempre positivos. A ruptura é atingida para deformações axiais entre 2 % e 3 %, exceto para  $\sigma'_c = 50$  kPa (b) que rompeu a 1 %.

A Figura 6.11 mostra que o solo contaminado apresenta uma boa correlação entre o índice de vazios após o adensamento e as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação de 8 %). No entanto, não se obtém uma correlação satisfatória entre as resistências e o índice de vazios inicial. Observa-se, na Tabela 6.5, que o índice de vazios, na fase de adensamento do ensaio, varia cerca de 2 % para  $\sigma'_c = 25$  kPa e 50 kPa (a), 3 % para  $\sigma'_c = 50$  kPa (b) e 100 kPa, 13,70 % para  $\sigma'_c = 200$  kPa e 21,19 % para  $\sigma'_c = 400$  kPa. Estas variações são superiores as obtidas nos ensaios realizados com água, e se devem, principalmente, ao efeito dispersivo do licor, que afeta a estrutura do solo tornando-o mais compressível. Isto faz com que a resistência torne-se função, principalmente, da tensão efetiva de adensamento, e não do índice de vazios como nos ensaios realizados com água.

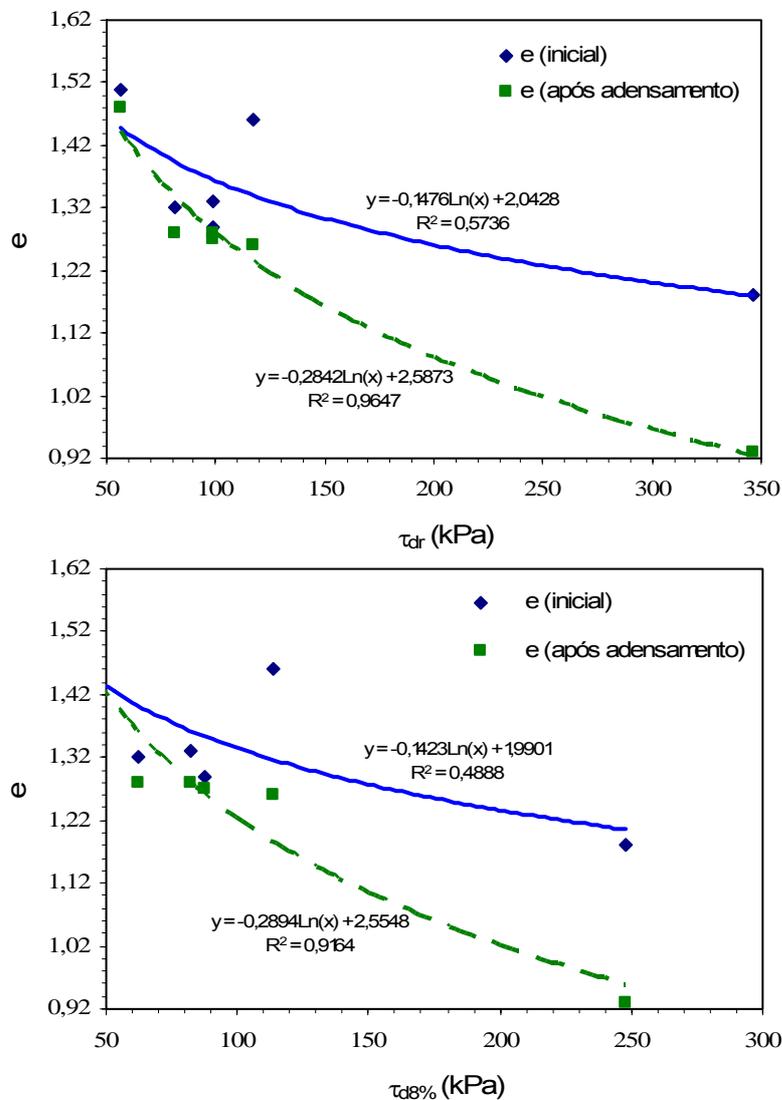


Figura 6.11 - Relação entre: a) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora na ruptura; b) índice de vazios (inicial e após o adensamento) e tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % (ensaios com licor - CIU)

As relações obtidas entre as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação axial de 8 %) e a tensão efetiva de adensamento são expostas na Figura 6.12. Observa-se que há uma tendência da resistência aumentar com o crescimento da tensão efetiva de adensamento. Para a tensão efetiva de adensamento igual a 25 kPa, percebe-se uma grande influência das ligações interpartículas do solo e do índice de vazios (variou pouco na fase de adensamento). Não foi realizado ensaio de adensamento edométrico para o solo contaminado, mas espera-se que a tensão de escoamento seja inferior à obtida no ensaio realizado com água devido à ação do licor na estrutura do solo.

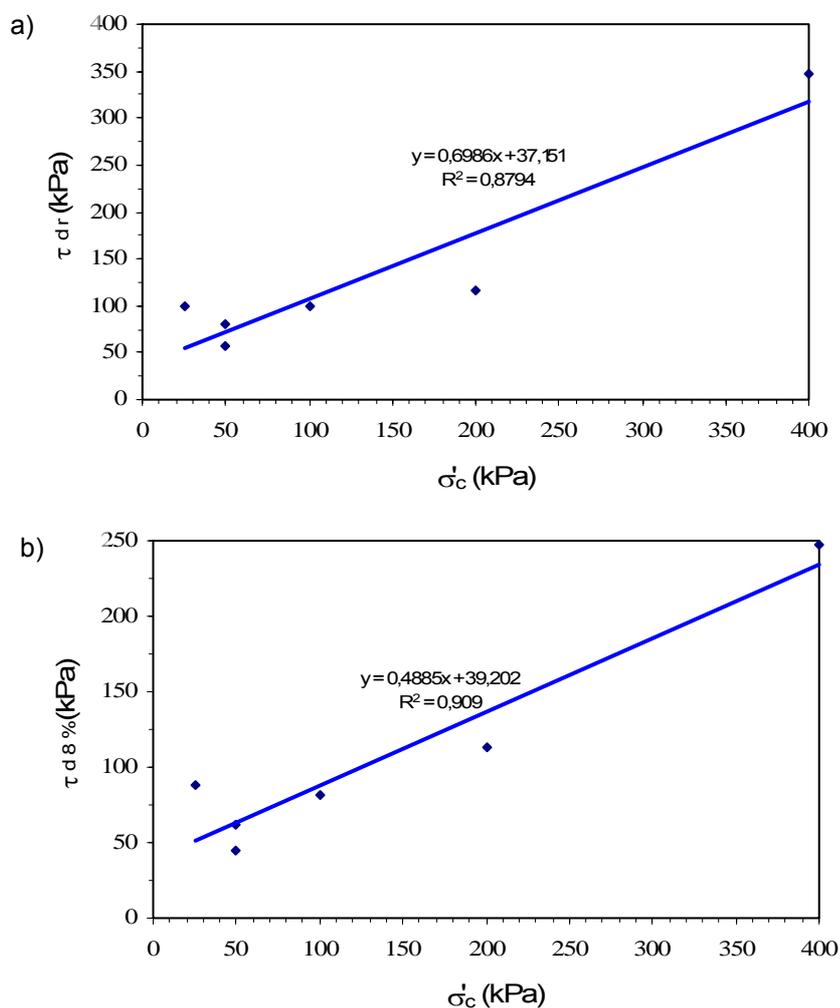


Figura 6.12 – Relação entre: a) tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento (Ensaio com licor - CIU)

As trajetórias de tensões efetivas correspondentes a  $\sigma'_c = 25$  kPa e 50 kPa (b) curvam-se para direita (ver Figura 6.8). A trajetória referente a  $\sigma'_c =$

50 kPa (a) anda um pouco para esquerda, mas sobe praticamente em linha reta até atingir a envoltória de resistência. Já as trajetória de  $\sigma'_c = 100$  kPa, 200 kPa e 400 kPa caminham para a esquerda, sendo que para  $\sigma'_c = 400$  kPa a trajetória curva-se para a direita até uma deformação axial de 0,6 %, para só então andar para a esquerda. Estas três últimas tensões efetivas de adensamento citadas apresentam trajetórias de tensões efetivas bastante similares a de solos normalmente adensados. Não se sabe quando o solo começa a se comportar desta maneira, pois a tensão de escoamento do solo contaminado não foi determinada.

Da mesma forma que no solo residual, poderia-se traçar uma envoltória curva para as tensões efetivas abaixo da tensão de escoamento e linear acima desta. Aparentemente, a tensão de escoamento está entre as tensões efetivas de 100 kPa e 200 kPa.

Os valores de  $c'$  e  $\phi'$  encontrados foram, respectivamente, 7,0 kPa e  $31,67^\circ$ .

### 6.2.3.3. Comparação dos resultados

Para melhor visualizar e entender a influência do licor no comportamento do solo, neste item, serão comparados, os resultados dos ensaios realizados com solo no estado natural e contaminado, mesmo isto já tendo sido feito separadamente ao longo da apresentação dos resultados.

### Características de compressibilidade

A Figura 6.13 mostra a relação entre o índice de vazios normalizado, ao ser dividido pelo índice de vazios inicial, *versus* tensão vertical efetiva de adensamento dos ensaios triaxiais (CIU e CID), bem como do único ensaio de adensamento executado.

Ao causar dispersão no solo, o licor afeta sua estrutura tornando-o mais compressível, e assim mais suscetível à atuação da tensão efetiva de adensamento (ver variação do índice de vazios na Tabela 6.5 e os resultados da figura a seguir).

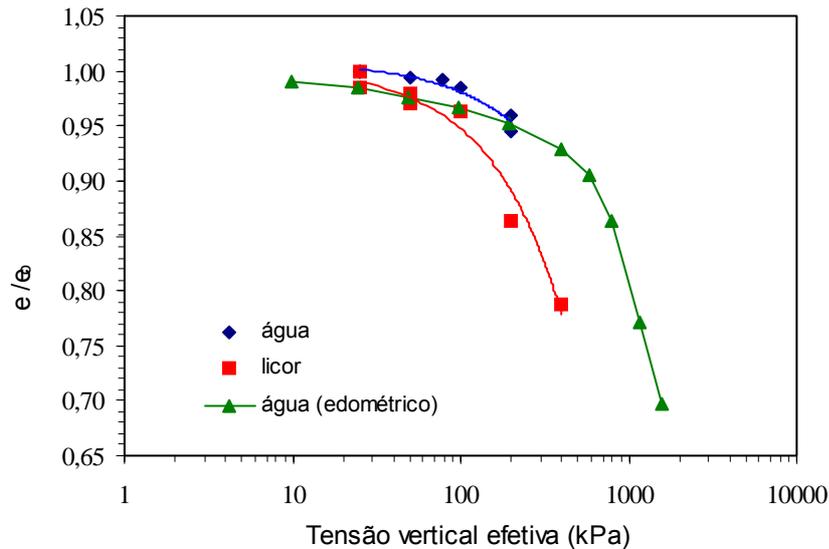


Figura 6.13 – Comparação das curvas índice de vazios normalizado x tensão vertical efetiva

## Ensaio CIU

### *Comportamento tensão – deformação*

De maneira geral, existe uma tendência de redução da tensão desviadora (máxima e para uma deformação axial de 8 %) e da deformação axial na ruptura quando se passa do solo natural para o contaminado. As alterações causadas pelo licor no solo serão avaliadas para cada nível de tensão efetiva de adensamento.

*Tensão efetiva de adensamento: 25 kPa*

Observando a Figura 6.14, percebe-se que o comportamento tensão-deformação é praticamente o mesmo nos dois ensaios realizados com água, sendo que para  $\sigma'_c = 25$  kPa (b) a tensão desviadora alcançada é maior, devido ao fato do corpo de prova utilizado neste ensaio ter um índice de vazios menor. Nos dois ensaios o solo comportou-se de maneira dilatante, refletindo a forte influência da estrutura na resistência.

A tensão desviadora atingida no ensaio com licor corresponde a apenas 39 % da menor tensão alcançada nos ensaios efetuados com água. O excesso de propressão gerado pelo solo contaminado é positivo, mas, após a ruptura, diminui e começa a tender a zero.

Observa-se ainda, nesta figura, que o solo contaminado apresenta uma menor rigidez, o que está ligado a um aumento da compressibilidade do solo após a contaminação.

A diminuição da rigidez e da resistência é causada pela quebra e/ou enfraquecimento das ligações interpartículas. Este comportamento do solo está coerente com os dados obtidos nas análises químicas, em que se observa um aumento da capacidade de troca catiônica no solo contaminado, e com a análise física, que indica o poder dispersivo do licor. Os ensaios de difração por raios-X, análise termodiferencial e ataque sulfúrico, indicaram que o licor atua realmente como agente dispersivo, não provocando amorfização da fração argila do solo em temperatura ambiente.

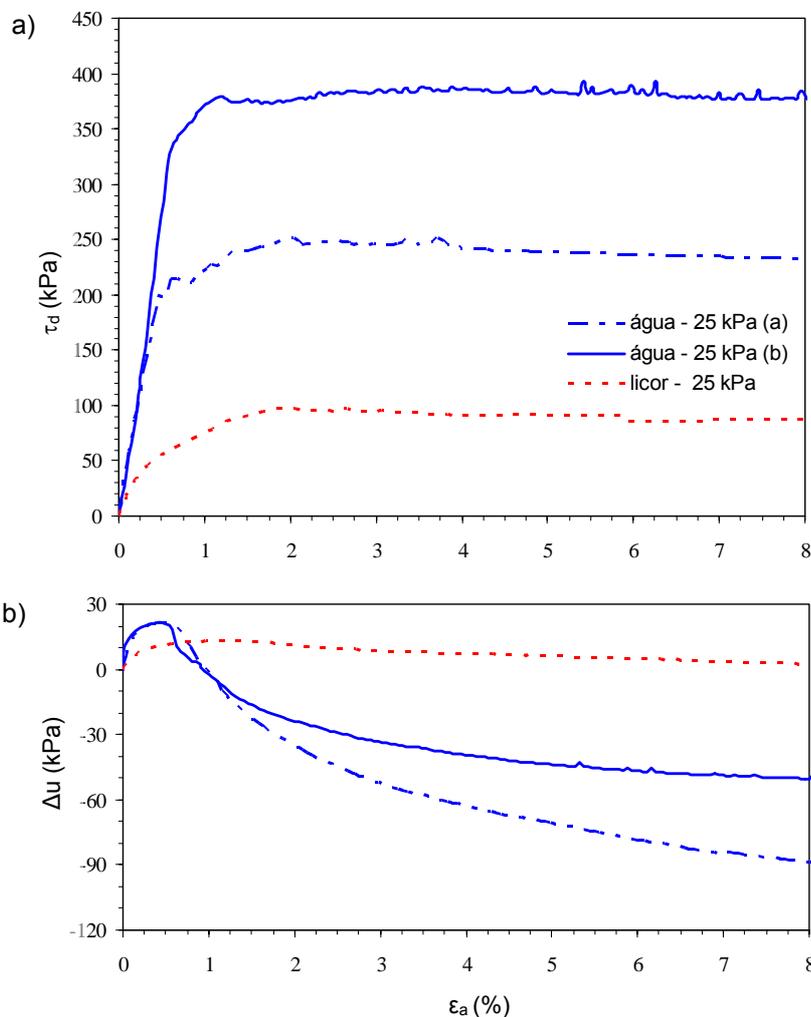


Figura 6.14 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaio realizado com água e licor para  $\sigma'_c = 25$  kPa (CIU)

*Tensão efetiva de adensamento: 50 kPa*

Nos ensaios onde  $\sigma'_c = 50$  kPa com solo contaminado, observa-se que, apesar das curvas apresentarem comportamentos distintos, elas tendem para uma mesma tensão desviadora após a ruptura. Apresentou maior resistência, dentre os solos contaminados, o ensaio em que o corpo de prova tinha o menor índice de vazios inicial. Isto mostra que existe influência do índice de vazios no comportamento do solo contaminado, mesmo que menor que a exercida pela tensão efetiva de adensamento (ao menos para este nível de tensão) (Figura 6.15 (a)).

A tensão desviadora máxima suportada pelo solo contaminado corresponde a 44 % da alcançada pelo solo natural, com este último apresentando comportamento mais rígido.

Os excessos de poropressão são todos positivos, com comportamentos mais próximos do que os obtidos nos ensaios onde  $\sigma'_c = 25$  kPa. (Figura 6.15 (b)).

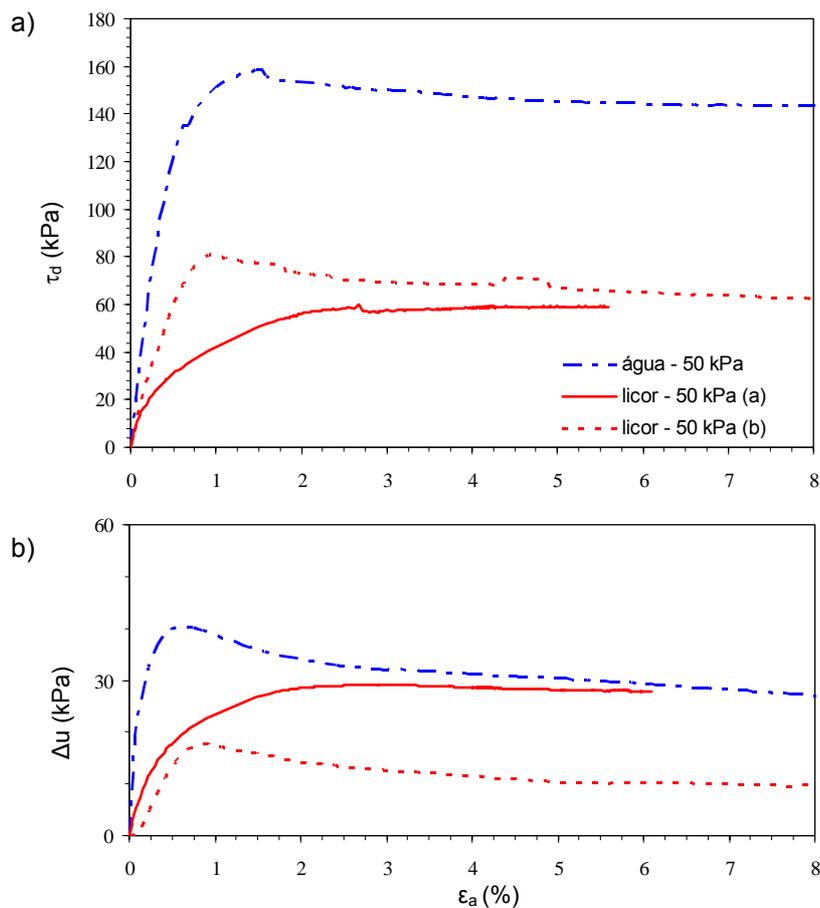


Figura 6.15 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaio realizados com água e licor para  $\sigma'_c = 50$  kPa (CIU)

*Tensão efetiva de adensamento: 100 kPa*

No ensaio com tensão efetiva de 100 kPa utilizando solo contaminado, a tensão desviadora alcançada para uma deformação axial de 8 % (quando já se tem um patamar) equivale a 38 % da obtida pelo solo natural. A ruptura é atingida primeiro pelo solo ensaiado com água, sendo este fato observado também para as demais tensões efetivas de adensamento. O excesso de poropressão, gerado pelo solo natural, é inferior ao gerado pelo solo contaminado, mas em ambos os casos há estabilização deste após a ruptura. O solo natural mostra comportamento mais rígido devido ao efeito de estrutura, preservada neste nível de tensão efetiva (Figura 6.16).

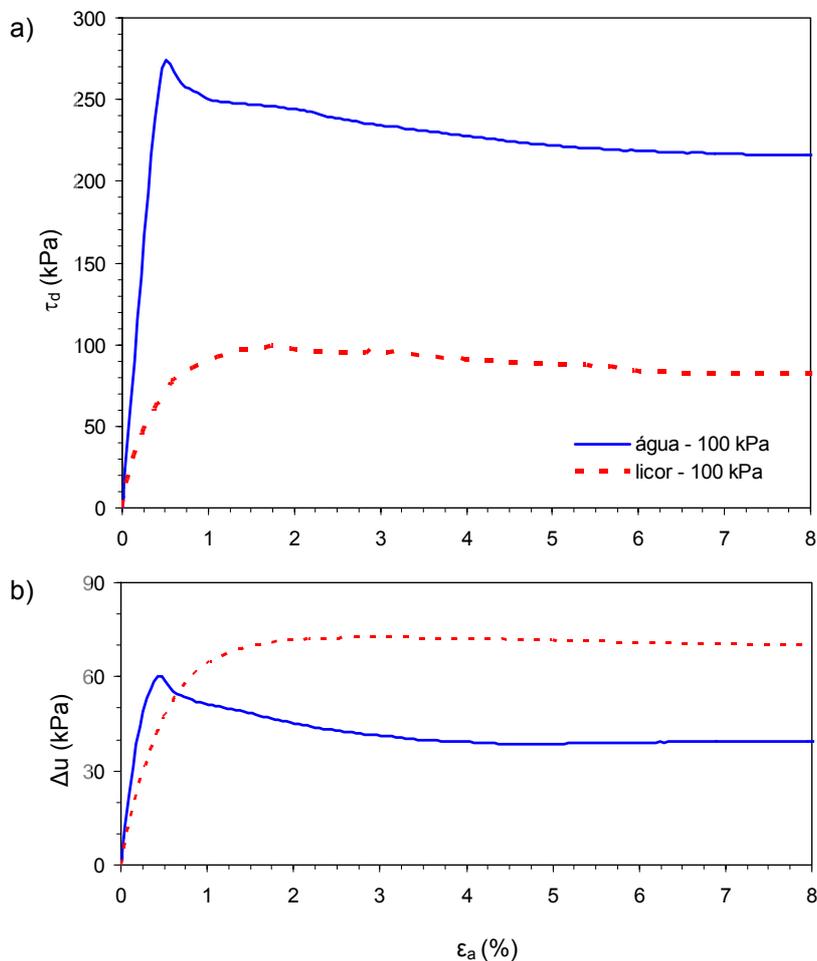


Figura 6.16 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaios realizados com água e licor para  $\sigma'_c = 100$  kPa (CIU)

*Tensão efetiva de adensamento: 200 kPa*

Para  $\sigma'_c = 200$  kPa, observa-se ainda o efeito do índice de vazios, seja inicial ou após o adensamento, na resistência obtida pelo solo natural. O ensaio (b) apresenta maior resistência que o ensaio (a), que possui um maior índice de vazios. Esta tensão de adensamento causa uma variação de, no máximo, 5,5 % no índice de vazios dos ensaios realizados com água, enquanto que nos ensaios com licor esta variação é de cerca de 14 % (esta diferença entre a variação do índice de vazios nos ensaios realizados com água e nos efetuados com licor, também pode ser observada na Figura 6.13). Nestes ensaios, as tensões desviadoras após a ruptura tendem a valores mais próximos que para as demais tensões efetivas de adensamento. Os excessos de poropressão gerados nos três ensaios são bastante similares (Figura 6.17).

Nota-se que, para este nível de tensão, que a tensão efetiva de adensamento passa a ter uma maior influência no comportamento do solo natural. À medida que se aumenta a tensão efetiva de adensamento, cresce a quebra das ligações entre os grãos, o que faz com que haja uma diminuição da influência da estrutura no comportamento tensão-deformação e excesso de poropressão-deformação (Figura 6.17).

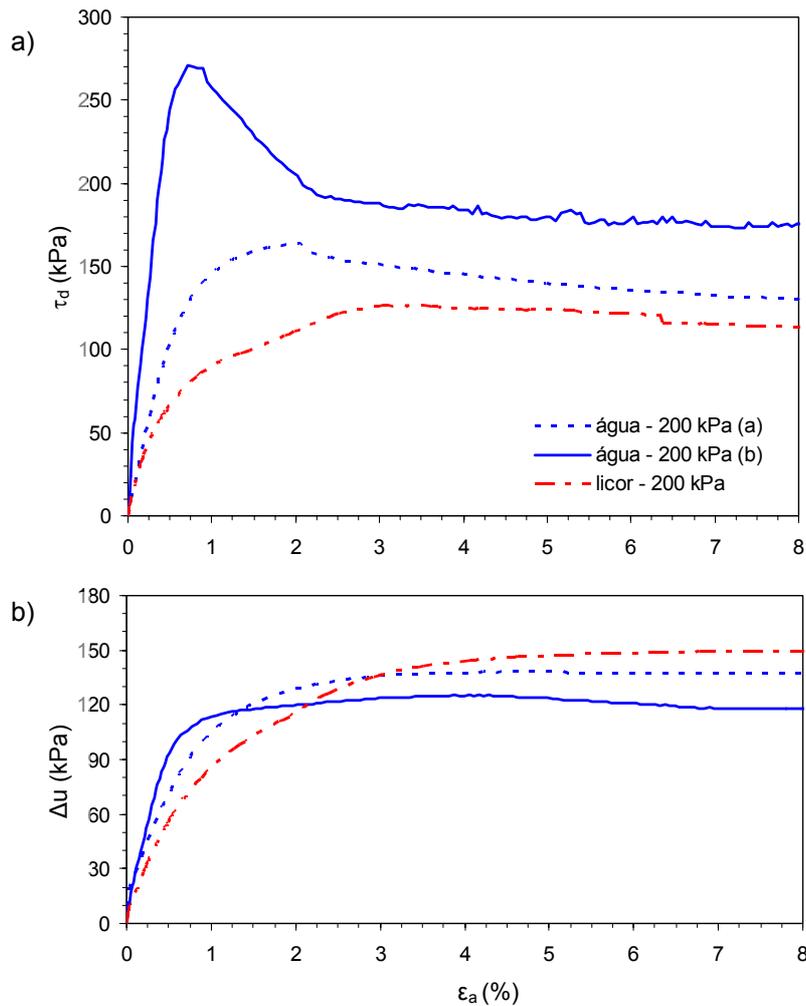


Figura 6.17 – Comparação entre as curvas: a) tensão desviadora x deformação axial ; b) excesso de poropressão x deformação axial. Ensaio realizado com água e licor para  $\sigma'_c = 200$  kPa (CIU)

### **Trajétórias de tensões efetivas**

As trajetórias de tensões efetivas refletem as mudanças que ocorrem na estrutura do solo quando contaminado com licor. Enquanto há uma forte influência da estrutura nos caminhos de tensões efetivas até 100 kPa nos ensaios realizados com água (apresentam comportamento semelhante a de solos sedimentares pré-adensados), nos ensaios com licor nota-se esta influência de maneira clara apenas para  $\sigma'_c = 25$  kPa. As trajetórias de tensões efetivas serão analisadas para cada nível de tensão efetiva de adensamento.

*Tensão efetiva de adensamento: 25 kPa*

Os comentários feitos a seguir são baseados na Figura 6.18.

Tanto nos ensaios realizados com água como no efetuado com licor, o solo apresenta trajetórias de tensões efetivas semelhantes a de um solo sedimentar pré-adensado, devido às ligações interpartículas que são pouco afetadas.

Ao comparar as trajetórias de tensões efetivas dos ensaios realizados com água, observa-se que os maiores valores de  $p'$  e  $q$  são alcançados pelo solo em que  $\sigma'_c = 25$  kPa (b), onde se tem o menor índice de vazios inicial e, conseqüentemente, uma maior dilatância.

O ensaio realizado com solo contaminado atinge valores de  $p'$  e  $q$  inferiores aos obtidos nos ensaios com água, isto ocorre devido ao maior índice de vazios do corpo de prova utilizado neste ensaio e da influência do licor cáustico na estrutura.

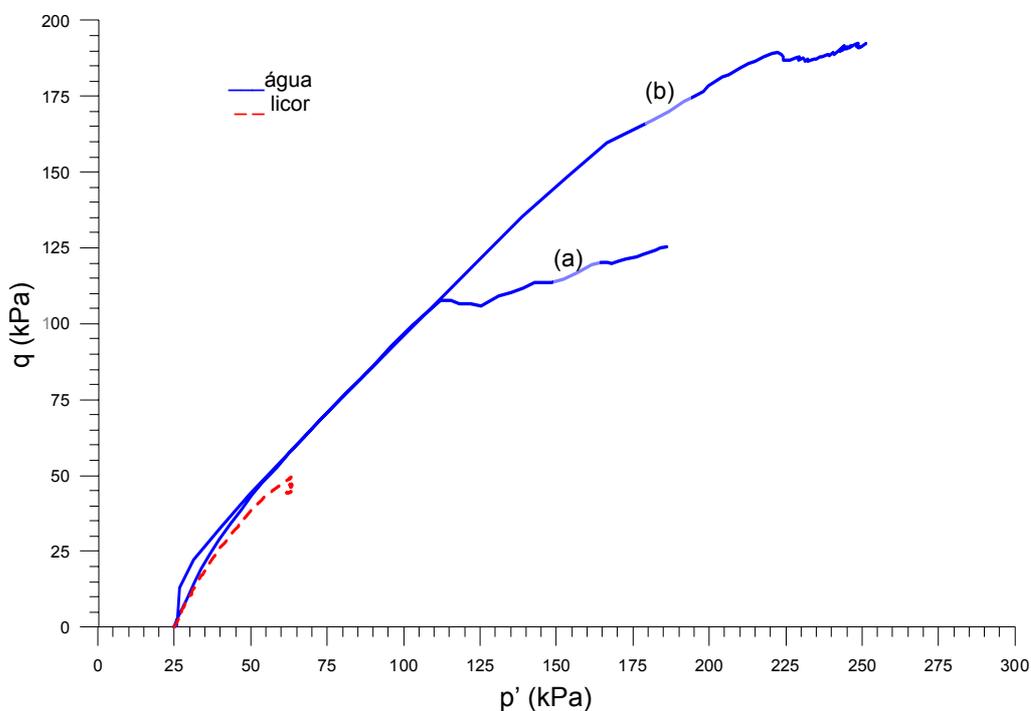


Figura 6.18 – Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaios realizados com água e licor para  $\sigma'_c = 25$  kPa (CIU)

*Tensão efetiva de adensamento: 50kPa*

Analisando as trajetórias de tensões efetivas dos dois ensaios realizados com licor, percebe-se que, para  $\sigma'_c = 50$  kPa (b), o solo atinge maiores valores de  $p'$  e  $q$  por apresentar um menor índice de vazios inicial (Figura 6.19).

Mesmo tendo um índice de vazios inicial superior a de um dos ensaios realizados com licor ( $\sigma'_c = 50$  kPa (b)), o solo no estado natural chega a maiores valores de  $p'$  e  $q$ .

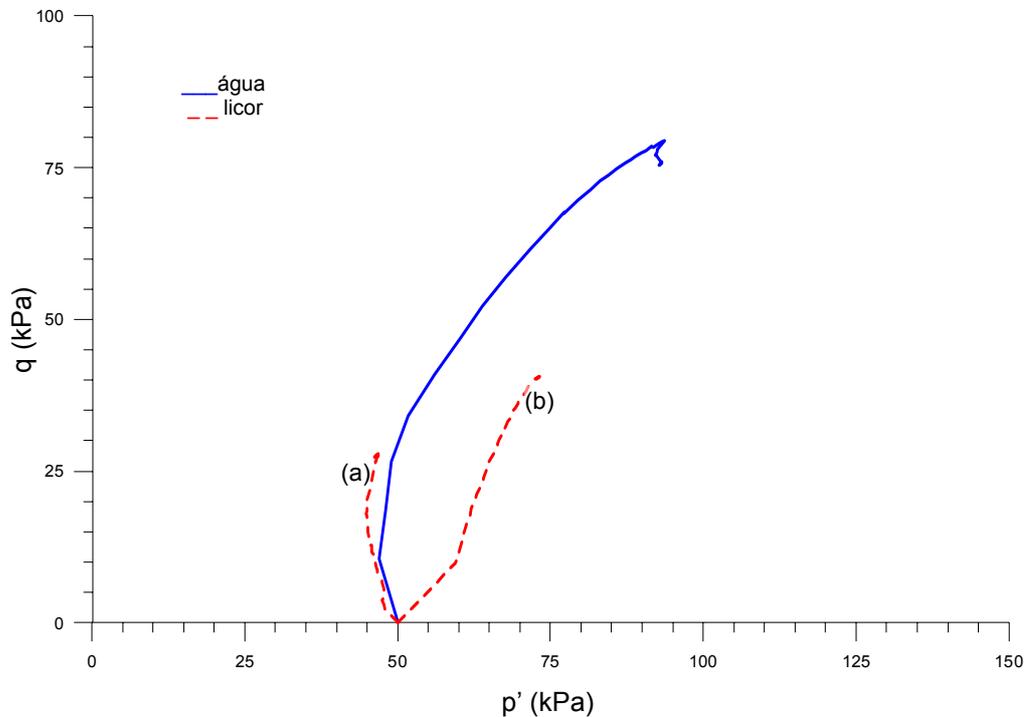


Figura 6.19 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaio realizado com água e licor para  $\sigma'_c = 50$  kPa (CIU)

#### *Tensão efetiva de adensamento: 100kPa*

Para este nível de tensão efetiva, nota-se, de maneira clara, a influência do licor no comportamento do solo. Apesar de apresentarem índices de vazios iniciais bastante próximos (água – 1,34 e licor – 1,33), a trajetória de tensões efetivas no ensaio efetuado com licor tem aspecto semelhante à de um solo sedimentar normalmente adensado, enquanto a do solo no estado natural se assemelha com a de um solo sedimentar pré-adensado (Figura 6.20).

É interessante notar que a partir desta tensão efetiva de adensamento, o comportamento do solo contaminado é influenciado basicamente pela tensão efetiva de adensamento.

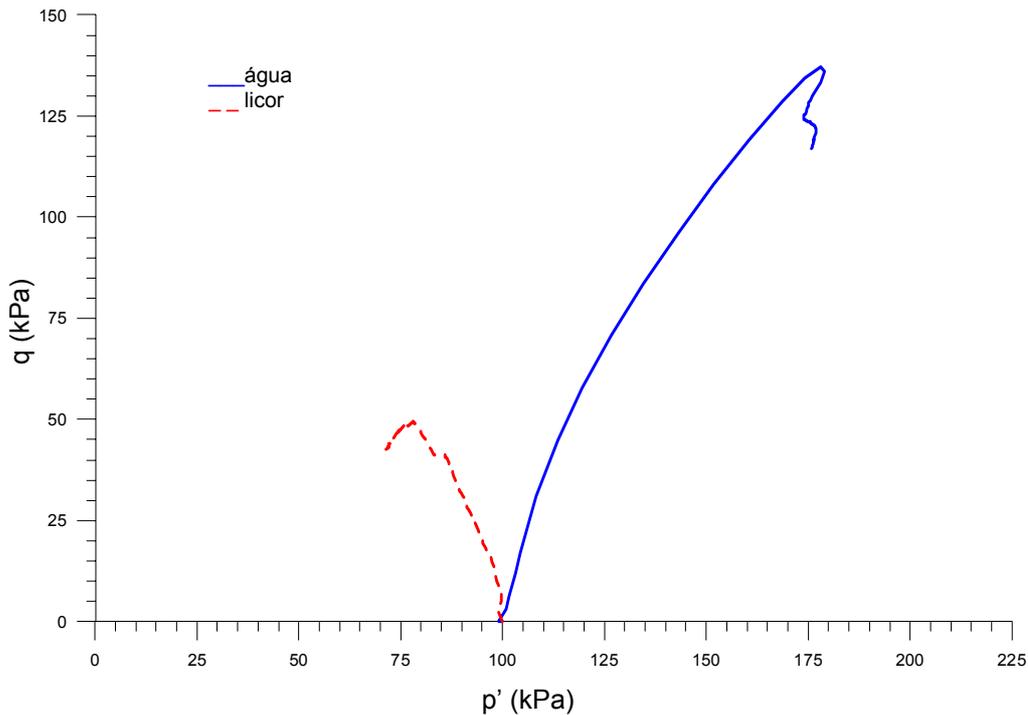


Figura 6.20 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaio realizado com água e licor para  $\sigma'_c = 100$  kPa (CIU)

*Tensão efetiva de adensamento: 200kPa*

As trajetórias de tensões efetivas nos ensaios realizados com água, para  $\sigma'_c = 200$  kPa, apresentam comportamentos distintos devido à grande diferença entre os índices de vazios iniciais. Os maiores valores de  $p'$  e  $q$  foram atingidos no ensaio em que o corpo de prova tinha o menor índice de vazios inicial (Figura 6.21).

Como ocorre nas demais tensões efetivas de adensamento, o solo contaminado atinge valores de  $p'$  e  $q$  menores que os dos ensaios com água.

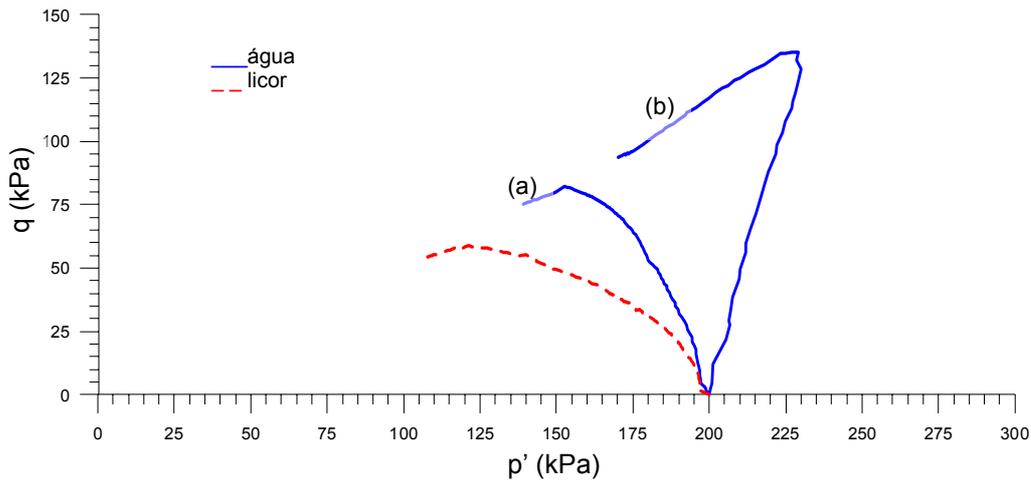


Figura 6.21 - Comparação das trajetórias de tensões efetivas. Ensaios realizados com água e licor para  $\sigma'_c = 200$  kPa (CIU)

### ***Influência da tensão efetiva de adensamento e do índice de vazios na resistência do solo natural e contaminado***

Ao analisar as Figuras 6.22 e 6.23, para os ensaios realizados com água, nota-se, a relação direta entre o índice de vazios, inicial e após o adensamento, e as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação axial de 8 %). Isto ocorre devido à estrutura do solo, que é pouco afetada para os níveis de tensões efetivas de adensamento utilizados, como já mencionado. Já para os ensaios efetuados com licor, só se estabelece uma boa correlação entre o índice de vazios após o adensamento e as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação axial de 8 %), pois o licor torna o solo mais compressível e assim mais vulnerável aos efeitos das tensões efetivas de adensamento.

Na Figura 6.24, fica claro que o elemento que mais influência na resistência do solo contaminado é a tensão efetiva de adensamento. A resistência do solo, impregnado com licor, tende a aumentar com o crescimento desta tensão. Com o solo natural, não se obtém uma correlação satisfatória entre as tensões desviadoras (na ruptura e para uma deformação axial de 8 %) e a tensão efetiva de adensamento. Mas, mesmo assim, percebe-se a tendência da resistência diminuir com o aumento da tensão efetiva de adensamento, comportamento contrário ao do solo contaminado. No entanto, espera-se que esta tendência mude para tensões efetivas de adensamento próximas a de escoamento.

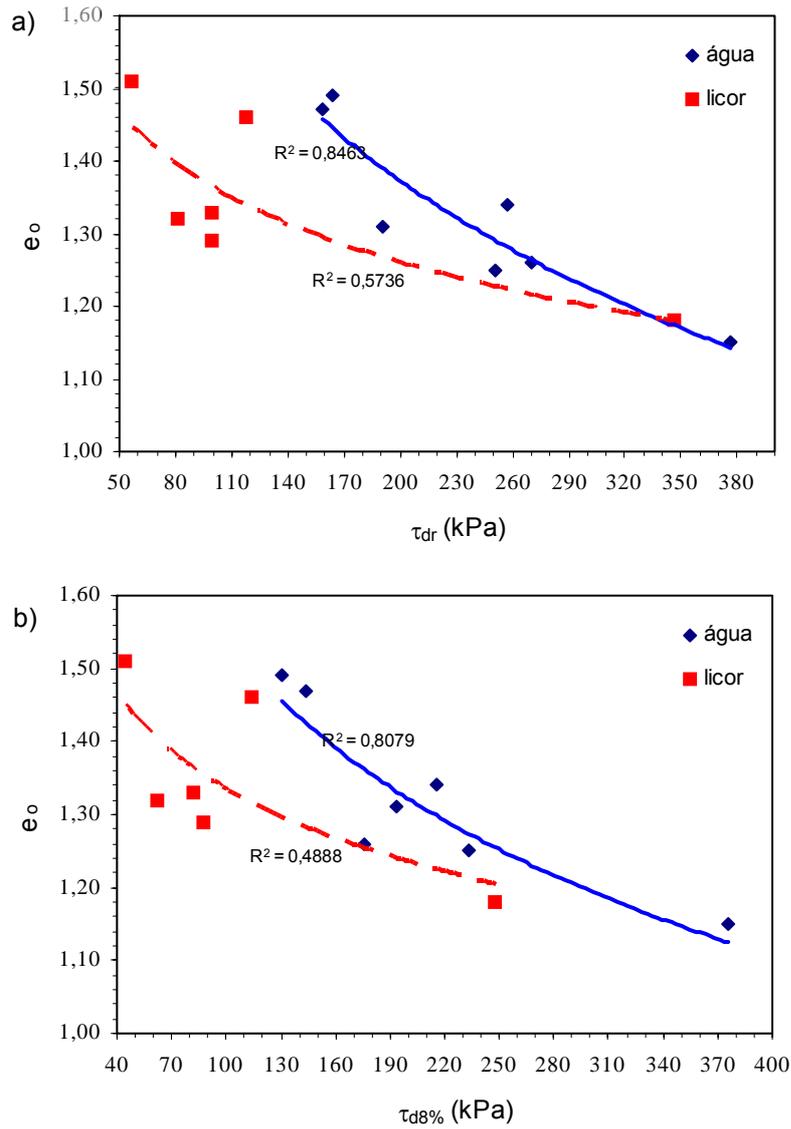


Figura 6.22 – Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor: a) índice de vazios inicial x tensão desviadora na ruptura b) índice de vazios inicial x tensão desviadora para uma deformação axial de 8 %. Ensaios CIU

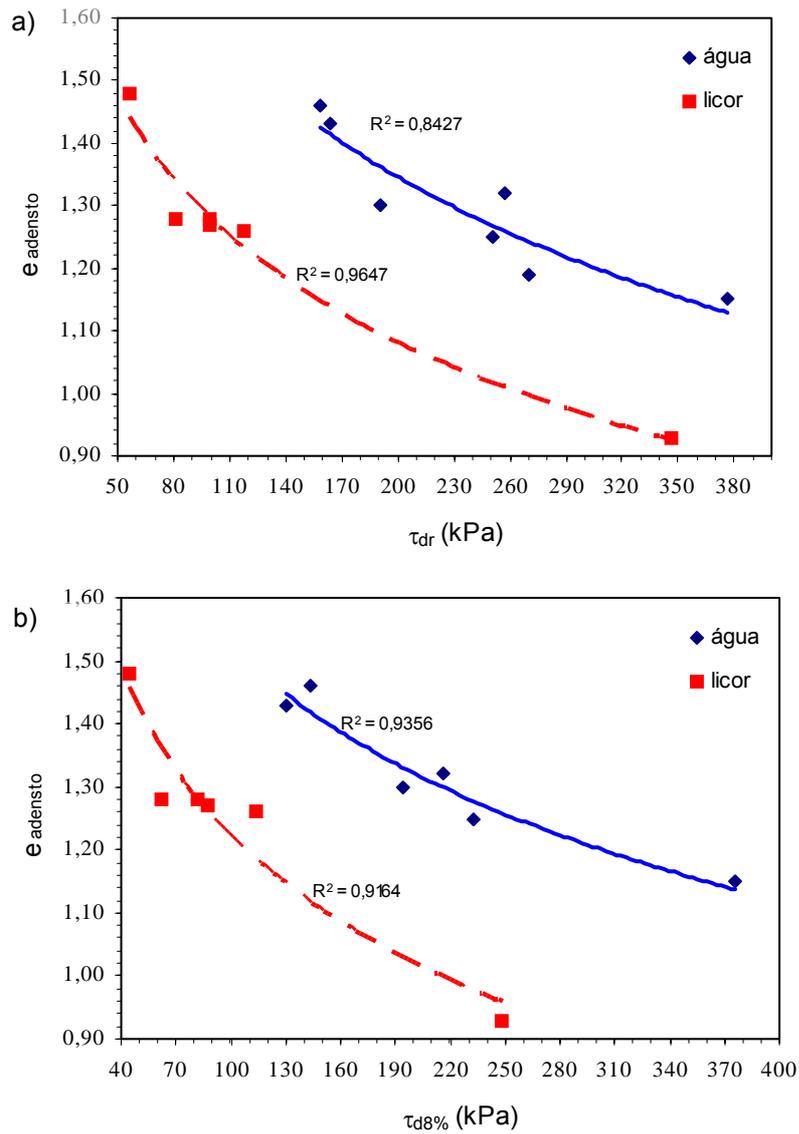


Figura 6.23 - Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor: a) índice de vazios após o adensamento x tensão desviadora na ruptura b) índice de vazios após o adensamento x tensão desviadora para uma deformação axial de 8 %. Ensaios CIU

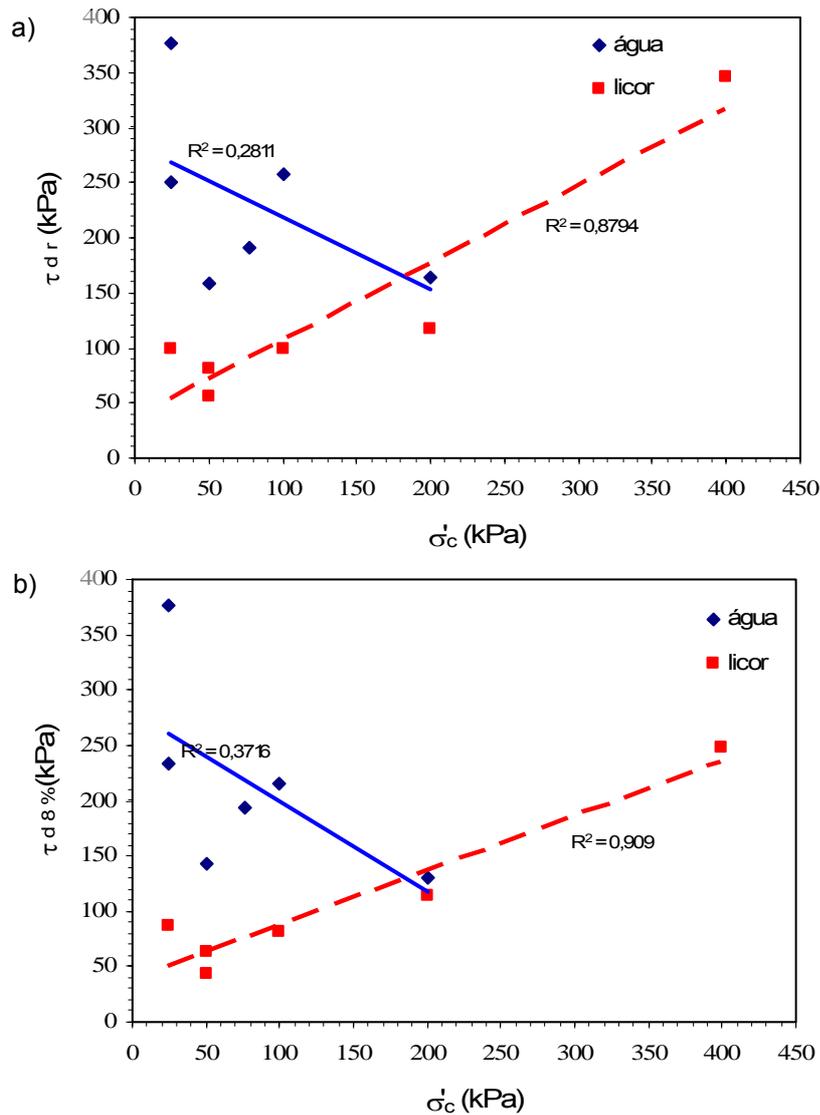


Figura 6.24 – Comparação entre os ensaios realizados com água e com licor: tensão desviadora na ruptura x tensão efetiva de adensamento b) tensão desviadora para uma deformação axial de 8 % x tensão efetiva de adensamento. Ensaios CIU

### Módulos de deformação

A Figura 6.25 apresenta a variação dos módulos de deformação tangencial inicial ( $E_{ti}$ ), deformação secante para 50 % da tensão desviadora máxima ( $E_{S50\%}$ ), de acordo com a tensão confinante efetiva (Ensaios CIU).

Analisando os gráficos da Figura 6.25 e os dados da Tabela 6.9, verifica-se que, de maneira geral, os módulos referentes ao solo natural são superiores aos obtidos nos ensaios realizados com licor. Isto se deve ao fato do solo natural apresentar componentes de resistência e rigidez associadas às cimentações, que para os níveis de tensões efetivas estudados, são pouco afetadas.

Nos ensaios realizados com a mesma tensão efetiva e fluido intersticial, observa-se que os maiores módulos foram obtidos nos ensaios em que o corpo de prova possuía o menor índice de vazios.

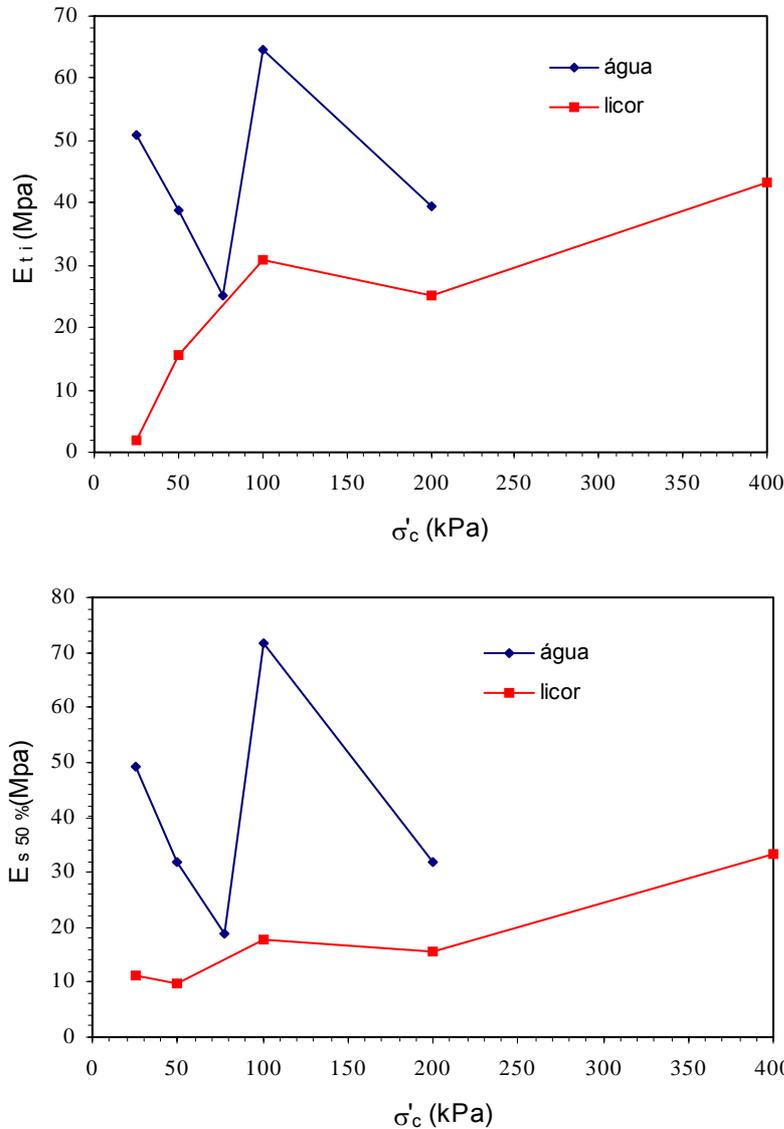


Figura 6.25 – Variações dos módulos de deformação conforme a tensão confinante e o fluido intersticial: a) módulo tangencial inicial e b) módulo secante correspondente a 50 % da tensão desviadora

A Figura 6.26 relaciona o índice de vazios inicial com os módulos. Nos dois gráficos, não se obtém uma boa correlação entre estes parâmetros, tanto nos ensaios realizados com água como nos ensaios realizados com licor. Mas, observa-se, de maneira geral, que a nuvem de pontos, correspondente aos ensaios efetuados com solo natural, encontra-se acima da formada pelos pontos referentes aos ensaios realizados com o solo contaminado.

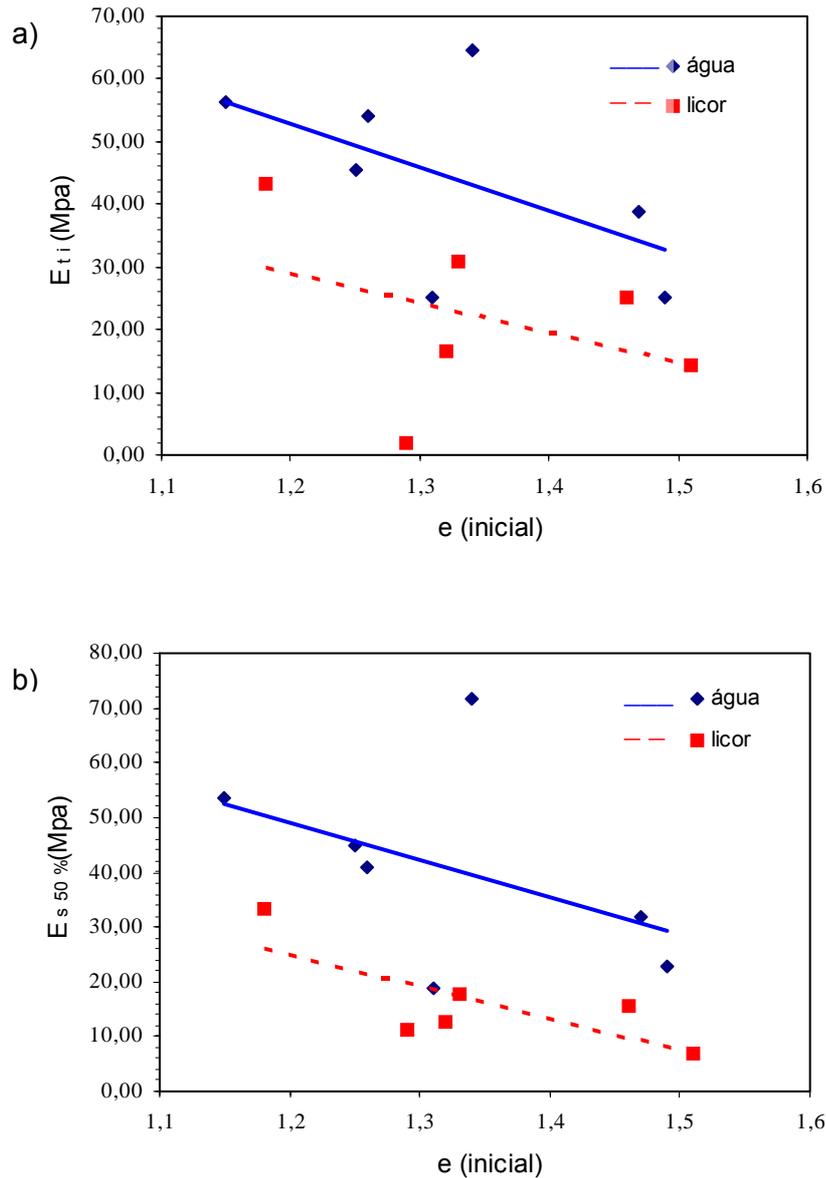


Figura 6.26 – Relação entre a) módulo tangencial inicial e índice de vazios inicial b) módulo secante correspondente a 50 % da tensão desviadora e índice de vazios inicial

## Ensaio CID

### **Comportamento tensão-deformação**

Analisando o comportamento expresso na Figura 6.6, observa-se que, para  $\sigma'_c = 25$  kPa (ensaio CID), o solo natural suporta uma tensão desviadora máxima bem superior ao solo contaminado (cerca de 166 %). No entanto, para uma deformação axial de 10 %, esta diferença cai para apenas 11 %. Assim como nos ensaios não drenados, o ensaio realizado com água apresentou maior

rigidez que o realizado com licor. O comportamento tensão-deformação do solo natural tem um pico de resistência que se deve, provavelmente, ao intertravamento das partículas constituintes do solo e das cimentações presentes. O solo contaminado tem um pico suave e contrai durante o cisalhamento. As diferenças entre o comportamento do solo natural e o do solo contaminado são devido às interações físico-químicas, que resultam na quebra e/ou enfraquecimento de ligações por dispersão, e da diferença do índice de vazios.

Como esperado, observa-se também, nos ensaios CID, a diminuição da rigidez do solo quando contaminado.

### Envoltórias de resistência

As interações do solo com o licor resultam em quebra das ligações interpartículas. Este efeito é observado quando, ao passar da condição de solo natural para contaminado, ocorre a redução do ângulo de atrito efetivo de cerca de 10,49 % e do intercepto de coesão efetiva em 23,91 % (ver Figura 6.27).

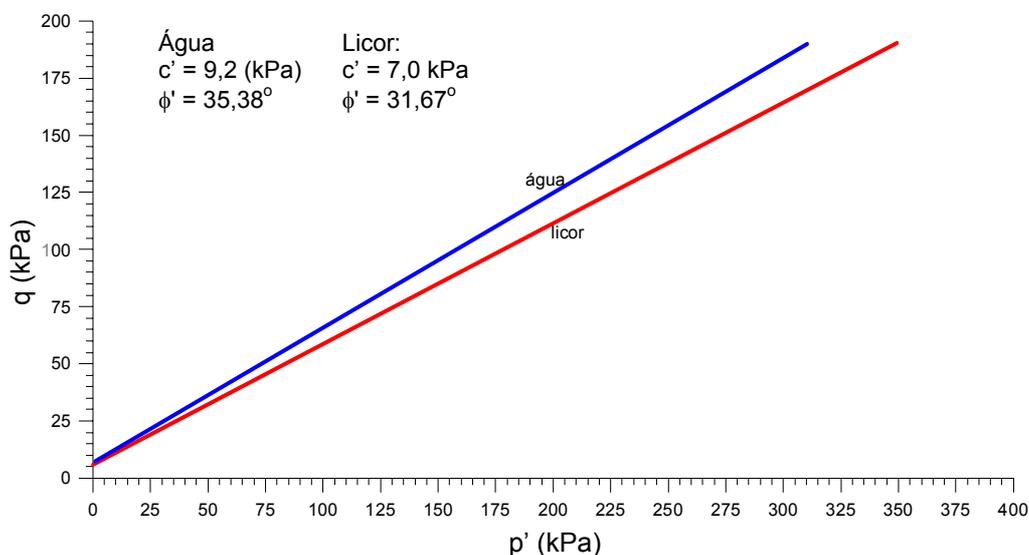


Figura 6.27 – Comparação das envoltórias de resistência do solo natural com o solo contaminado (estado crítico)

Se as envoltórias fossem traçadas curvas até a tensão de escoamento, ainda assim a envoltória correspondente aos ensaios efetuados com licor ficaria abaixo da envoltória dos ensaios com água, para níveis de tensão inferiores a de escoamento. Para valores de tensão efetiva de adensamento acima da tensão de escoamento, espera-se que a envoltória correspondente a resistência de pico

dos ensaios realizados com água tenda a envoltória dos ensaios realizados com licor, pois para estes valores a estrutura do solo já não influencia mais no seu comportamento (ver envoltórias sugeridas – Figura 6.28).

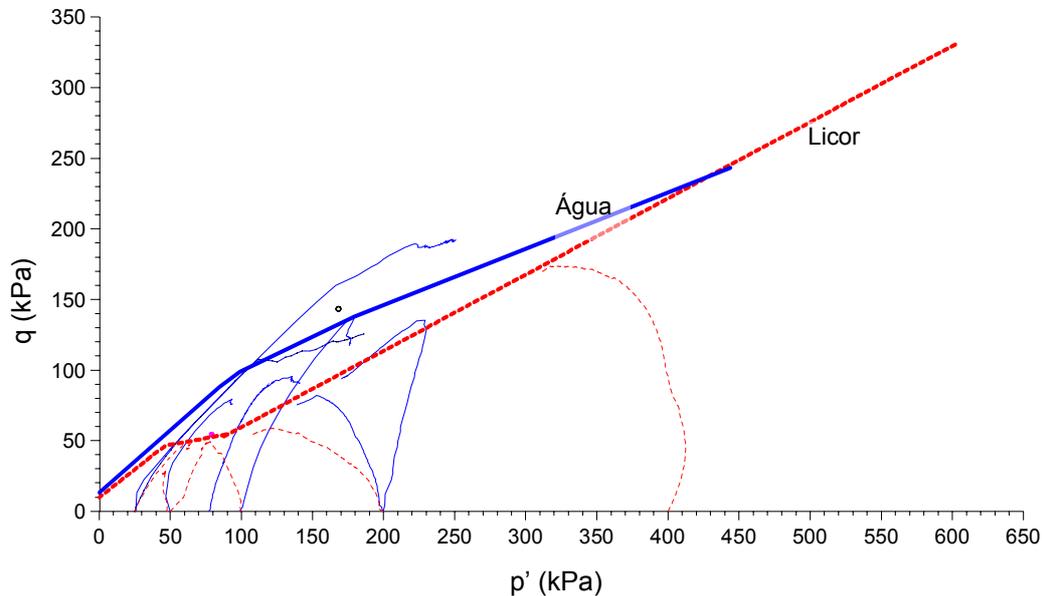


Figura 6.28 – Envoltórias sugeridas (resistência de pico)

### 6.3.

#### Ensaio de cisalhamento direto – solo coluvionar

##### 6.3.1.

##### Introdução

O solo coluvionar estudado é extremamente heterogêneo. Apresenta concreções que impossibilitam a moldagem de corpos de prova cilíndricos utilizados nos ensaios triaxiais. Por isso, optou-se por realizar ensaios de cisalhamento direto para avaliar a resistência do solo coluvionar nos estados natural e contaminado.

A metodologia utilizada nos ensaios e a caracterização do solo são apresentadas nos Capítulos 3 e 4, respectivamente. Os coeficientes de adensamento são listados no Apêndice II

Neste item, serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados com o solo coluvionar natural e contaminado. A influência do licor no comportamento do solo será estudada mediante comparação destes resultados. Na Tabela 6.4 são listados os ensaios de resistência executados.

Tabela 6.10 – Campanha de ensaios de cisalhamento direto com os corpos de prova no estado natural e contaminado

| $\sigma_n$ (kPa) | Fluido intersticial dos corpos de prova |                |
|------------------|---|----------------|
|                  | Água                                    | Licor cáustico |
| 25               | X                                       | X              |
| 50               | X                                       | X              |
| 100              | X                                       | X              |

### 6.3.2.

#### Apresentação dos resultados

#### 6.3.2.1.

#### Índices físicos dos corpos de prova

Na Tabela 6.5 são apresentados os índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto. A densidade relativa dos grãos deste material é de 2,698, como mostrado no Capítulo 5.

Tabela 6.11 – Índices físicos dos corpos de prova utilizados nos ensaios de cisalhamento direto

| Fluido | $\sigma_n$<br>(kPa) | $e_o$ | $e_{adensto}$ | $w_o$<br>(%) | $w_f$<br>(%) | $S_o$<br>(%) | $\gamma_t$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) |
|--------|---------------------|-------|---------------|--------------|--------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Água   | 25                  | 1,32  | 1,22          | 41,54        | 49,44        | 84,8         | 16,11                              | 11,38                              |
|        | 50                  | 1,57  | 1,23          | 38,06        | 46,81        | 65,0         | 14,14                              | 10,24                              |
|        | 100                 | 1,28  | 0,99          | 42,45        | 43,76        | 89,1         | 16,46                              | 11,56                              |
| Licor  | 25                  | 1,49  | 1,10          | 39,63        | 43,58        | 71,5         | 14,78                              | 10,59                              |
|        | 50                  | 1,50  | 1,00          | 43,83        | 42,41        | 78,6         | 15,18                              | 10,55                              |
|        | 100                 | 1,41  | 0,90          | 41,43        | 38,27        | 79,1         | 15,48                              | 10,95                              |

#### 6.3.2.2.

#### Fase de cisalhamento

#### Curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal

As curvas tensão-deslocamento e deslocamento vertical-deslocamento horizontal são apresentadas nas Figuras 6.29 e 6.30 para o solo natural e contaminado com licor cáustico, respectivamente.

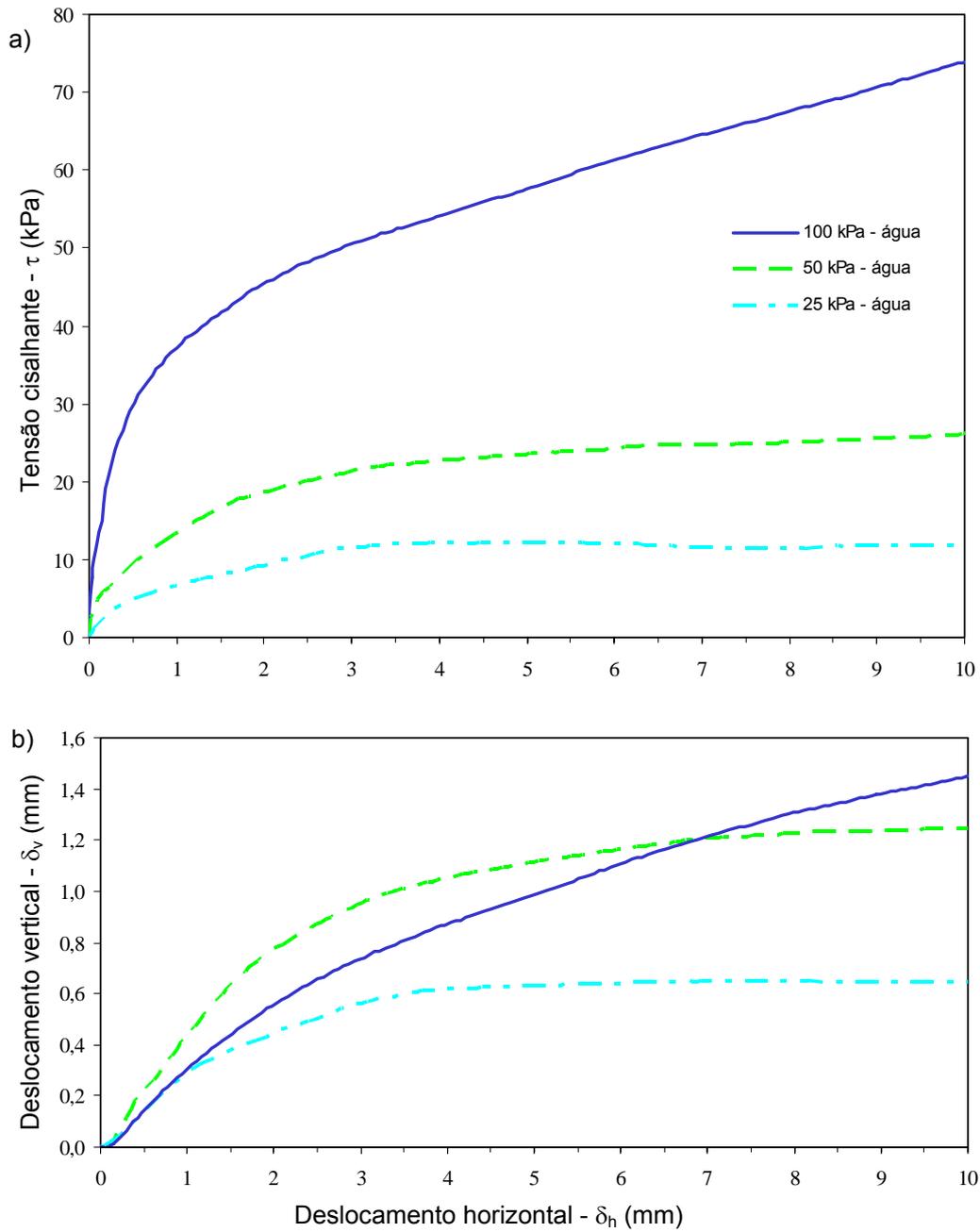


Figura 6.29 – Ensaio de cisalhamento direto realizados com água a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal b) curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal

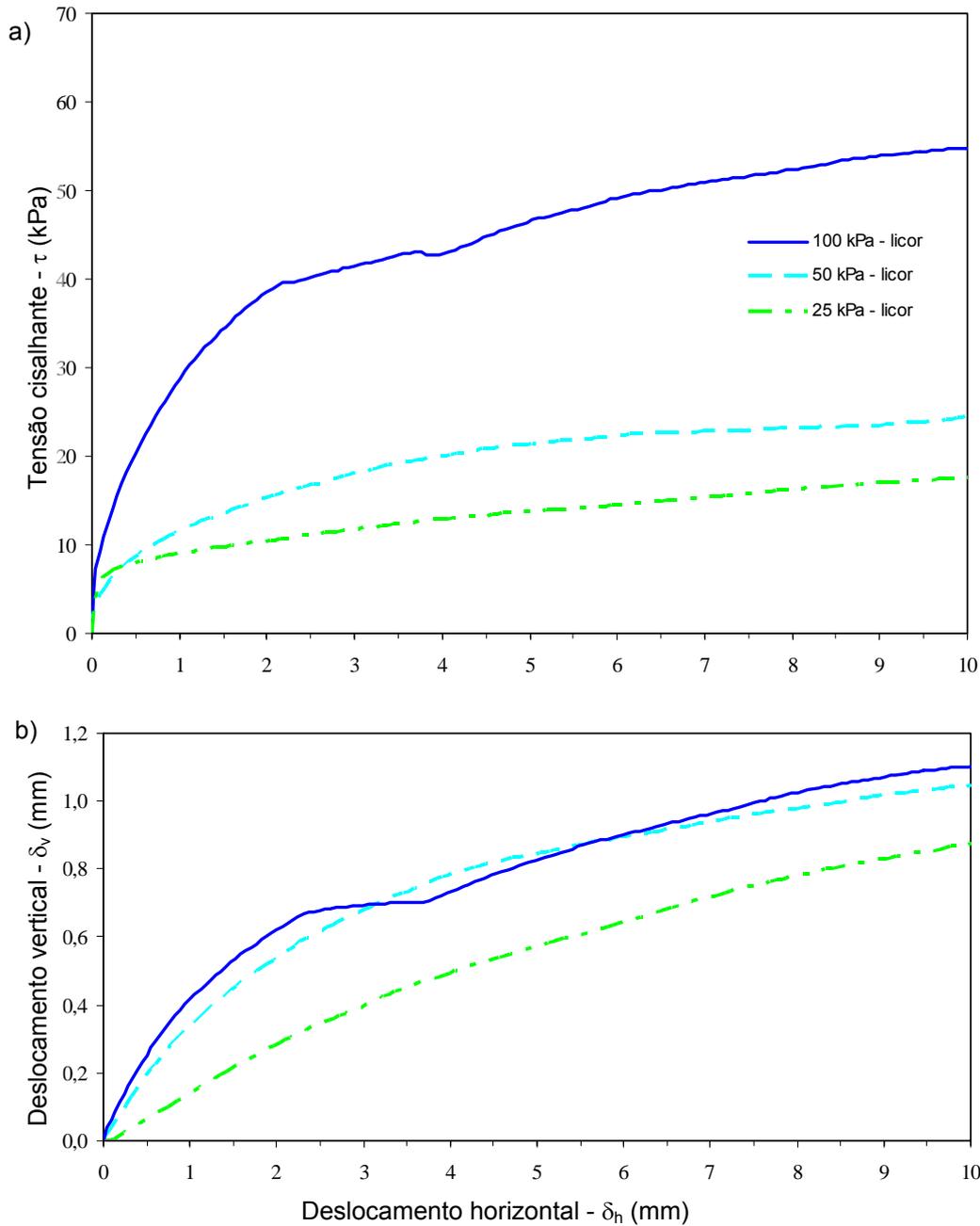


Figura 6.30 - Ensaio de cisalhamento direto realizado com licor a) curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal b) curvas deslocamento vertical x deslocamento horizontal

### Parâmetros na ruptura e envoltórias de resistência

A resistência do solo aumenta com o deslocamento horizontal (comportamento de enrijecimento do material), logo, este não apresenta um pico definido na curva tensão cisalhante x deslocamento, tanto no estado natural quanto no contaminado (ver Figuras 6.29 e 6.30). Para definir a tensão

cisalhante na ruptura, utilizou-se o critério proposto por de Campos e Delgado (1995), onde os autores assumem que o solo, com comportamento semelhante a este, rompe quando a curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal atinge pela primeira vez uma inclinação ( $\alpha$ ) aproximadamente constante. A Figura 6.31 ilustra como se determina a tensão cisalhante na ruptura.

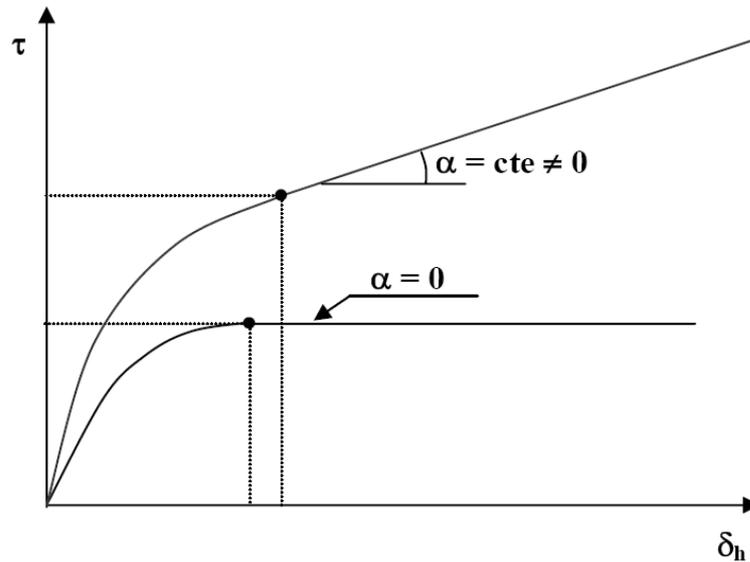


Figura 6.31 – Definição da tensão cisalhante na ruptura (de Campos e Delgado, 1995)

Baseado no critério de ruptura descrito acima, são apresentados na Tabela 6.12, os valores do deslocamento horizontal ( $\delta_{hr}$ ), tensão cisalhante ( $\tau_r$ ) e tensão normal ( $\sigma_{nr}$ ), obtidos na ruptura.

Tabela 6.12 – Deslocamento horizontal, tensão cisalhante e tensão normal na ruptura

| Fluido | $\sigma_n$<br>(kPa) | $\delta_{hr}$<br>(mm) | $\tau_r$<br>(kPa) | $\sigma_{nr}$<br>(kPa) | $\tau_r / \sigma_{nr}$ |
|--------|---------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Água   | 25                  | 3,3                   | 11,80             | 26,20                  | 0,45                   |
|        | 50                  | 3,2                   | 21,80             | 52,80                  | 0,41                   |
|        | 100                 | 2,4                   | 48,00             | 102,50                 | 0,47                   |
| Licor  | 25                  | 1,0                   | 9,00              | 25,30                  | 0,35                   |
|        | 50                  | 3,4                   | 19,10             | 52,80                  | 0,36                   |
|        | 100                 | 3,1                   | 41,80             | 103,20                 | 0,41                   |

As envoltórias de resistência, definidas através do ajuste linear dos dados apresentados na tabela acima, são apresentadas na Figura 6.32.

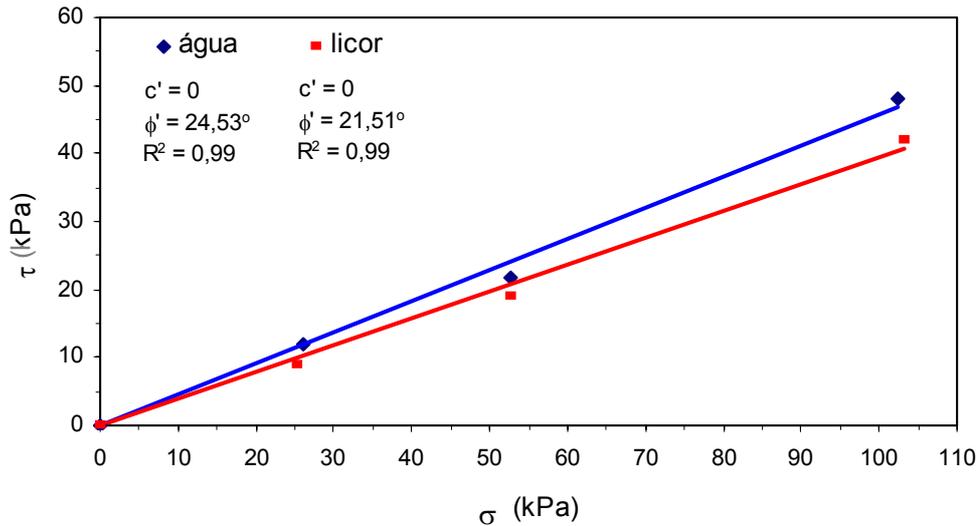


Figura 6.32 - Envoltórias de resistência do solo coluvionar natural e do contaminado

### 6.3.3. Análise e discussão dos resultados

#### 6.3.3.1. Compressibilidade

A Figura 6.33 mostra a relação entre a variação do índice de vazios e a tensão normal de adensamento. Nota-se, nesta figura, que a variação do índice de vazios, para uma mesma tensão normal de adensamento, é maior no solo contaminado, ou seja, caso fossem realizados dois ensaios (solo natural e contaminado) com os corpos de prova com o mesmo índice de vazios inicial, provavelmente o solo contaminado apresentaria um menor índice de vazios após o adensamento. Isto indica que o licor torna o solo coluvionar mais compressível.

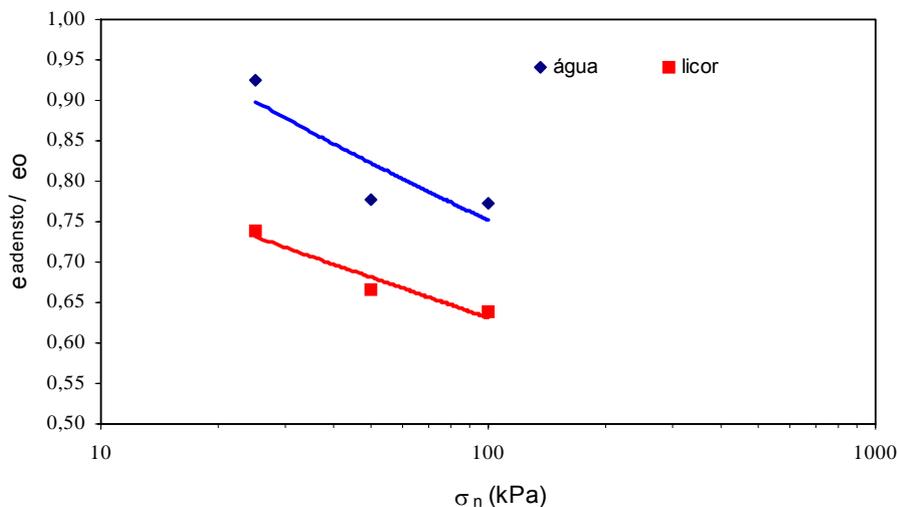


Figura 6.33 – Relação entre a variação do índice de vazios e a tensão normal de adensamento

Os valores dos coeficientes de adensamento são apresentados no Apêndice II.

### 6.3.3.2.

#### **Comparação dos resultados dos ensaios realizados com solo no estado natural e contaminado**

Observa-se nos gráficos das Figuras 6.29 e 6.30 que a resistência ao cisalhamento cresce de acordo com o aumento da tensão normal de adensamento, tanto no solo natural quanto no contaminado, comportamento típico de solos sedimentares. As curvas de deslocamento vertical x deslocamento horizontal mostram que o material, em ambos os estados, apresenta contração.

Nos ensaios realizados com tensão normal de adensamento igual a 25 kPa, a resistência alcançada pelo solo natural é maior que a do solo contaminado. No entanto, após a ruptura, o solo contaminado apresenta um comportamento rígido com  $\alpha \neq 0$  e o solo natural tem um valor de  $\alpha = 0$ . Já para as demais tensões normais de adensamento, os solos apresentam comportamento mais próximo.

A resistência obtida nos ensaios com água é superior à encontrada no solo contaminado, para uma mesma tensão normal de adensamento, como pode ser observado na Tabela 6.12 e na Figura 6.34.

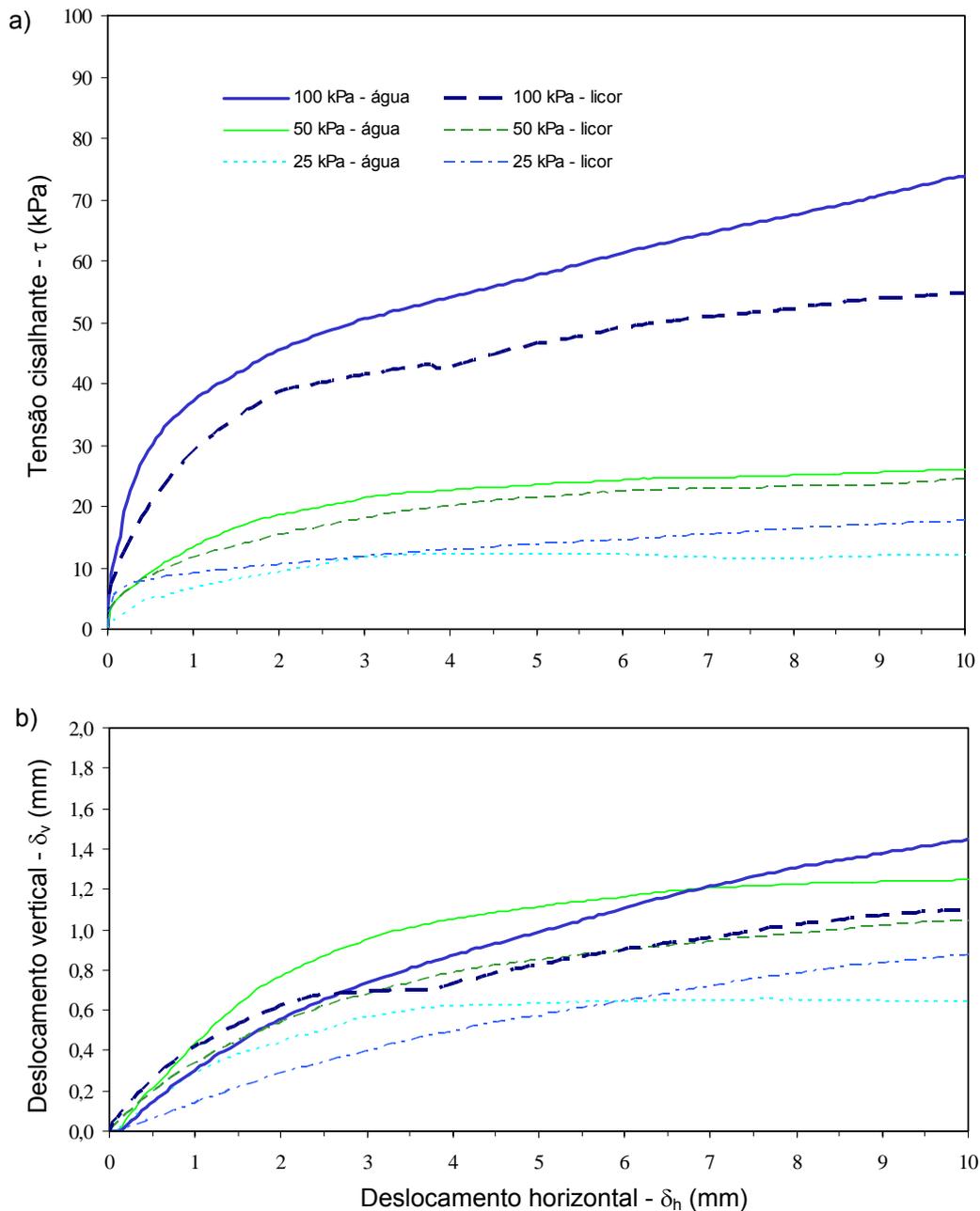


Figura 6.34 Comparação entre as curvas a) tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) deslocamento vertical x deslocamento horizontal. Ensaio de cisalhamento direto realizados com água e licor, solo coluvionar

Apesar dos poucos ensaios realizados, percebe-se que a resistência ao cisalhamento tende a aumentar com a diminuição da umidade final, tanto para o solo natural como para o contaminado (Figura 6.35). Observa-se ainda, que para a mesma umidade final, o solo natural apresenta maior resistência que o contaminado.

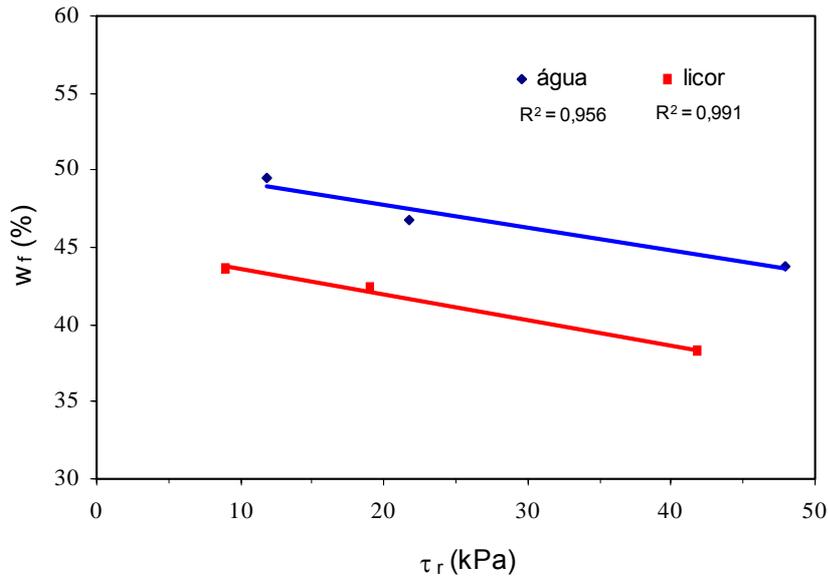


Figura 6.35 – Relação entre a umidade final e a tensão cisalhante na ruptura

O licor provoca a dispersão do solo coluvionar, como constatado nos ensaios de caracterização. No entanto, por ser um solo transportado, a estrutura que este solo possui, e que é afetada pelo licor, não influencia de maneira significativa em sua resistência. Independente do solo estar contaminado ou não, a tensão normal de adensamento é quem dita o comportamento deste. Observa-se na Figura 6.32, que o licor causa uma redução de  $\phi'$  de cerca de 12,31 %. Apesar de tal redução ser da mesma ordem de grandeza da observada no solo residual, os efeitos do licor no colúvio são menos importantes que no solo residual.

#### 6.4. Comentários finais

O solo residual apresenta uma estrutura que influencia de maneira significativa o seu comportamento no estado natural. O índice de vazios e as ligações entre as partículas regem o comportamento deste solo até tensões próximas a de escoamento (600 kPa). A partir desta tensão, espera-se que o solo comporte-se de maneira semelhante a solos sedimentares normalmente adensados, e que a tensão efetiva de adensamento passe a comandar o comportamento do solo.

Nos ensaios de caracterização física, química e mineralógica, concluiu-se que o licor age como defloculante, não causando amorfização dos minerais presentes, ao menos durante o tempo de exposição e temperatura a que o solo

foi exposto ao contaminante. Nos ensaios com licor, percebe-se que o solo torna-se mais compressível e menos rígido, com a tensão efetiva de adensamento comandando o comportamento do solo na maioria dos ensaios executados.

Observa-se uma diminuição dos parâmetros de resistência. O intercepto de coesão efetiva cai cerca de 23,91 % e o ângulo de atrito interno efetivo 10,49 %.

Já no caso do solo coluvionar, o que se nota é que o licor causa dispersão, porém, por ser um solo transportado, a estrutura que este possui pouco influencia em sua resistência.

Dois fatores diferenciam o comportamento dos solos residual e coluvionar: influência da estrutura e composição mineralógica.

O solo residual apresenta uma composição mineralógica que o torna mais propenso a reagir com o licor que o solo coluvionar (formado basicamente por gibbsita). A composição dos solos é refletida nos valores dos índices de intemperismo  $K_i$  e  $K_r$  e nos valores de CTC, que são maiores no solo residual. Ambos são lateríticos, um dos indicativos é que eles possuem  $K_i$  menor que 2.

Tanto o solo residual quanto o coluvionar possuem uma estrutura, no entanto, o arranjo dos grãos e as ligações entre estes são mais importantes nos solos residuais. Enquanto que nos solos residuais a estrutura que estes possuem é herdada da rocha mãe e modificada ao longo do tempo por processos intempéricos (principalmente lixiviação), nos solos transportados estas características são adquiridas após o transporte dos materiais que os compõem. Por isso, a estrutura de solos transportados é mais frágil, se comparada a de solos residuais, e seu comportamento é regido pela história de tensões a que estes já foram submetidos.

Devido a isto, o licor afeta de maneira mais pronunciável a resistência do solo residual, principalmente para tensões mais baixas, onde a tensão efetiva de adensamento não altera, ou pouco altera, a estrutura que este possui. Para níveis de tensões superiores ao da tensão efetiva de adensamento do solo residual, espera-se que este passe a responder de maneira semelhante ao solo coluvionar, à adição do licor.