7
Simulação do Comportamento de Solos Residuais

O objetivo final da presente pesquisa consiste na simulação do comportamento mecânico de solos residuais, a partir da modelagem micro-mecânica discreta, a qual permite a inclusão de diversos fenômenos micro-estruturais presentes na massa deste tipo de solo. Assim, a resposta global do solo mostrará a superposição dos efeitos de cada fenômeno presente atuando simultaneamente.

A análise destes fenômenos de forma isolada já foi abordada no capítulo que antecede, e possibilitou a compreenção do tipo de influência que excercem sobre a rigidez, resistência, comportamento volumétrico e compressibilidade do meio particulado que constitui o modelo de solo nesta pesquisa. Resta agora estudar sua resposta em conjunto, na perspectiva de tentar reproduzir comportamentos observados em diferentes solos residuais ensaiados experimentalmente.

7.1.
Comportamento mecânico de solos residuais

A padronização do comportamento mecânico de solos residuais em certos tipos básicos de resposta não se corresponde com a variedade de respostas que estes solos podem oferecer, pelo que deve ser evitada. Como já foi estudado no capítulo 2 desta pesquisa, são variados os aspectos de gênesis e composição mineralógica-estrutural que determinam o tipo de solo residual, e em conseqüência o tipo de resposta. Entre estes aspectos podem-se citar:

- Características da rocha mãe e do maciço;
- Condições de clima e relevo;
- Mineralogia e estrutura;
- Grau de intemperismo;

Segundo quais sejam as particularidades destes fatores, ter-se-á um solo residual resultante com características diferenciadas no que se refere a sua granulometria, dupla estrutura, matriz argilosa, não saturação, resistência dos seus grãos, cimentação e presença de blocos de rocha inalterada. Dentro desta diversidade procurar-se-á simular alguns comportamentos freqüentemente observados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

No interior dos maciços residuais as características mudam em função do estágio de evolução do intemperismo. Tem-se, na realidade, um perfil residual contínuo a partir da superfície do maciço e para o interior deste. Destes perfis deseja-se simular solos residuais jovens e maduros, correspondentes aos estágios intermediário e final do processo de intemperismo. O solo residual jovem é constituído por minerais primários e secundários, e ainda guarda características herdadas da rocha original, podendo conter alguns blocos rochosos em sua massa. Já o solo maduro é constituído por minerais secundários (transformados e neoformados) e primários que resistiram ao intemperismo, com granulação variável e geralmente de composição homogênea e com estrutura porosa.

Alguns resultados experimentais

Maccarini (1980) e Sandroni & Maccarini (1981) apresentam resultados de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais convencionais em amostras indeformadas de uma ocorrência de solo residual gnáissico jovem do campo experimental da PUC-Rio. Blocos para a confecção das amostras foram retirados de cinco profundidades de um poço e cinco níveis de um talude. A resposta dos ensaios triaxiais apresentou dois tipos básicos de comportamento, os quais são resumidos na figura 7.1.

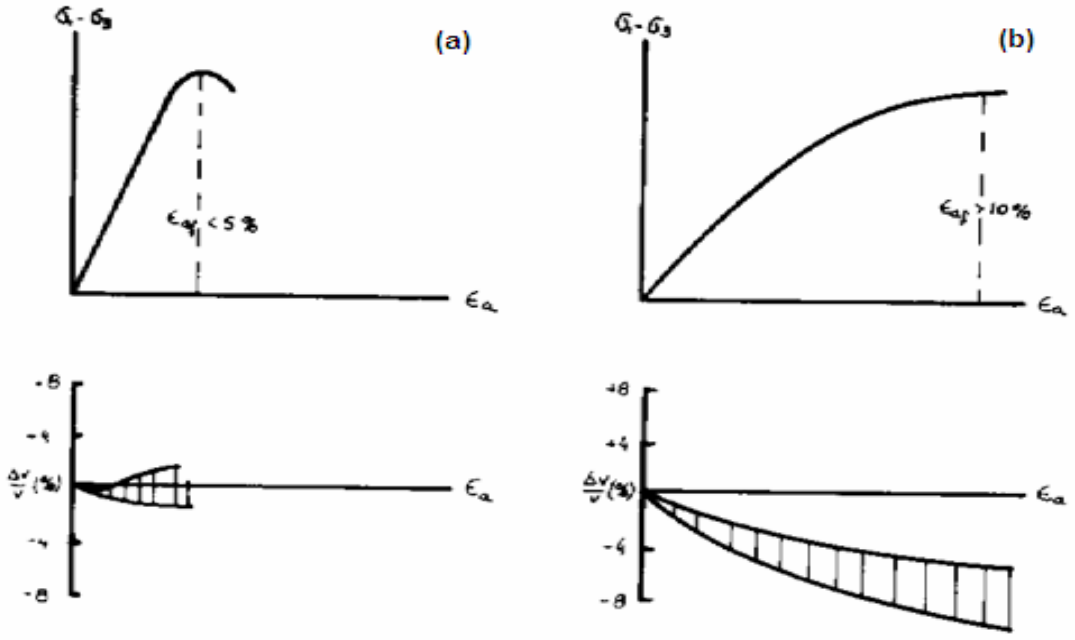


Figura 7.1: Comportamento observado de solos residuais no ensaio triaxial: a) solo jovem; b) solo maduro (Sandroni & Maccarini, 1981).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

O comportamento do solo jovem caracteriza-se por uma relação aproximadamente linear entre tensão e deformação até atingir o pico de resistência para uma deformação axial não superior a 5%, seguindo-se uma curva de amolecimento. As deformações volumétricas variam de contrações moderadas até dilatações. Já o comportamento do solo maduro caracteriza-se por uma relação não linear entre tensão e deformação que atinge o seu valor máximo para deformações axiais maiores do que 10%. As deformações volumétricas são contrativas.

Futai (2002) e Futai *et al* (2004) analisaram a resistência ao cisalhamento não saturada de um perfil de solo residual de gnaisse da região de Ouro Preto - MG. Foram estudados dois horizontes no perfil, um *saprolito* - o solo jovem (profundidade de 5 metros) e uma *laterita* - o solo maduro (profundidade de 1 metro). As características físicas e a curva de retenção de água são mostradas na figura 7.2.

a)

Tabela 1 – Características dos solos

Características	1m	5m
Areia (%)	44	38
Silte (%)	9	54
Argila (%)	46	8
w_L (%)	57	42
I_P (%)	29	19
Índice de vazios	1,3-1,5	0,8-1,0
Densidade dos grãos	2,64	2,68
Caulinita (%)	23	42
Quartzo (%)	50	44
Óxidos, hidróxidos e amorfos (%)	19	6

b)

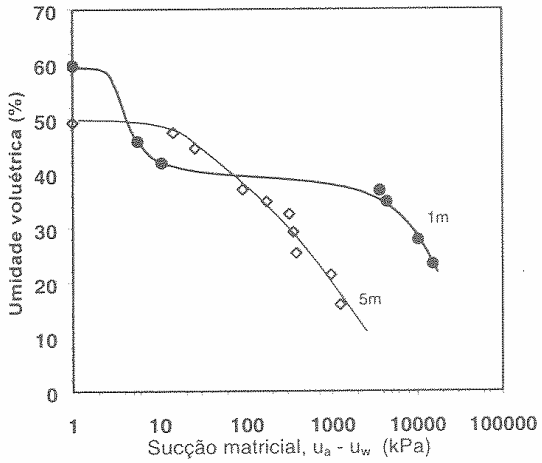


Figura 7.2: a) Características físicas de solo laterítico (1m) e saprolítico (5m); b) Curva característica dos solos (Futai *et al*, 2004).

No solo jovem prevalecem as frações areia e silte, com pouca presença de argila, e no solo maduro predominam as frações areia e argila, com pouco silte. O quartzo permaneceu inalterado como areia, mas os minerais alteráveis passaram gradativamente da fração silte para argila. Isto se reflete na curva característica, onde o caráter *bimodal* no caso do solo maduro sugere a ausência da fração silte.

A figura 7.3 mostra a resposta de ensaios triaxiais com sucção controlada (100kPa) para diferentes tensões de confinamento. No caso do solo maduro a matriz argilosa controlou o comportamento do solo, caracterizado pela ausência de pico na

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

resistência e pela contração verificada nas deformações volumétricas. Já no solo jovem, com uma matriz argilosa menos persistente, se observa uma maior resistência com formação de pico juntamente com uma maior tendência dilatante.

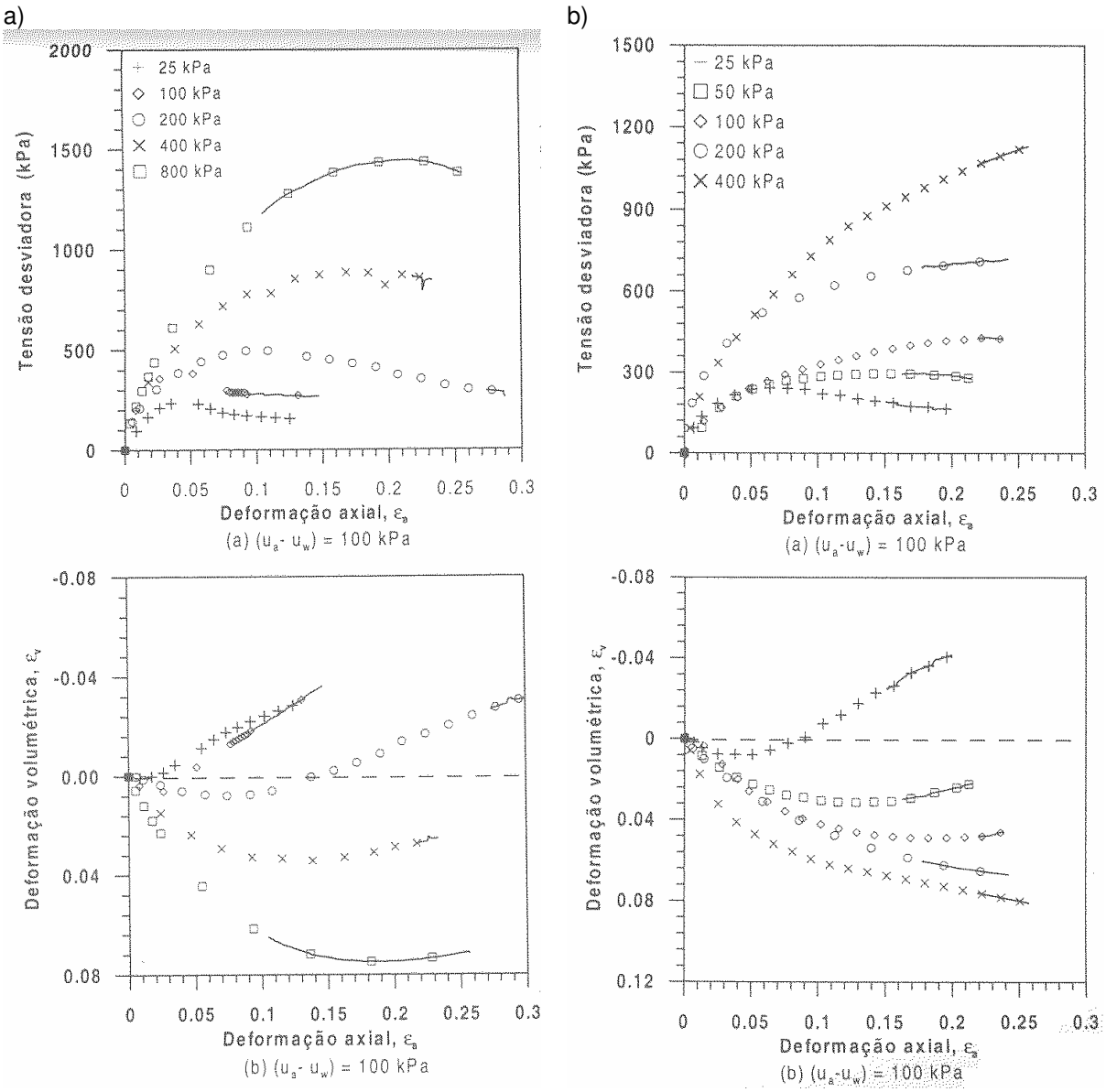


Figura 7.3: Ensaio triaxial com sucção controlada: a) solo jovem; b) solo maduro (Futai *et al*, 2004).

A figura 7.4. apresenta os resultados de uma campanha de ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo residual de folhelho da região de KwaZulu Natal, Sudáfrica (Brenner *et al*, 1997). A ordenação das amostras corresponde com a profundidade a que foram retiradas do maciço, pelo que abarcam do solo maduro (a)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

até o solo residual jovem (d). Como se pode apreciar, a resistência decresce com o grau de intemperismo, enquanto crescem as contrações volumétricas. É de se destacar que nas amostras (c) e (d) correspondentes a solos jovens, acontece um pico de resistência associado a um comportamento volumétrico contrátil.

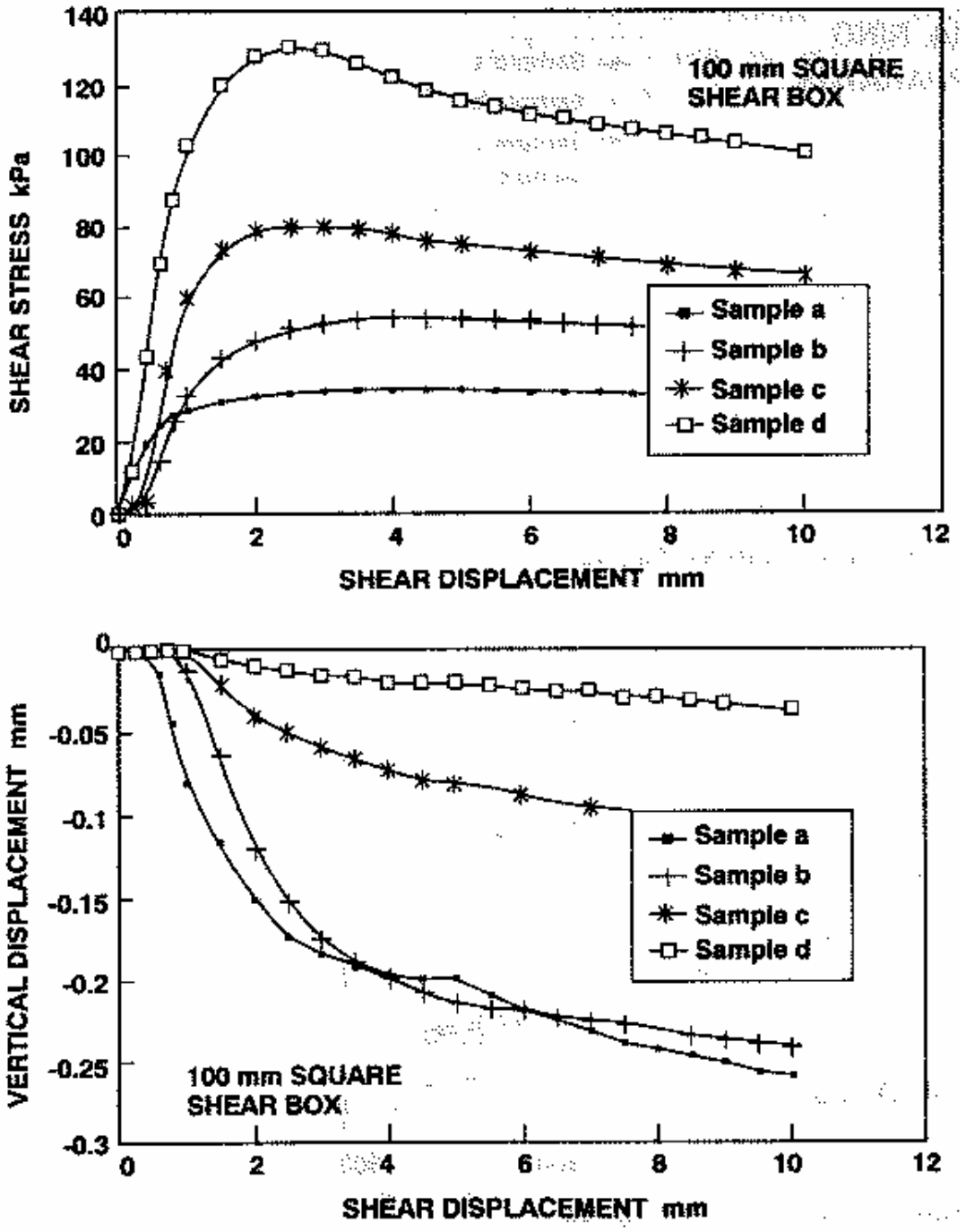


Figura 7.4: Ensaio de cisalhamento direto em solo residual de folhelho da região de KwaZulu Natal, Sudáfrica (Brenner *et al*, 1997).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

Reis (2004) e Reis & Vilar (2004) estudaram o comportamento mecânico de um perfil residual de gnaisse da cidade de Viçosa/MG, por meio de ensaios triaxiais com sucção controlada em amostras indeformadas correspondentes aos estágios de solo saprolítico (jovem) e maduro. A figura 7.5 apresenta a campanha de ensaios triaxiais consolidados e drenados para a condição saturada.

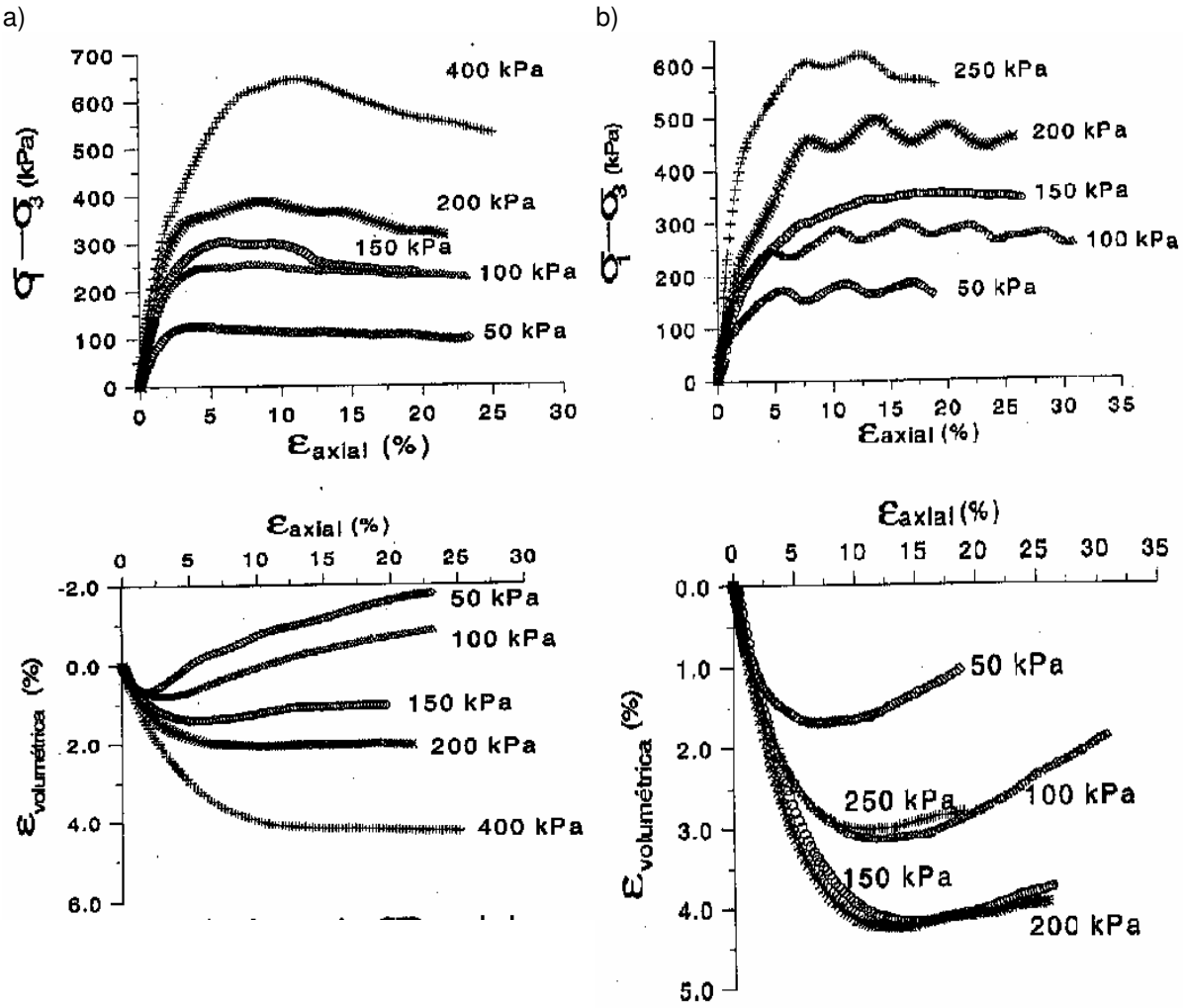


Figura 7.5: Resultados de ensaios triaxiais drenados com amostras saturadas; a) Solo residual jovem; b) Solo residual maduro (Reis & Vilar, 2004).

O solo jovem mostrou-se dilatante para baixos confinamentos, passando gradativamente para um comportamento contrátil para confinamentos mais elevados. O pico de resistência, suave, cresceu com o confinamento, contrariamente ao que seria de se esperar de um solo do tipo granular. A tensão virtual de pré-adensamento de 265kPa, relacionada com a cimentação de grãos, causou tal comportamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

Já o solo maduro não apresentou pico de resistência e seu comportamento volumétrico foi claramente contrátil, conforme o esperado de um solo coesivo normalmente adensado.

A figura 7.6 apresenta os resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada no solo jovem, para tensões de confinamento de 50, 100 e 200kPa e sucções de 80 e 320kPa. O aumento da tensão confinante provoca deformações volumétricas de contração crescentes, assim como um aumento da resistência marcado pela suavização da curva e do pico, que acontece para maiores valores da deformação axial. A influência do nível de sucção é um acréscimo na rigidez da fábrica do solo, o que redunda em uma maior resistência ao cisalhamento com pico mais pronunciado, juntamente com uma maior tendência dilatante no comportamento volumétrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

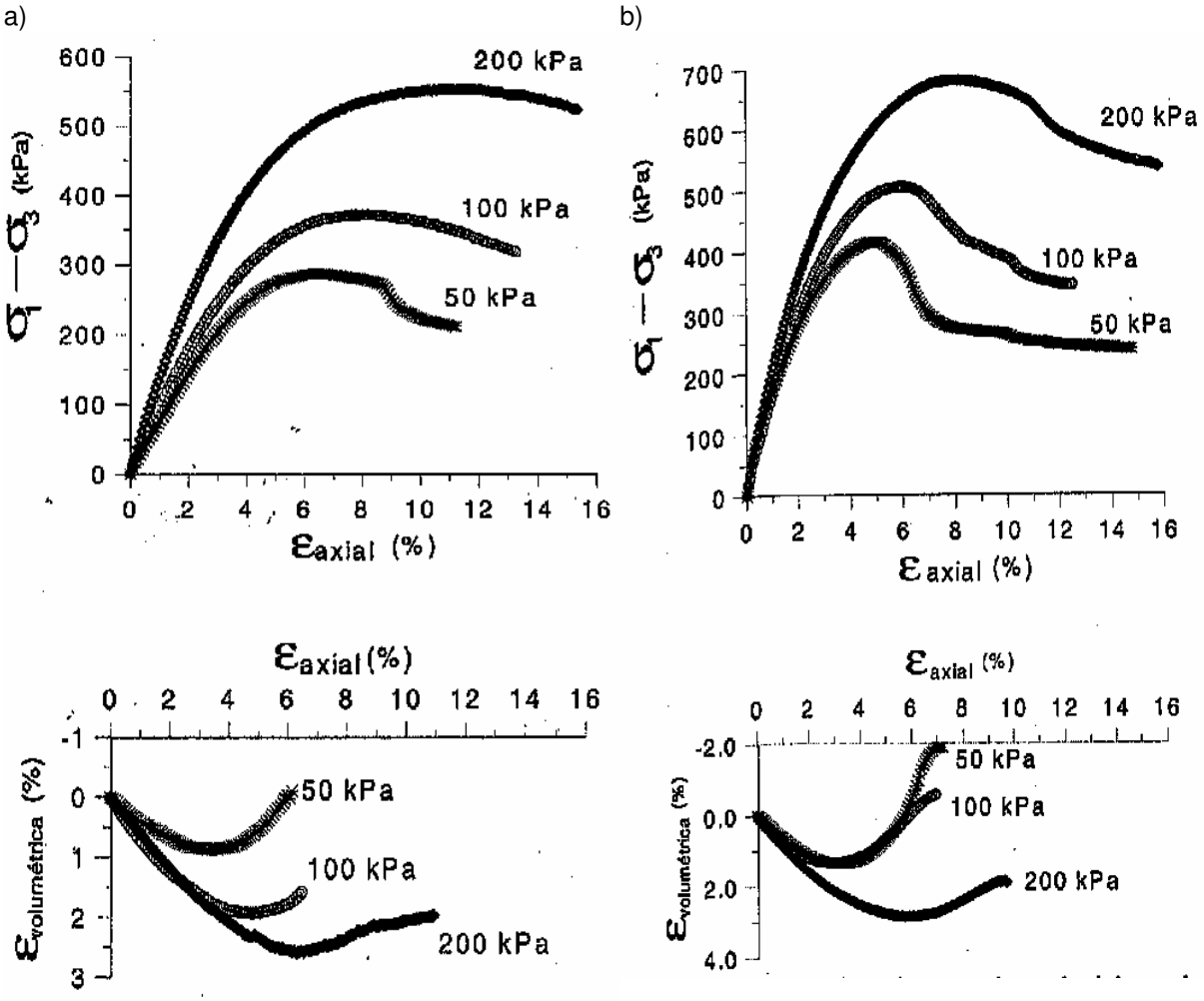


Figura 7.6: Resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada em solo residual jovem, para confinamentos de 50, 100 e 200kPa: a) s = 80kPa; b) s = 320kPa (Reis & Vilar, 2004).

A figura 7.7 apresenta os resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada no solo residual maduro, para tensões de confinamento de 50 e 200kPa e sucções de 80 e 320kPa. As amostras com baixo confinamento apresentaram pico de resistência juntamente com um comportamento, inicialmente contrátil, mais depois com tendência dilatante. A resistência cresceu com o aumento do confinamento, mas sem apresentar pico de resistência e sim uma curva suave até atingir a resistência máxima para elevadas deformações axiais. As deformações volumétricas tornaram-se claramente de compressão para o confinamento mais elevado. A influência da sucção, como no caso do solo jovem, foi a de induzir uma maior resistência ao cisalhamento, juntamente com uma maior tendência dilatante.

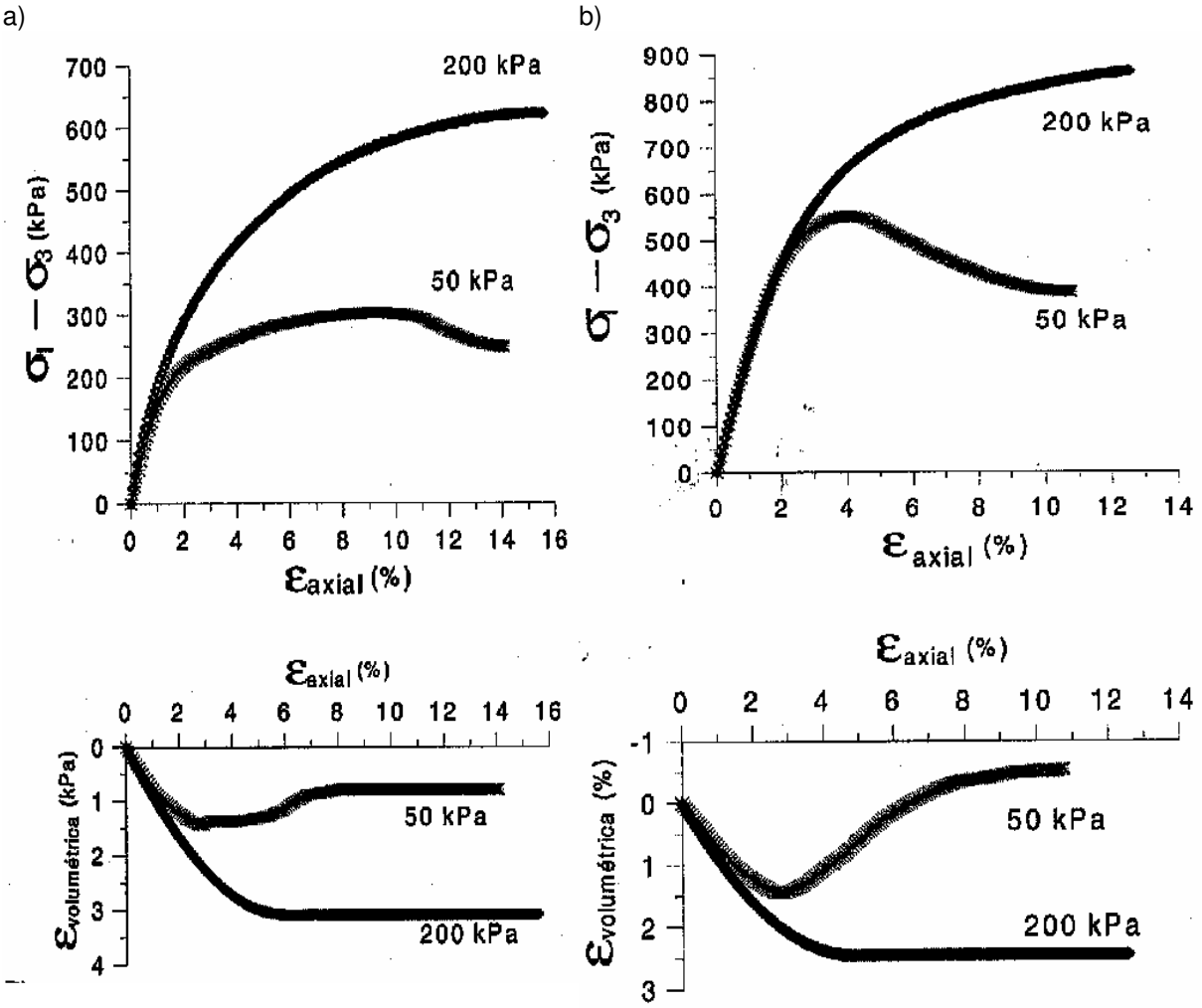


Figura 7.7: Resultados de ensaios triaxiais com sucção controlada em solo residual maduro, para confinamentos de 50 e 200kPa: a) s = 80kPa; b) s = 320kPa (Reis & Vilar, 2004).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

7.2.
Simulação de solos residuais jovens

O objetivo da modelagem se centrou na reprodução das características do comportamento exibido pelos solos jovens sob cisalhamento nos ensaios laboratoriais. Como primeiro passo, foram montadas amostras discretas que assemelhassem o tipo residual jovem, incluindo de forma ponderada a ocorrência de cimentação de grãos, grãos susceptíveis de quebra e matriz argilosa, além da condição não saturada. Estas amostras foram ensaiadas sob condições edométricas e a cisalhamento direto no intuito de reproduzir respostas que expressem as tendências comportamentais observadas em laboratório. Os resultados obtidos foram criticados e confrontados com os resultados experimentais para encontrar semelhanças e confirmações sobre o papel de cada fenômeno incluído na resposta global do solo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

7.2.1
Montagem das amostras

A tabela 7.1 apresenta as amostras montadas para a campanha de ensaios, as quais geraram-se a partir da inclusão combinada de:

- *Sucção controlada:* em todos os casos a mesma foi fixada em 50kPa.
- *Cimentação de grãos:* Variou-se a porcentagem de contatos entre grãos que foram definidos como cimentados no início do ensaio, assim como o valor da resistência do cimento, *Fc*, expressa em Newtons.
- *Quebra de grãos:* Variou-se a porcentagem de grãos definidos como sendo susceptíveis de quebra no início do ensaio, assim como o valor da resistência à quebra do grão, *Sc*, expressa em Newtons.
- *Matriz argilosa:* Variou-se a porcentagem de grãos definidos como grumos, assim como o valor do módulo volumétrico destes, *Kv*, expresso em grf/mm^3.

Foram geradas sete amostras de solo residual jovem, sendo todas elas montadas sobre a amostra muito fofa gerada para a validação do programa de análise (ver capítulo 5). Desta forma simula-se a estrutura porosa dos solos jovens. Em todas as amostras a sucção aplicada foi de 50kPa, e um terço dos grãos foi definido susceptível de quebra.

Tabela 7.1: Amostras discretas para a simulação de solos residuais jovens.

Tipo de solo		Compacidade de amostra	Cimentação de grãos		Matriz argilosa		Quebra de grãos		Sucção
			% contatos	Fc (N)	% grãos	Kv (grf/mm^3)	% grãos	Sc (N)	kPa
JOVEM	1	Muito Fofa	25	20	16,7	1,00E+04	33,3	400	50
	2	Muito Fofa	25	50	33,3	1,00E+04	33,3	300	50
	3	Muito Fofa	50	100	33,3	1,00E+04	33,3	300	50
	4	Muito Fofa	50	50	33,3	1,00E+04	33,3	300	50
	5	Muito Fofa	50	50	33,3	5,00E+03	33,3	300	50
	6	Muito Fofa	50	50	33,3	1,00E+03	33,3	300	50
	7	Muito Fofa	50	50	33,3	1,00E+03	33,3	150	50

A amostra N^{o}1 representa um solo com escassa e fraca cimentação de grãos, pouca presença de uma matriz argilosa, e grãos susceptíveis à quebra com resistência elevada. A amostra N^{o}2 representa um solo com escassa cimentação de grãos mas com um cimento mais resistente, maior presença de uma matriz argilosa, e grãos susceptíveis à quebra com resistência média. A amostra N^{o}3 representa um solo com importante ocorrência de cimentação de grãos com um cimento muito resistente, para a mesma presença de matriz argilosa e grãos susceptíveis à quebra que a amostra N^{o}2.

A amostra N^{o}4 mantém as características da amostra N^{o}3, mais diminuindo o valor da resistência do cimento. As amostras N^{o}5 e N^{o}6 são semelhantes à amostra N^{o}4, apenas variando o módulo volumétrico dos grumos argilosos para torná-los mais compressíveis. A amostra N^{o}7, finalmente, é semelhante à amostra N^{o}6, mas nela os grãos susceptíveis à quebra possuem uma baixa resistência à tal.

7.2.2. Ensaio edométrico

As sete amostras foram ensaiadas sob condições edométricas a partir de uma tensão inicial de 300kPa, e duplicando a carga para cada novo estágio. As curvas de adensamento e os valores dos parâmetros de compressibilidade delas obtidos são apresentados na figura 7.8.

Os históricos de ocorrência de quebras de grãos e de cimentação foram obtidos para cada ensaio, sendo mostrados na figura 7.9.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

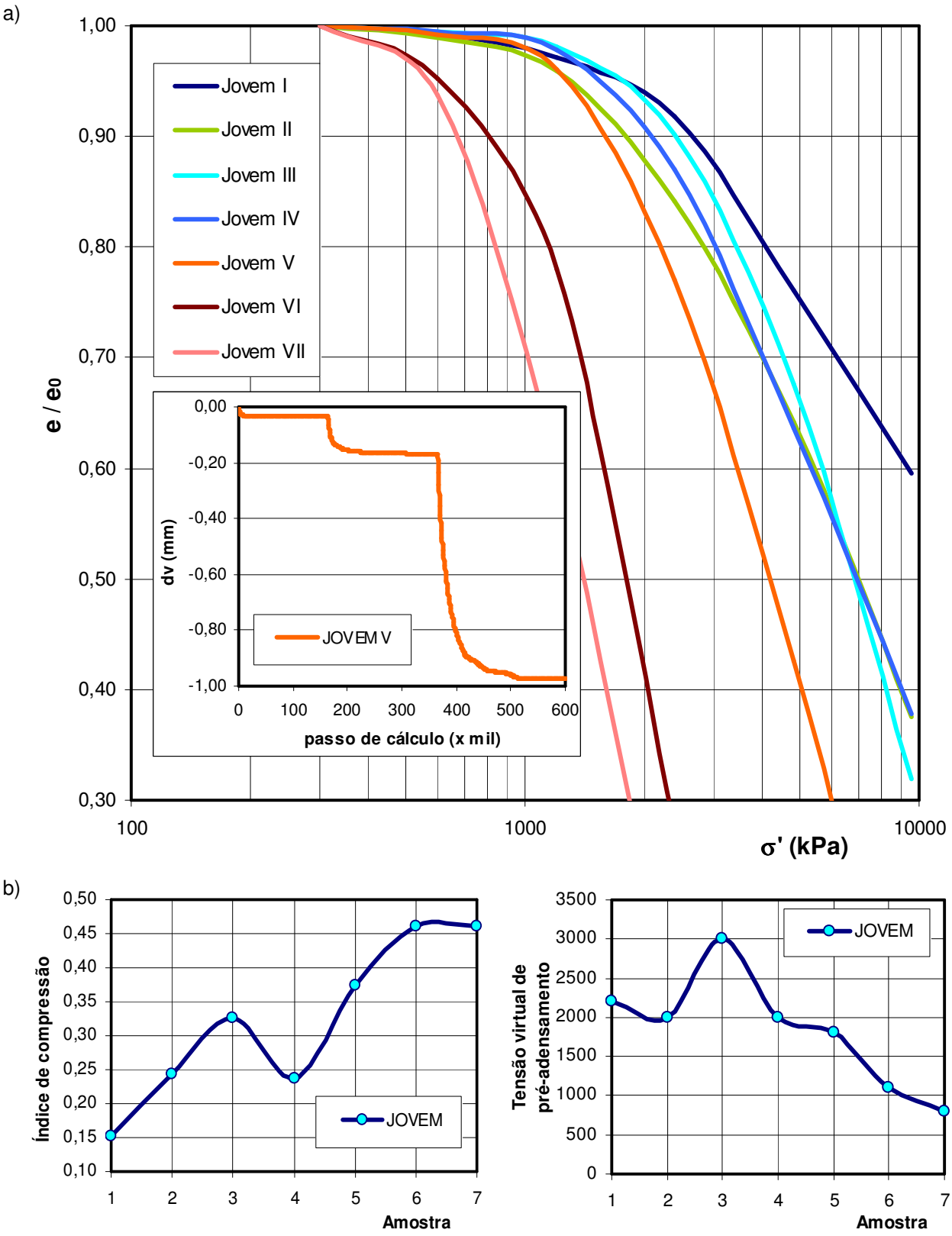
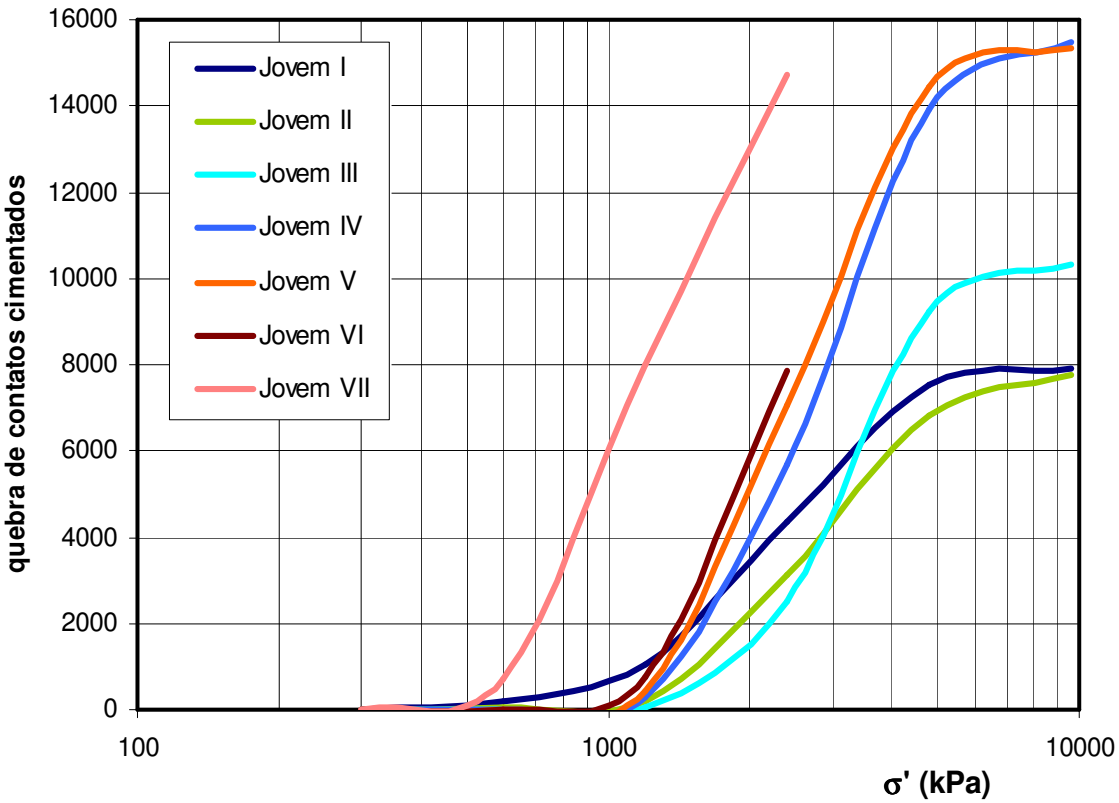


Figura 7.8: a) Curvas de adensamento normalizadas das amostras de solo residual jovem. Em detalhe a evolução no tempo da variação de altura da amostra "Jovem V". b) Parâmetros de compressibilidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

a)



b)

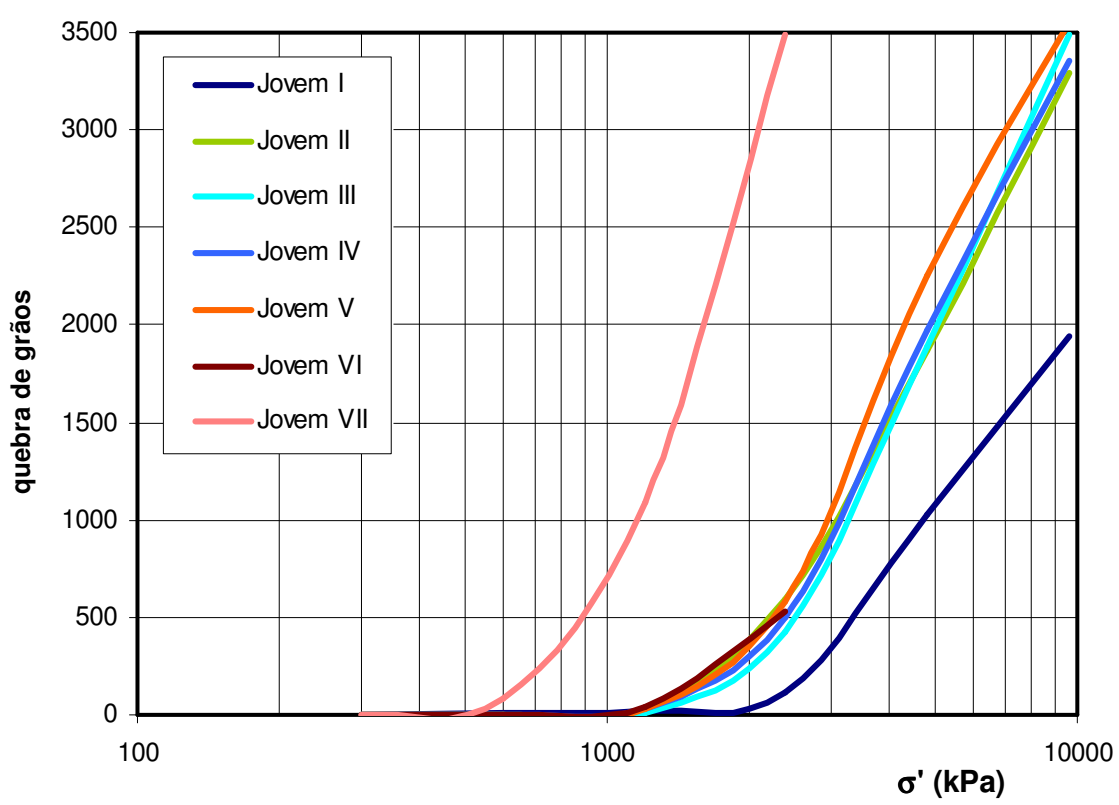


Figura 7.9: Histórico de quebras durante o ensaio edométrico em amostras de solo residual jovem: a) Quebra de cimentação; b) Quebra de grãos.

7.2.3.
Ensaio de cisalhamento direto

Foram executados ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada fixada em 50kPa nas sete amostras de solo residual jovem, para uma tensão vertical de 300kPa em todos os casos.

A figura 7.10 mostra o aspecto da estrutura residual gerada de forma discreta, onde podem-se perceber a presença da matriz argilosa, os grãos susceptíveis de quebra, e os contatos cimentados.

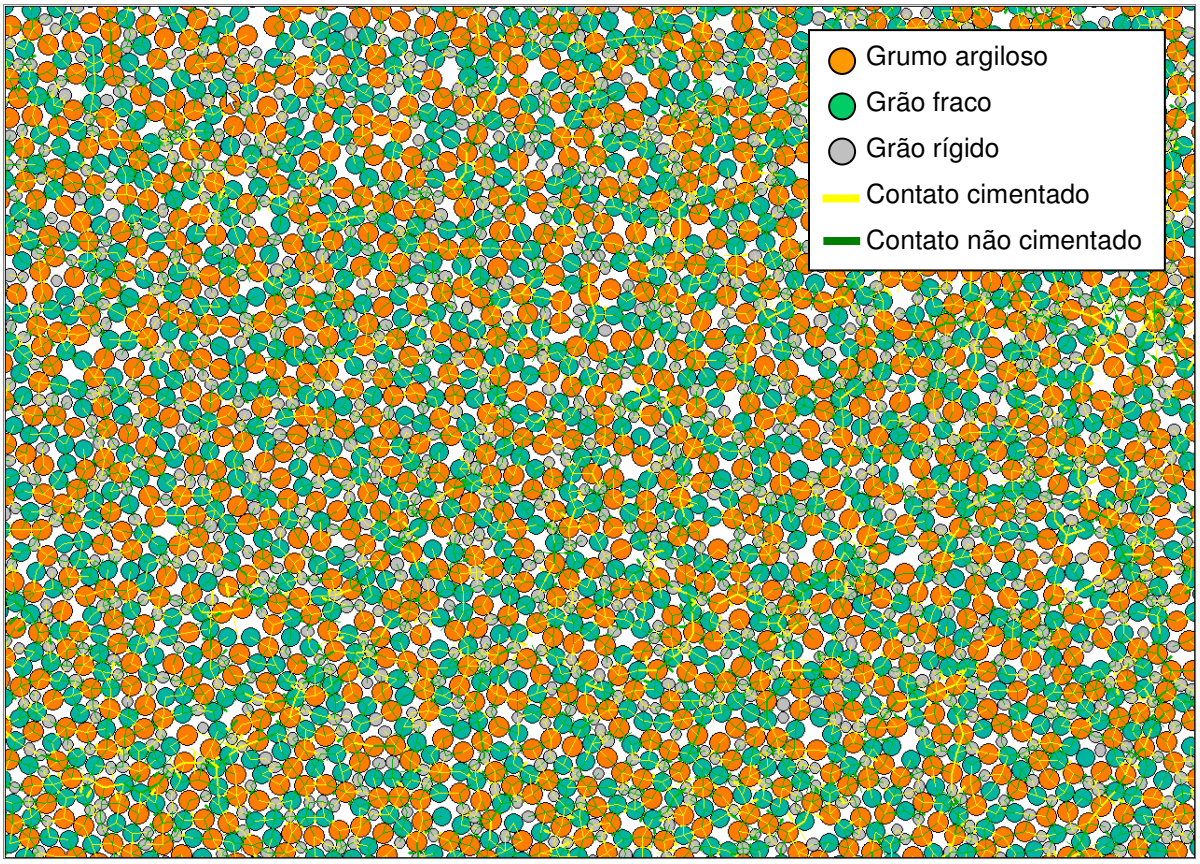


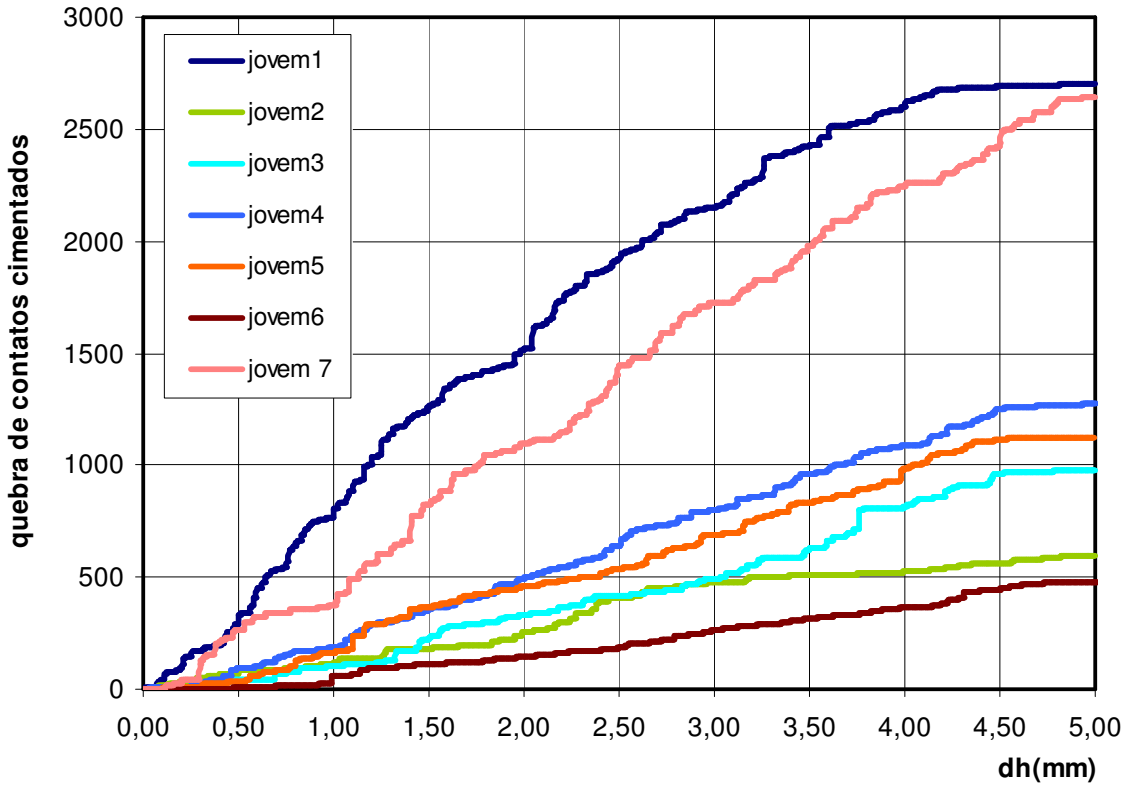
Figura 7.10: Detalhe de amostra discreta de solo residual jovem.

A figura 7.11 apresenta o histórico de ocorrência de quebras de contatos cimentados e quebra de grãos fracos durante os ensaios.

A figura 7.12 apresenta os resultados dos ensaios correspondentes às amostras N^{o}1 e N^{o}2. A figura 7.13 apresenta os resultados dos ensaios correspondentes às amostras N^{o}3 e N^{o}4. Finalmente, a figura 7.14 apresenta os resultados dos ensaios correspondentes às amostras N^{o}5, N^{o}6 e N^{o}7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

a)



b)

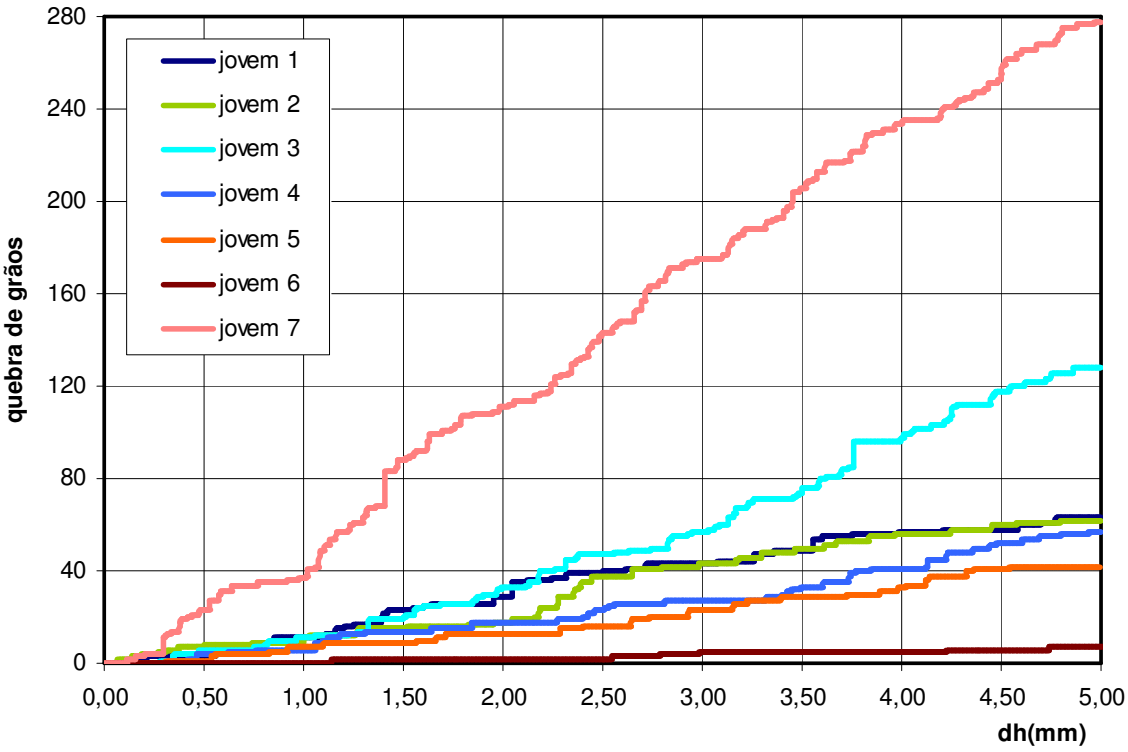
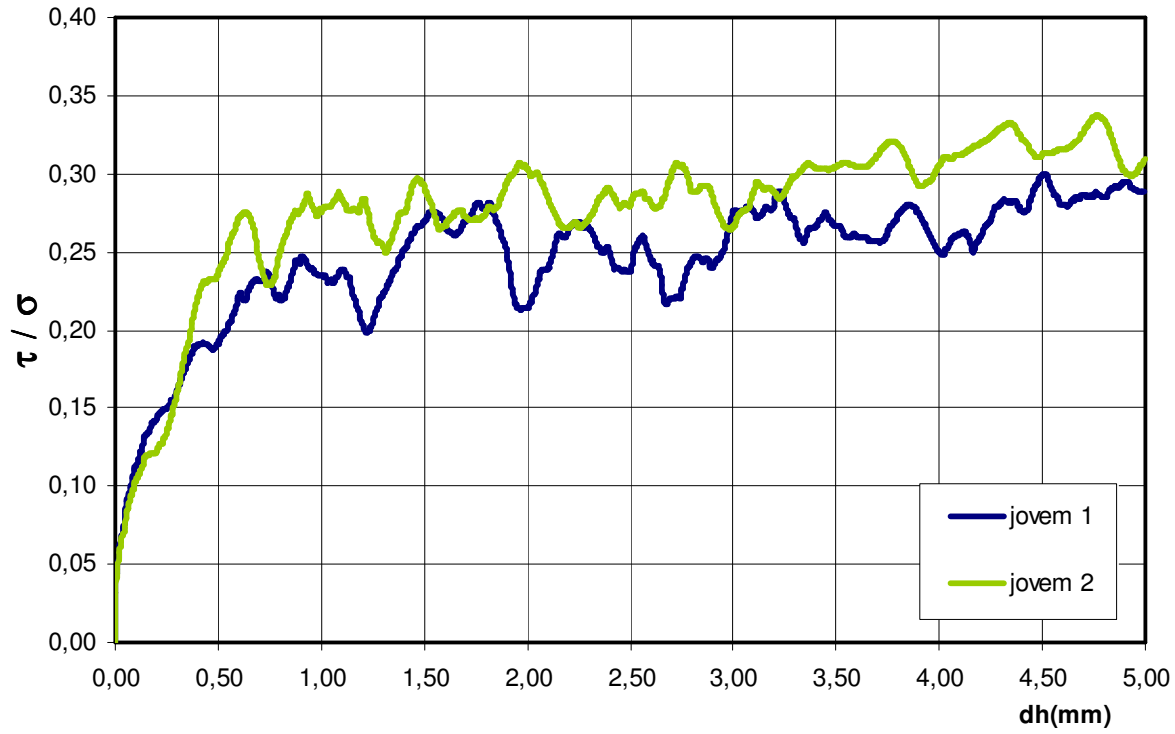


Figura 7.11: Histórico de quebras de cimentação e de grãos sob cisalhamento para as sete amostras de solo residual jovem.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

a)



b)

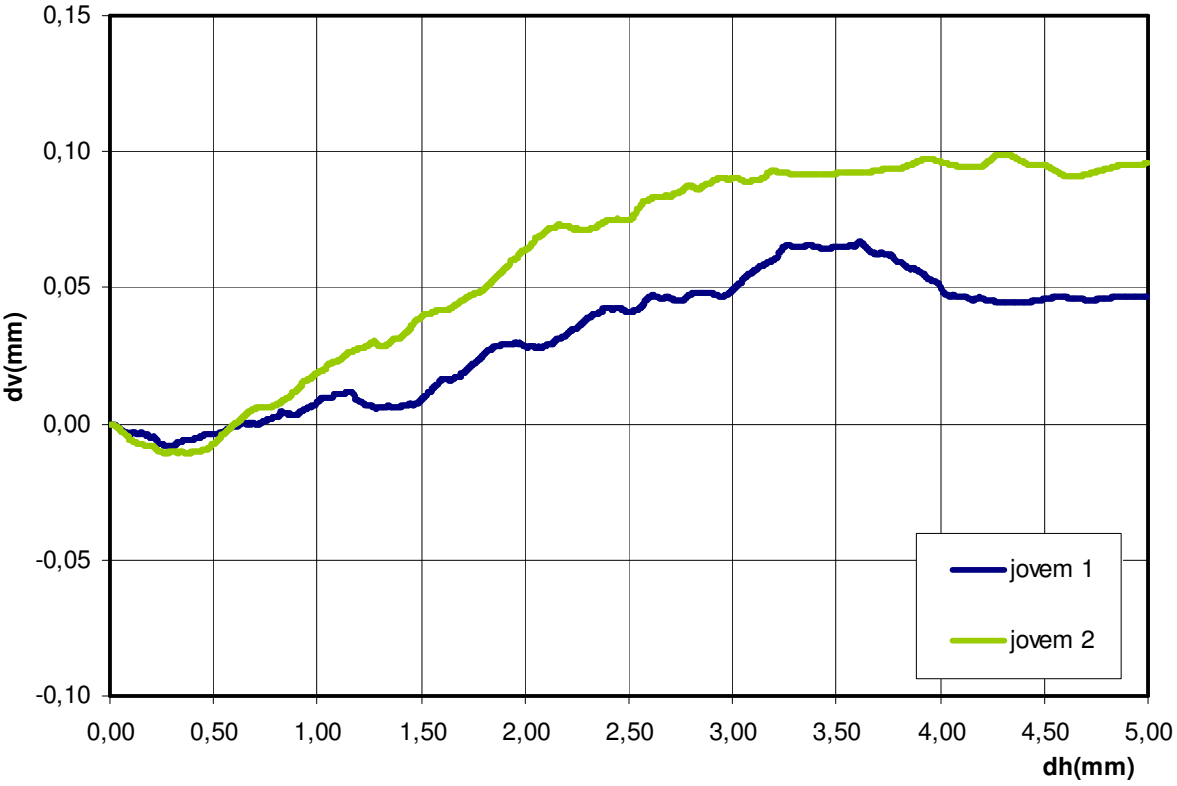
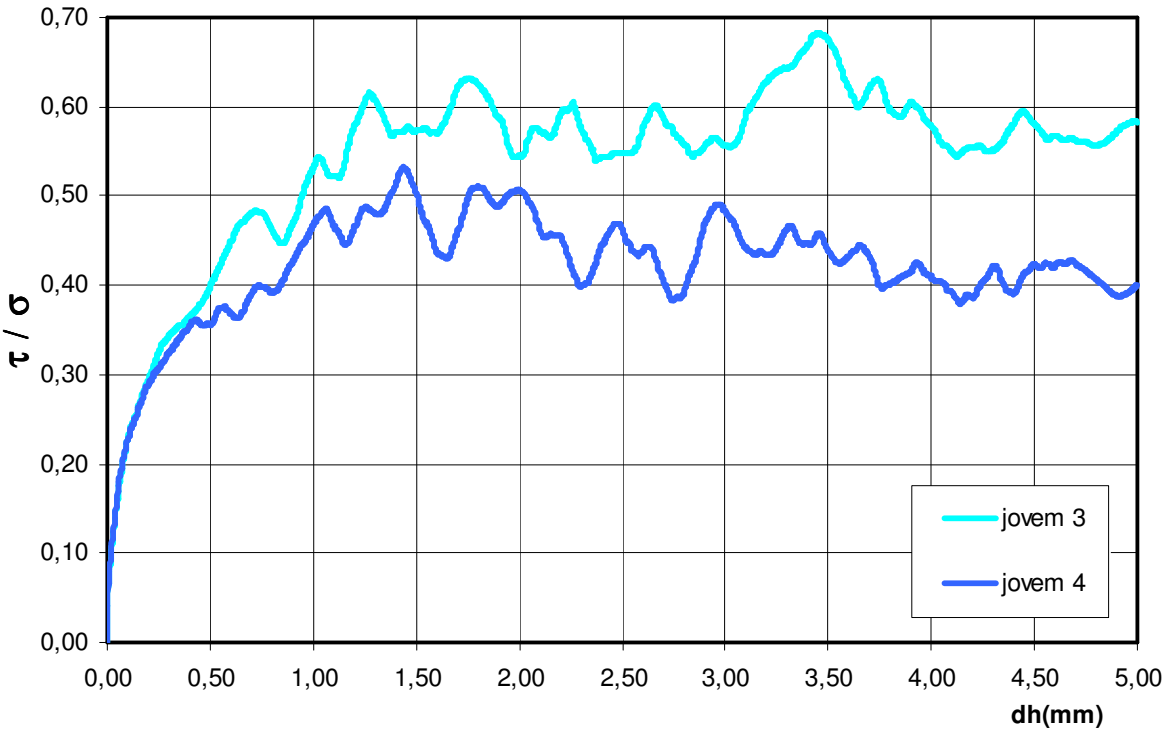


Figura 7.12: Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°1 e N°2, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

a)



b)

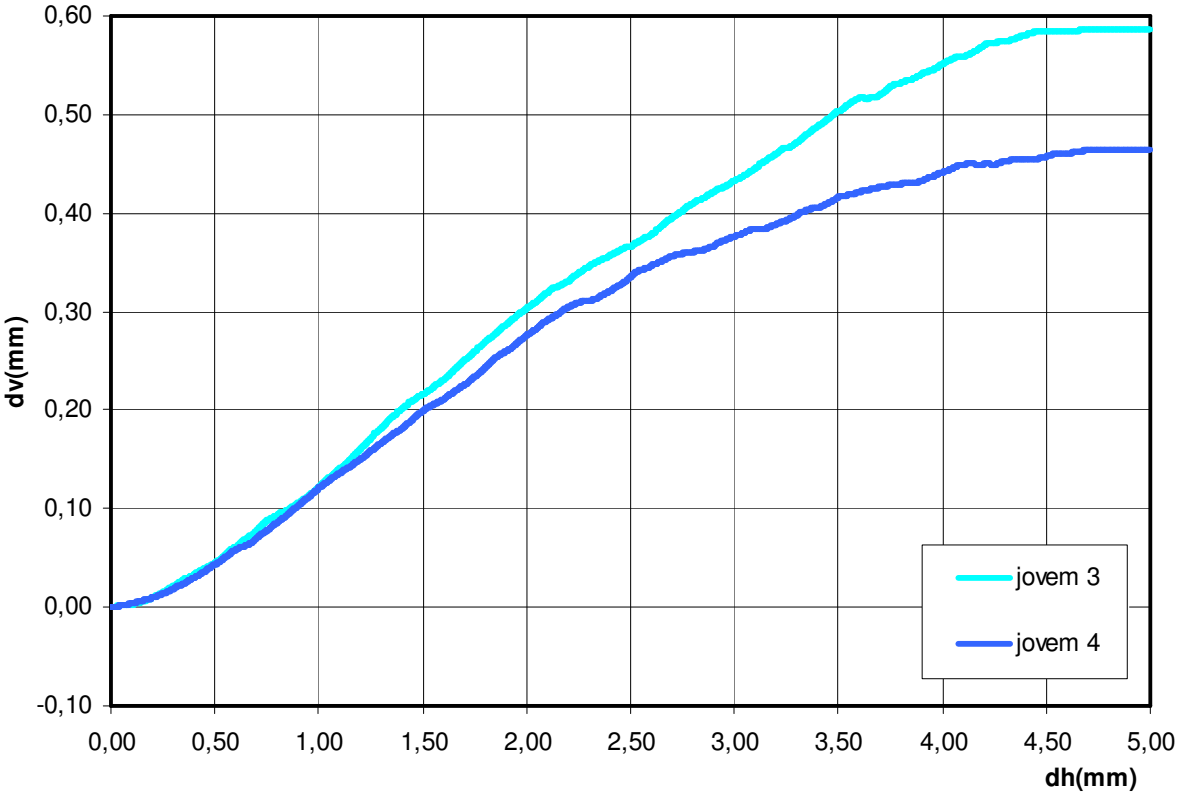
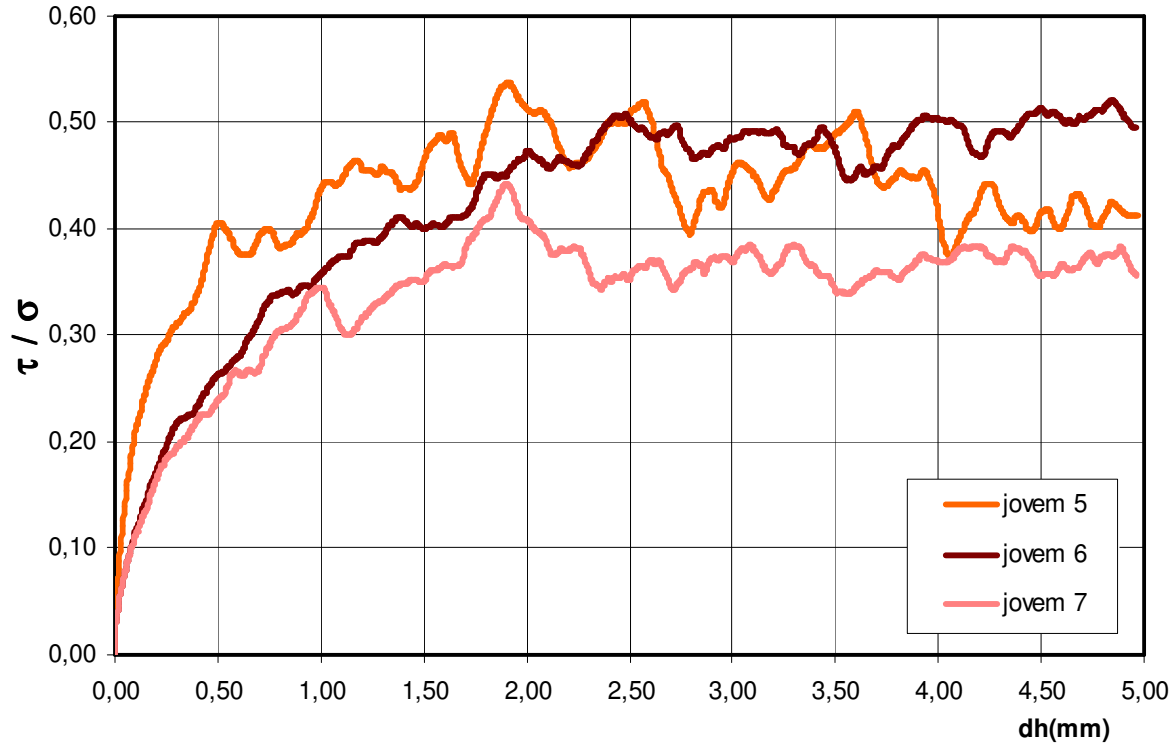


Figura 7.13: Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°3 e N°4, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

a)



b)

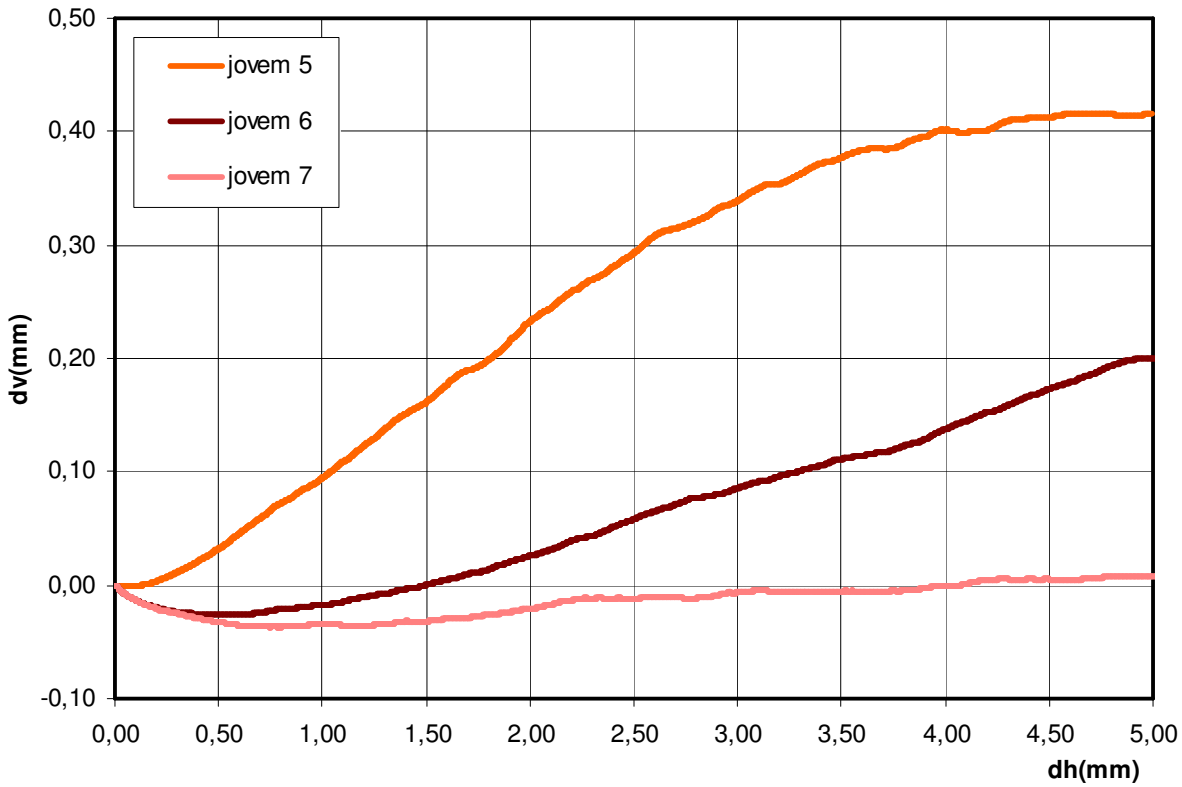


Figura 7.14: Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual jovem N°5, N°6 e N°7, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

7.2.4.
Análise dos resultados

- **Amostra N^{o}1:**

Esta amostra simula um solo residual jovem com estrutura porosa, com cimentação fraca e pouco intensa, com grãos quebradiços mas de elevada resistência à quebra, e com a formação de uma insipiente matriz argilosa pouco compressível.

O resultado do ensaio edométrico mostrou um solo com baixa compressibilidade devido à escassa presença da matriz argilosa e à elevada resistência dos grãos quebradiços. A escassa presença de uma matriz argilosa, junto ao efeito da cimentação, induziram um elevado valor da tensão virtual de pré-adensamento.

O resultado do ensaio de cisalhamento direto mostrou um solo pouco resistente, com baixa rigidez inicial e levemente dilatante. A cimentação fraca e pouco intensa foi rapidamente destruida, pelo que não induziu um comportamento rígido elástico pré-pico, nem mesmo o pico de resistência. Apenas influiu para estruturar levemente o solo e para, na ausência de uma matriz argilosa intensamente disseminada na amostra, produzir um comportamento volumétrico dilatante. Esta dilatância foi leve devido à elevada porosidade da amostra. A ocorrência de quebra de grãos foi escassa e teve pouca influência na resposta global.

- **Amostra N^{o}2:**

Esta amostra simula um solo residual jovem com estrutura porosa, com cimentação pouco intensa mas com cimento mais resistente, com grãos quebradiços de resistência média à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa pouco compressível.

O resultado do ensaio edométrico mostrou um solo mais compressível do que a amostra N^{o}1, devido à maior presença da matriz argilosa e à menor resistência dos grãos quebradiços. Isto se viu refletido no aumento no valor do índice de compressão. A cimentação escassa mas de maior resistência teve um efeito menor, já que os efeitos da matriz argilosa e a maior ocorrência de quebras induziram um menor valor da tensão virtual de pré-adensamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

Sob cisalhamento a cimentação de grãos da amostra, sendo mais resistente, foi pouco quebrada, com o qual tornou a massa de solo mais rija e com tendência dilatante. Isto, no entanto, foi atenuado pela presença intensa da matriz argilosa. Assim, esta amostra desenvolveu maior resistência ao cisalhamento e experimentou mais dilatância do que a amostra N^{o}1. Neste caso, e tal como aconteceu na amostra N^{o}1, a ocorrência de quebra de grãos foi escassa e pouco pesou na resposta global.

- **Amostra N^{o}3:**

Esta amostra simula um solo com estrutura porosa, com cimentação intensa e com cimento muito resistente, com grãos quebradiços de resistência média à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa pouco compressível.

O resultado do ensaio edométrico mostrou o efeito da forte cimentação da amostra. Comparando com a amostra N^{o}2, a tensão virtual de pré-adensamento aumentou por causa da cimentação, que aumentou o patamar elástico no comportamento mecânico. Também aumentou consideravelmente o índice de compressão, pois a desestruturação sofrida pela quebra massiva da cimentação fez tender a curva de compressão para a curva de um solo não estruturado.

Sob cisalhamento, a forte cimentação controlou a resposta do solo. A rigidez inicial foi elevada, assim como a resistência ao cisalhamento, mas o pico de resistência foi atetuado por causa da elevada porosidade, a compressibilidade da matriz argilosa, e a ocorrência de quebras de contatos cimentados ao longo do ensaio. A ocorrência de quebra de grãos também contribuiu neste sentido. O comportamento volumétrico, por causa da cimentação e também pela quebra de grãos, foi marcadamente dilatante.

- **Amostra N^{o}4:**

Esta amostra simula um solo residual jovem com estrutura porosa, com cimentação intensa e com cimento de resistência média, com grãos quebradiços de resistência média à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa pouco compressível. Trata-se da mesma amostra N^{o}3, mas com a resistência do cimento na metade do seu valor.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

O comportamento no ensaio edométrico, comparado a amostra N°3, mostrou uma diminuição considerável do índice de compressão e da tensão virtual de pré-adensamento. Isto deveu-se à menor resistência do cimento, pelo qual a ocorrência de quebras foi mais intensa, mas aconteceu gradativamente ao longo do ensaio.

No ensaio de cisalhamento direto, esta queda na resistência do agente cimentante não afetou a rigidez inicial, mas se viu refletida em uma menor resistência ao cisalhamento e na formação de um mais suave pico de resistência. O comportamento volumétrico também se viu afetado passando a ser menos dilatante que no caso da amostra N°3.

- **Amostra N°5:**

Esta amostra simula um solo com estrutura porosa, com cimentação intensa de um cimento resistente, com grãos quebradiços de resistência média à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa compressível. Trata-se da mesma amostra N°4, mas com maior compressibilidade na matriz argilosa.

O resultado do ensaio edométrico mostrou o efeito da maior compressibilidade na matriz argilosa. Assim, a tensão virtual de pré-adensamento foi menor, e o índice de compressão aumentou consideravelmente.

Sob cisalhamento, o aumento na compressibilidade da matriz argilosa tornou o comportamento volumétrico do solo menos dilatante, e diminuiu a ocorrência de quebras de contatos cimentados e de grãos, ao produzir um efeito equalizador das tensões que impede a concentração de tensões. A resistência ao cisalhamento não foi afetada de forma relevante, pois os efeitos da maior compressibilidade foram compensados pela menor ocorrência de quebras na cimentação.

- **Amostra N°6:**

Esta amostra simula um solo residual jovem com estrutura porosa, com cimentação intensa de um cimento resistente, com grãos quebradiços de resistência média à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa muito compressível. Trata-se da mesma amostra N°5, mas com uma elevada compressibilidade na matriz argilosa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

O resultado do ensaio edométrico mostrou o efeito acentuado da maior compressibilidade na matriz argilosa. Isto confirmou a tendência mostrada pela amostra N°5, pois diminuiú a tensão virtual de pré-adensamento, e o índice de compressão aumentou consideravelmente.

Sob cisalhamento, o comportamento foi diferenciado. A matriz argilosa muito compressível afetou claramente o comportamento do solo, mais atuou conjuntamente com a cimentação de grãos, pois seu efeito equalizador de tensões inibiu a quebra de contatos cimentados e de grãos fracos. Desta forma, o solo experimentou uma perda considerável de rigidez inicial, o comportamento volumétrico foi inicialmente contrátil e não houve pico de resistência. No entanto, a cimentação não foi destruida, pelo que a resistência máxima experimentada foi maior do que na amostra N°5, e a variação volumétrica passou suavemente de contrátil para dilatante.

- **Amostra N°7:**

Esta amostra simula um solo residual jovem com estrutura porosa, com cimentação intensa de um cimento resistente, com grãos quebradiços de baixa resistência à quebra, e com a presença de uma matriz argilosa muito compressível. Trata-se da mesma amostra N°6, mas com grãos quebradiços muito fracos.

O resultado do ensaio edométrico mostrou o impacto da baixa resistência dos grãos quebradiços. A ocorrência maçiça de quebra de grãos para baixos estágios de carga provocou a quebra generalizada da cimentação. Comparado com o comportamento da amostra N°6, este efeito não modificou o valor do índice de compressão, mas provocou uma queda no valor da tensão virtual de pré-adensamento.

No ensaio de cisalhemento direto, esta fraqueza dos grãos quebradiços provocou a ocorrência maciça de quebras, o que levou à desestruturação da massa de solo que induziu a ocorrência, também maciça, de quebra de contatos cimentados. Com desestruturação, a matriz argilosa controlou em maior parte a resposta do solo, com o que a resistência máxima atingida foi um poco menor do que a experimentada pela amostra N°6, ainda que com um pico de resistência. O comportamento volumétrico foi contrátil ao longo de todo o ensaio, já que a tendência dilatante que introduz a cimentação foi eliminada pela maciça ocorrência de quebras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

7.3.
Simulação de solos residuais maduros

Para a simulação do comportamento mecânico de solos residuais maduros, foram geradas amostras discretas seguindo as características micro e macro-estruturais apontadas no capítulo 2. Estas amostras foram ensaiadas à compressão confinada e cisalhamento, e os resultados são em seguida apresentados e analisados.

7.3.1.
Montagem das amostras

A montagem das amostras seguiu os seguintes critérios:

- Existência de uma matriz argilosa que controla o comportamento do solo conferindo-lhe características de solo mole;
- Estrutura porosa;
- Condição não saturada;
- Ausência de cimentação de grãos e de grãos susceptíveis à quebra;

A partir destes lineamentos foram geradas três amostras discretas utilizando as amostras fofa e muito fofa usadas para a validação do programa de análise. Em todos os casos a sucção aplicada foi de 50kPa, e não se incluiram os fenômenos de quebra de grãos e cimentação de grãos. Estas estão resumidas na tabela 7.2.

Tabela 7.2: Amostras discretas para a simulação de solos residuais maduros.

Tipo de solo		Compacidade de amostra	Cimentação de grãos		Matriz argilosa		Quebra de grãos		Sucção
			% contatos	Fc (N)	% grãos	Kv (grf/mm3)	% grãos	Sc (N)	kPa
MADURO	1	Muito Fofa	-	-	50,0	1,00E+04	-	-	50
	2	Fofa	-	-	50,0	1,00E+03	-	-	50
	3	Fofa	-	-	50,0	2,00E+03	-	-	50

A amostra N^{o}1 é do tipo muito fofo, onde metade dos grãos forma a matriz argilosa. As amostras N^{o}2 e N^{o}3 são do tipo fofo, onde metade dos grãos forma a matriz argilosa, com diferentes valores de compressibilidade dos grumos. A manipulação dos valores de compressibilidade dos grumos e o tipo de compacidade das amostras tem por objetivo assegurar o comportamento contrátil das amostras.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

7.3.2.
Ensaio edométrico

As três amostras de solo residual maduro foram ensaiadas a compressão sem deformação lateral por estágios de carga, a partir de uma tensão inicial de 300kPa, e duplicando a carga para cada novo estágio. Os resultados mostram-se na figura 7.15.

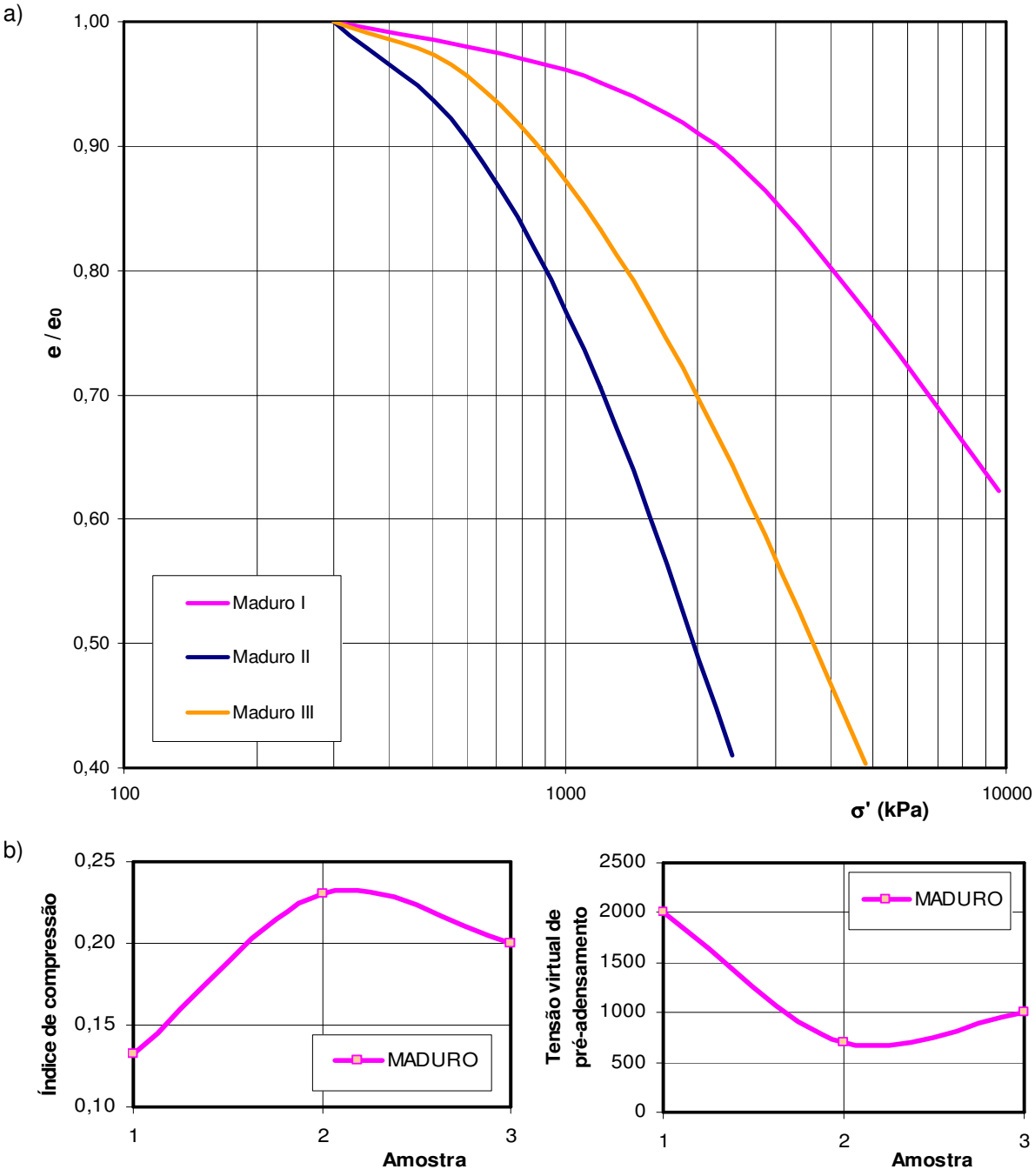


Figura 7.15: a) Curvas de adensamento normalizadas das amostras de solo residual maduro; b) Parâmetros de compressibilidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

7.3.3.
Ensaio de cisalhamento direto

Foram executados ensaios de cisalhamento direto com sucção controlada nas três amostras de solo residual maduro montadas. O valor da sucção aplicada na base e topo da caixa foi fixado em 50kPa. A tensão vertical aplicada foi de 300kPa em todos os casos.

A figura 7.16 mostra o aspecto da estrutura de solo maduro gerada de forma discreta. Na mesma se pode perceber a presença ostensiva da matriz argilosa formada por grumos aleatoriamente distribuídos na amostra. O restante dos elementos discretos foi considerado como partícula rígida.

A figura 7.17 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados nestas amostras.

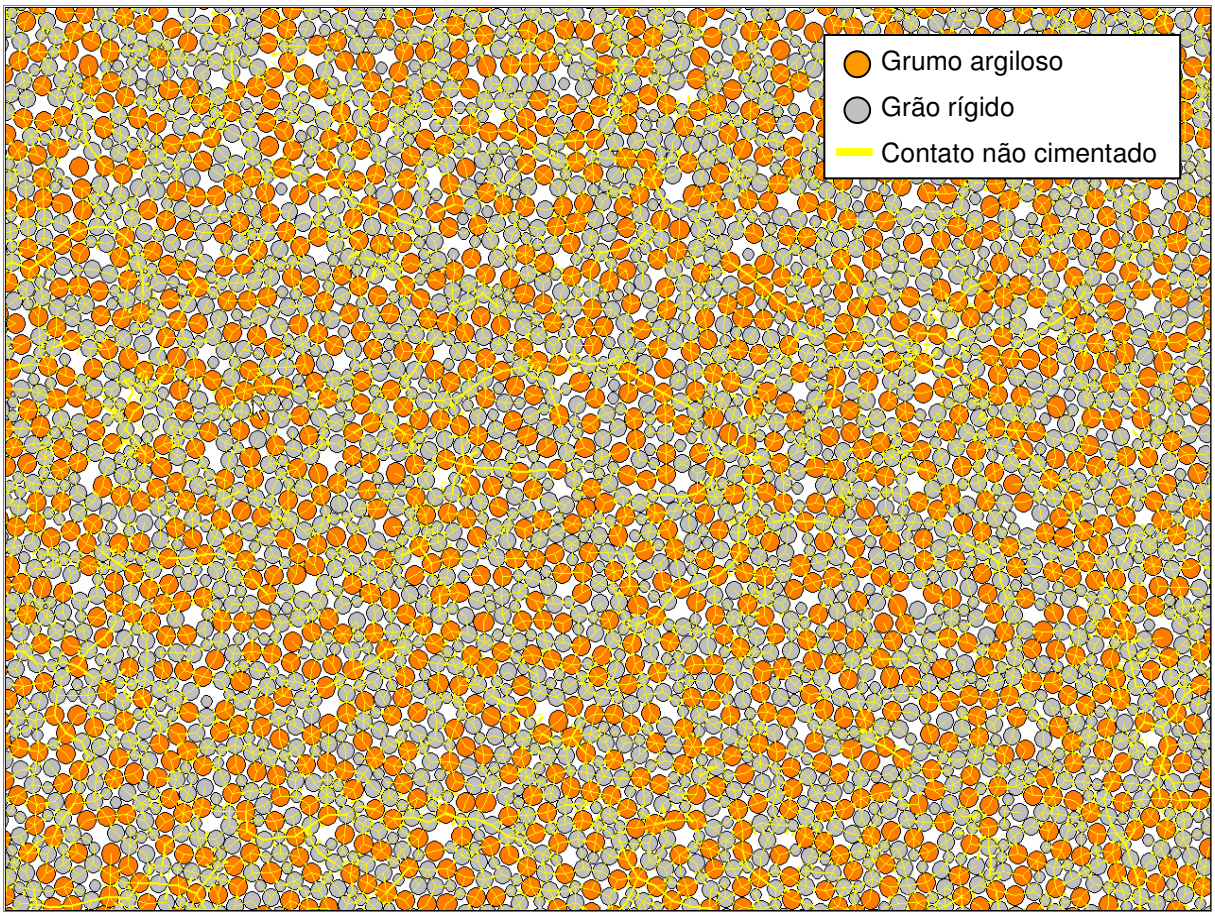


Figura 7.16: Detalhe de amostra de solo residual maduro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

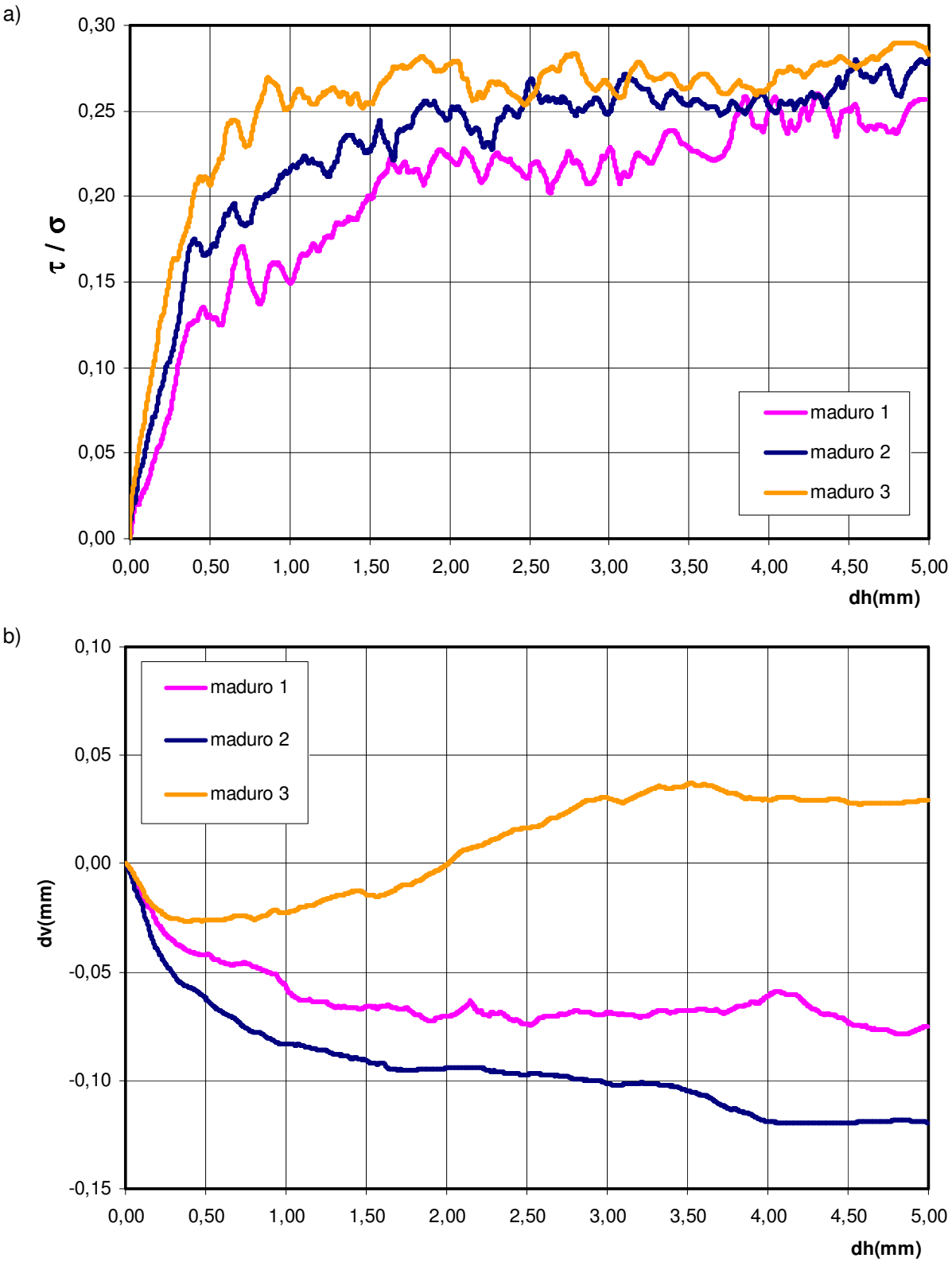


Figura 7.17: Simulação do ensaio de cisalhamento direto em amostra de solo residual maduro N°1, N°2 e N°3, para tensão vertical de 300kPa e sucção de 50kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

7.3.4.
Análise dos resultados

- **Amostra N^{o}1: Solo poroso argiloso (argila de baixa compressibilidade)**

Esta amostra simula um solo residual maduro e muito poroso. A matriz argilosa é de baixa compressibilidade. O resultado do ensaio edométrico mostrou um comportamento de solo moderadamente compressível por causa da estrutura porosa da amostra, combinada com uma matriz argilosa pouco compressível.

O resultado observado sob cisalhamento foi o de um solo pouco resistente e compressível, com comportamento volumétrico contrátil. A rigidez inicial foi baixa, assim como a resistência ao cisalhamento, a qual evolui suavemente na medida que o solo contrai, até se estabilizar no estado crítico.

- **Amostra N^{o}2: Solo argiloso (argila de alta compressibilidade)**

Esta amostra simula um solo poroso e com uma matriz argilosa muito compressível. No ensaio edométrico o comportamento foi altamente compressível. Em comparação com a amostra N^{o}1, aumentou sensivelmente o índice de compressão, e caiu consideravelmente o valor da tensão virtual de pré-adensamento.

O resultado observado sob cisalhamento foi o de um solo de baixa resistência e com comportamento contrátil, devido à compressibilidade da matriz argilosa. A rigidez inicial foi baixa, assim como resistência ao cisalhamento, a qual evoluiu suavemente sem ocorrência de qualquer pico. Comparando com a amostra N^{o}1 (porosa com matriz argilosa pouco compressível), esta amostra, menos porosa e com uma matriz argilosa mais compressível, experimentou uma maior contração, e uma maior resistência ao cisalhamento por causa da sua estrutura mais compacta.

- **Amostra N^{o}3: Solo argiloso (argila de compressibilidade média)**

Esta amostra simula um solo poroso e com uma matriz argilosa medianamente compressível. No ensaio edométrico, a curva situou-se entre as curvas das amostras N^{o}1 e N^{o}2, devido ao valor médio da compressibilidade dos grumos. Igualmente, os valores do índice de compressão e da tensão virtual de pré-adensamento situaram-se entre os valores respectivos das amostras N^{o}1 e N^{o}2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA

No ensaio de cisalhamento direto, esta amostra se diferenciou das anteriores, pois seu comportamento volumétrico, inicialmente contrátil, tornou-se levemente dilatante. Isto foi provocado pela menor compressibilidade da matriz argilosa, em comparação com a amostra N^{o}2. Em consonância com este comportamento volumétrico, a rigidez inicial da amostra foi maior, e a resistência ao cisalhamento também cresceu, mas sem a formação de qualquer pico de resistência.

7.4. Conclusões

Neste capítulo se tentou modelar de forma discreta a resposta mecânica observada em alguns solos residuais jovens e maduros. Amostras discretas foram montadas a partir da inclusão dos fenômenos físicos estudados no capítulo 2, formulados e implementados no capítulo 4, e avaliados no capítulo 6. Esta inclusão dos fenômenos seguiu os critérios levantados no capítulo 2, sobre a intensidade da sua ocorrência no solo em função do grau de intemperismo. Desta forma, a quebra de grãos e a cimentação de grãos foram incluidas nas amostras jovens e não nas maduras. A matriz argilosa foi incluída levemente nas amostras jovens e maciçamente nas amostras maduras. Já a condição não saturada foi incluida em ambos casos. A compacidade das amostras refletiu a porosidade observada nas massas residuais, utilizando-se para isto as amostras fofa e muito fofa.

Os resultados obtidos com estas amostras mostraram uma coerência na resposta global, ao mesmo tempo que permitiram a visualização da influência que cada fenômeno presente imprimiu ao comportamento do solo, variando de acordo com a intensidade da sua presença na amostra e dos valores dados aos seus parâmetros.

As amostras jovens conseguiram reproduzir diversos tipos de solos residuais saprolíticos, com e sem resistência de pico, com variada rigidez inicial e comportamento volumétrico. Na amostra N^{o}7 conseguiu-se reproduzir um solo resistente, com pico de resistência, mas com comportamento volumétrico contrátil, que caracteriza o comportamento de alguns solos residuais jovens. As amostras maduras também conseguiram modelar o comportamento de solos residuais maduros, argilosos e porosos, de comportamento contrátil e baixa resistência.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0321280/CA