

5

Validação do Modelo de Análise Micro-Mecânica

Uma vez incorporadas no código de elementos discretos as formulações correspondentes à modelagem dos fenômenos micro-mecânicos estudados, o programa de análise precisa ser calibrado e validado como tal antes de ser empregado na simulação do comportamento mecânico de solos residuais. Neste capítulo são definidos os critérios para a validação do modelo, que inclui o processo de calibração dos parâmetros e a análise da capacidade de simulação para diferentes trajetórias de tensão. A seguir, apresenta-se a justificativa para a calibração realizada, assim como os resultados dos exemplos de validação. Finalmente são discutidos os resultados obtidos, apontando as capacidades e limitações do modelo.

5.1.

Critérios para a validação do modelo

5.1.1.

Roteiro de validação

Antes de prosseguir com o objetivo final de simular o comportamento hidromecânico dos solos residuais resulta imperativo estabelecer e executar um amplo roteiro de calibração e validação do programa de análise na suas funções básicas, de maneira que venha a fornecer um diagnóstico preciso sobre a sua capacidade de representação e sirva como alicerce para o conjunto de simulações mais complexas que envolverão as especificidades implementadas nesta pesquisa.

Neste *roteiro* os objetivos consistem em:

- a) Calibrar os parâmetros básicos do programa relacionados com o sistema de contato mola-amortecedor e o ciclo de cálculo por relaxação dinâmica, de maneira a representar adequadamente o comportamento do solo como meio particulado, especificamente o comportamento volumétrico (confinamento) e o mecanismo de atrito.
- b) Validar o programa já calibrado, a partir da comprovação da sua capacidade de modelagem pela simulação satisfatória de outras trajetórias de carga e deslocamento para diferentes condições iniciais.

5.1.2. Ensaio de referência: cisalhamento direto

Para este processo, a simulação de referência escolhida foi o ensaio de cisalhamento direto de solos, o qual servirá aos propósitos antes citados. Este ensaio foi escolhido por apresentar as seguintes vantagens em comparação com outros ensaios:

- Similitude da condição do ensaio (deformação plana) com a modelagem 2D do modelo de análise.
- Plano de ruptura imposto pelo deslocamento relativo das partes da caixa, o que reduz a variabilidade das respostas.
- Maior facilidade de estabelecer as condições de contorno do ensaio (paredes rígidas, forças e velocidades impostas).
- Simula explicitamente o mecanismo de atrito na área cisalhada.
- Fornece uma estimativa concreta da resistência do solo através da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb calculada a partir da resposta dos ensaios.
- Na bibliografia conta-se com alguns trabalhos recentes de simulação por MED deste ensaio, que servirá como material de consulta e comparação no processo de validação.

O esquema do ensaio de cisalhamento direto é apresentado na figura 5.1. Certas considerações devem ser feitas antes de encarar a calibração, em relação ao modelo proposto (suas hipóteses, capacidades e limitações de representação) assim como no referente ao próprio ensaio escolhido. Estas considerações serão úteis para o cabal entendimento das respostas obtidas do modelo e auxiliarão no processo de calibração.

Considerações sobre o modelo numérico

Algumas características e hipóteses próprias do modelo discreto influem na capacidade de simulação de solos, a saber:

- *Configuração geométrica.* Os elementos utilizados são tipo disco, com o qual a geometria dos grãos de solo modela-se como cilindros circulares de espessura unitária. Sabe-se que a forma dos grãos influi no comportamento mecânico do solo, onde a angulosidade dos grãos se reflete em um maior atrito. Desta forma,

há uma limitação de modelagem que influirá nos valores de resistência ao cisalhamento.

- *Modelo 2D.* Isto constitui outra limitação na modelagem de solos, pois todos os efeitos da terceira dimensão são desconsiderados. No ensaio de cisalhamento direto, não entanto, esta discrepância se vê minimizada, pois a caixa de cisalhamento se encontra em estado de deformação plana.
- *Comportamento constitutivo.* Assumido elástico linear e sub-amortecido, o cálculo têm caráter dinâmico. O sub-amortecimento impede ao sistema de atingir uma configuração estática, pelo qual os movimentos relativos são minimizados, mas não zerados. Esta condição pode induzir o adensamento não desejado do sistema por causa desta vibração residual. No processo de montagem dos corpos de prova para realizar os ensaios de cisalhamento direto, percebe-se este efeito na tendência à configuração densa do modelo, o que deve ser controlado limitando o tempo de cálculo destinado ao adensamento da amostra sob a carga vertical (N).

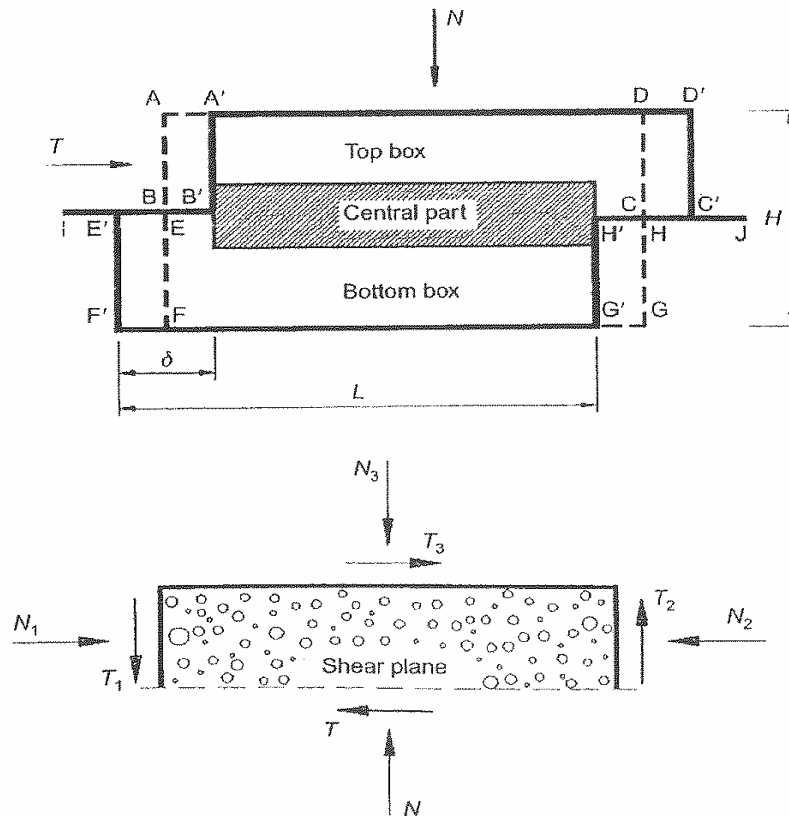


Figura 5.1: Esquema do ensaio de cisalhamento direto e forças atuantes.

Considerações sobre o ensaio de referência

No referente especificamente à simulação do ensaio de cisalhamento direto, importa considerar:

- *Velocidade do ensaio.* A velocidade deve ser tal que garanta a condição quase-estática para o ensaio, o que significa um limite superior para a mesma. Velocidades maiores não permitem o natural rearranjo das partículas, criando regiões de alta energia de deformação em torno das paredes que deslocam, o que adultera a resposta obtida. Por outro lado, velocidades extremamente baixas tornam o ensaio muito demorado, sem maior influência sobre a resposta do ensaio.
- *Parte da caixa que desloca.* O ensaio de cisalhamento direto executa-se de duas maneiras: a) deslocando a parte superior da caixa com a parte inferior fixa; b) deslocando a parte inferior da caixa com a parte superior fixa. Mas as condições de borda em ambas as partes da caixa diferem (base fixa e tampa com carregamento normal aplicado), pelo que deve esperar-se diferenças de resposta nas simulações numéricas.
- *Separação entre as partes da caixa.* A separação das partes da caixa de cisalhamento direto é outro assunto de discrepâncias no âmbito da geotecnia laboratorial, tendo influência na resposta do solo pela possível perda de material. Interessa saber quais os efeitos da separação da caixa no comportamento observado do solo e qual a separação mais adequada para as simulações numéricas.
- *Atrito nas paredes.* O atrito entre o solo e as paredes da caixa tem influência preponderante na resposta do solo. As forças de atrito T (ver figura 5.1) devem ser levadas em conta a fim de obter uma avaliação ajustada do estado de tensões no plano de falha. Também deve ser levada em conta presença de uma placa acanalada geralmente usada na parte inferior da caixa para favorecer o mecanismo de atrito na base.
- *Massa inercial da tampa.* A tampa da caixa merece especial atenção, pois é a única a receber carregamento externo e com liberdade de deslocamento, equilibrando-se a partir das forças de contato do solo. Por tal motivo, e se

- tratando de um algoritmo de cálculo dinâmico, a massa da tampa deve ser estabelecida para o cálculo da sua aceleração. O valor da massa inercial da tampa afeta tanto a resistência quanto o comportamento volumétrico.
- *Relação de dimensões da caixa.* Existem caixas de cisalhamento de dimensões variadas, e a relação altura/base tem influência no mecanismo de cisalhamento, o que deve ser levado em conta.
 - *Upscaling.* Realizar um ensaio simulando o tamanho real das partículas torna-se em geral inviável por dois motivos: a) o elevado número de elementos necessários; b) a dificuldade para reproduzir a distribuição de tamanhos das partículas de acordo com a curva granulométrica do solo real. A técnica de *upscaling* vem auxiliar neste ponto, propondo a translação da curva granulométrica para os grossos (figura 5.2). Desta forma resolve-se a dificuldade do número de partículas, e enquanto à distribuição de tamanhos define-se um número limitado de diâmetros de partículas equivalentes, tal que a partir delas se possa reproduzir a mesma curva granulométrica. Esta técnica permite uma aproximação proporcionada, mas resta ainda a necessidade de avaliar qual o efeito do *upscaling* na resposta do ensaio, o que deve ser estudado através da relação de tamanhos *grão-caixa*.

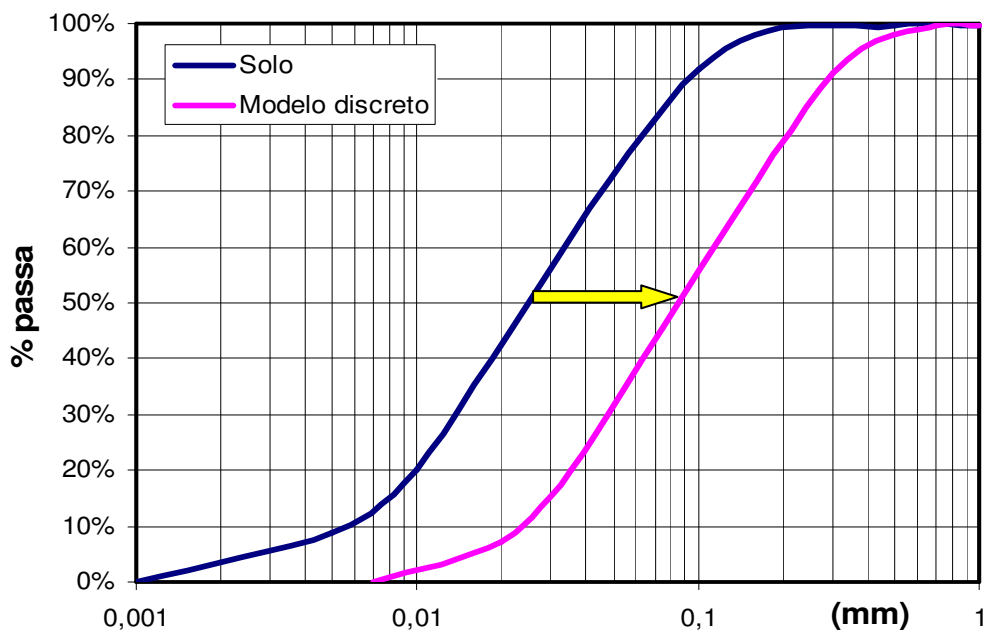


Figura 5.2: Técnica de *upscaling*.

5.1.3.

Outras simulações do ensaio de cisalhamento direto usando MED

A simulação do ensaio de cisalhamento direto via elementos discretos tem sido alvo de pesquisas recentes no âmbito acadêmico. Estes trabalhos são sumarizados a seguir, apontando suas características, hipóteses e resultados, que servirão como marco de referência para o processo de calibração e validação.

- Hainbuchner *et al* (2003) simularam o cisalhamento de areias com o programa comercial *PFC2D* (Cundall & Strack, 1979). Diversas amostras foram geradas utilizando a técnica de upscaling com fatores de escala de 20, 30, 35 e 40, empregando respectivamente 10.000, 4.500, 3.500 e 2.500 elementos tipo disco com 5 tamanhos diferentes, em arranjos do tipo denso e fofo. Os ensaios foram executados para tensões verticais de 100, 200 e 300kPa.

Os resultados mostraram que a resistência pelo mecanismo de atrito cresceu com o fator de escala, o que aponta que a técnica pode gerar uma resistência adicional que torna a representação inválida, a menos que a parcela de resistência devida ao defeito na representação possa ser mensurada. Desta forma, deve-se avaliar qual o fator de escala limite tal que este efeito indesejado não aconteça.

- Sullivan *et al* (2004) pesquisaram o comportamento de solos sob cisalhamento pela análise comparativa a três dimensões de um modelo físico – utilizando esferas de aço – e um modelo numérico discreto (*PFC3D*). Os modelos físico e numérico usaram a mesma caixa de cisalhamento direto, de 60mm de lado por 21mm de altura total, onde desloca a parte inferior da mesma enquanto a parte superior permanece fixa. Foram assumidas três níveis de tensão vertical: 54.5kPa, 109kPa e 163.5kPa.

O modelo físico consistiu de 11.700 esferas de aço, de diâmetro 0.9922mm, dispostas de forma aleatória e adensadas por cinco golpes de martelo em cada lateral da caixa para favorecer o adensamento da amostra. De maneira semelhante, o modelo numérico discreto foi gerado empregando o mesmo número de elementos de igual tamanho. Uma vez depositados os elementos em uma caixa de maior capacidade, diminuiu-se gradativamente o tamanho da mesma até ajustar o mesmo volume interior da caixa do modelo físico. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostraram que a resposta do modelo numérico apresentou maior rigidez e menor

ângulo de atrito (aproximadamente 20°) do que o modelo físico. As discrepâncias nos resultados foi atribuída a deficiências na geração das amostras de elementos discretos.

- Liu *et al* (2005) empregaram o programa de elementos discretos GRADIA (Yamamoto, 1995) para analisar o comportamento 2D de amostras fofas e densas sob cisalhamento, pela análise comparativa com resultados em modelos físicos (cilindros de alumínio). As amostras foram montadas a partir de cilindros de 5 e 9mm de diâmetro, colocados em uma caixa de 40cm de largura, e uma altura de aproximadamente 30cm. Dispuseram-se dois arranjos, um fofo ($e_0 = 0.233$) e outro denso ($e_0 = 0.196$). No caso numérico, as amostras fofo e densa foram obtidas variando o valor do atrito entre os elementos discretos.

A ênfase da pesquisa colocou-se em mensurar a influência do atrito do solo com as paredes da caixa, e como as forças geradas por este mecanismo afetam o campo de tensões no plano de falha. No caso de amostras densas, as forças de atrito na interfase com as paredes da caixa superior atuam com sentido para baixo no solo, em oposição à tendência dilatante deste; já em amostras fofas atuam para cima, em oposição à tendência contractante do solo. Desta forma, a tensão vertical atuante no plano de falha difere da tensão vertical aplicada externamente. Em amostras densas a tensão vertical atuante é maior do que a aplicada, enquanto que em amostras fofas sucede ao contrario. Prova-se, assim, que a relação σ/τ pode ser sub ou sobreestimada se calculada a partir das tensões aplicadas, sem levar em conta as forças de atrito. Os autores ainda propõem algumas modificações na estrutura física da caixa de cisalhamento direto no intuito de minimizar a geração de forças de atrito.

- Lobo-Guerrero & Vallejo (2005) utilizaram o programa *PFC2D* para estudar o fenômeno da quebra de grãos sob cisalhamento, para o qual implementaram e acoplaram ao código de elementos discretos uma rotina para o cálculo da quebra de grãos. O ensaio brasileiro de tração por compressão diametral foi adotado como critério de quebra, a qual foi simulada pela substituição do grão original por um arranjo de 8 (oito) grãos de 3 (três) tamanhos diferentes, dispostos de maneira tal que não há superposição entre eles, e todos ficam circunscritos no elemento original. Não se preserva, neste caso, a massa do elemento que quebra.

A simulação do ensaio de cisalhamento direto foi levada a cabo com uma amostra de 48 elementos, todos eles susceptíveis de quebra. Os resultados da pesquisa mostraram uma queda na resistência de atrito por causa da quebra de grãos, e um comportamento volumétrico dilatante por causa do rearranjo dos elementos combinado com a tendência à contração devida à mudança para os finos na distribuição granulométrica da amostra (ver figura 5.3). Cabe destacar que as curvas de resistência resultaram caóticas e não guardaram uma correspondência com as curvas experimentais de solos, o que deve-se certamente à não observância dos limites de *upscaling* e especificamente na relação de tamanhos grão-caixa.

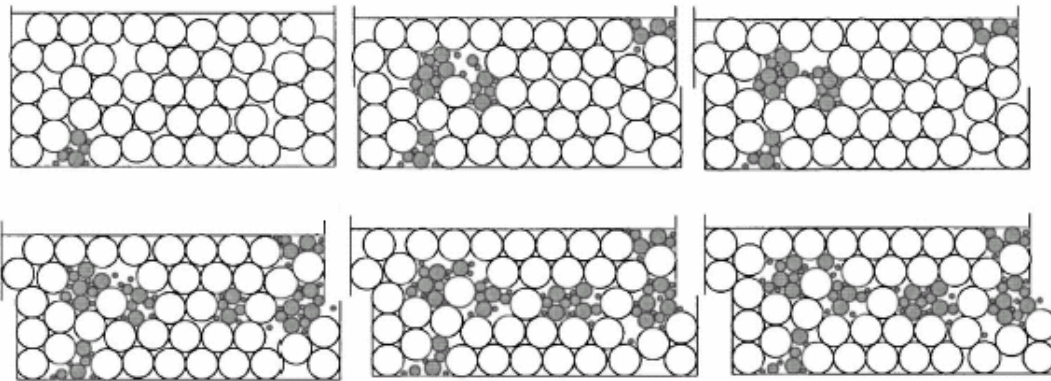


Figura 5.3: Simulação de quebra de grãos sob cisalhamento (Lobo-Guerrero & Vallejo, 2005).

- Zhang & Thornton (2007) pesquisaram também o comportamento do solo sob cisalhamento por simulações discretas a duas dimensões, focalizando o comportamento do solo na banda de cisalhamento formada em torno do plano de falha. Os ensaios foram executados para elevadas tensões verticais (10, 15 e 20MPa), a fim de se obterem amostras densas.

Os resultados da pesquisa mostraram as seguintes conclusões:

- A dilatância ocorrida na banda de cisalhamento é muito maior do que a que pode ser deduzida a partir das medições no contorno da caixa.
- A taxa de tensão τ/σ calculada a partir das medições no contorno da caixa foi um 10% maior da medida no interior da banda de cisalhamento.

- As taxas de tensão e deformação são coaxiais no estado crítico, quando o solo continua a ser cisalhado sob deformação volumétrica nula. As direções principais estão inclinadas $\pm 45^\circ$ com respeito ao plano de cisalhamento.
- Quando o pico de resistência está sendo atingido, acontece uma marcada rotação das partículas na banda de cisalhamento.
- Ensaio realizados em caixas com relação de lados 1:2 e 1:3 mostraram uma variação na porosidade semelhante na banda de cisalhamento, mais os valores de porosidade calculados a partir do volume da caixa mostraram marcadas diferenças. Isto demonstra a influência da relação de lados da caixa na resposta.

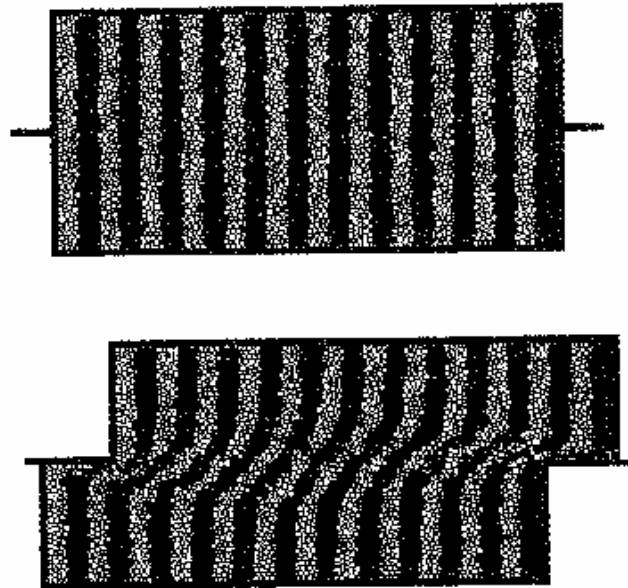


Figura 5.4: Simulação do ensaio de cisalhamento direto (Zhang & Thornton, 2007).

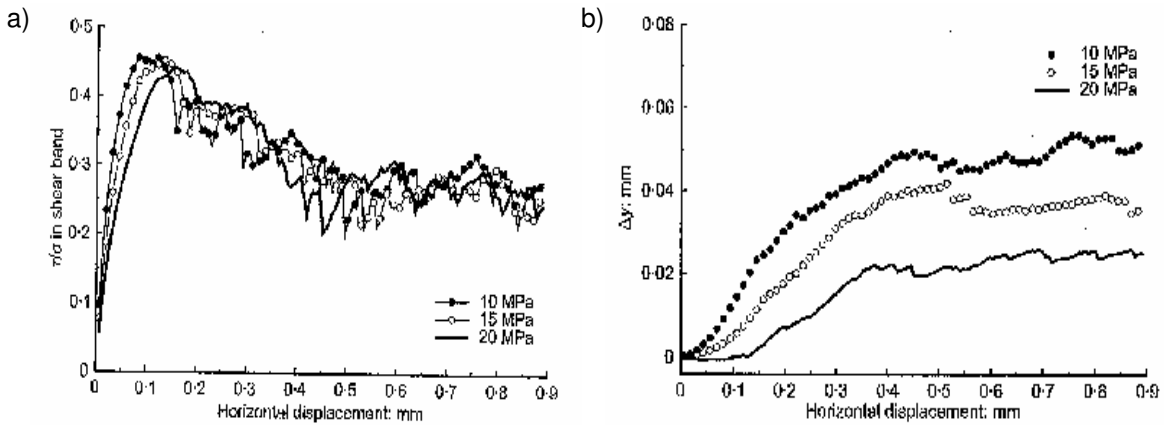


Figura 5.5: Resultados do ensaio: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal (Zhang & Thornton, 2007).

5.2. Calibração dos parâmetros do programa

O contato entre elementos é definido por dois sistemas dinâmicos básicos do tipo mola-amortecedor dispostos em paralelo, um atuando na direção normal e outro na direção tangencial, tal como mostrado na figura 5.6.

Os parâmetros a calibrar são os seguintes:

- Rigidez normal (k_n)
- Rigidez tangencial (k_s)
- Atrito entre elementos (ϕ)
- Amortecimento (C_n , C_s)

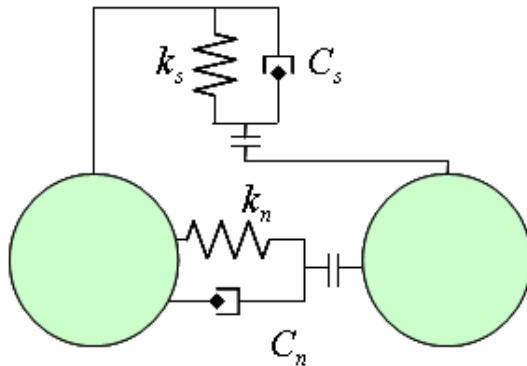


Figura 5.6: Parâmetros do sistema de contato entre elementos.

5.2.1. Rigidez normal (k_n)

Este parâmetro controla basicamente a relação entre o solapamento normal dos elementos e a força de repulsão correspondente. Neste caso interessa garantir a correta simulação do comportamento volumétrico, especificamente sua capacidade de suportar confinamento. Valores de k_n muito baixos podem levar a superposição excessiva de elementos, o que não é desejável, pois implicaria numa variação marcada do volume aparente do sistema, o que não é o comportamento esperado. Por outro lado, valores de k_n muito elevados contribuem para a instabilidade do sistema, especialmente sob confinamentos elevados, pela magnitude das forças de repulsão geradas nos contatos. Neste caso o sistema tem elevada mobilidade, acontecendo o efeito de “bolinha nervosa” que dificulta a convergência para a solução final.

Para a calibração da rigidez normal assumiu-se um critério para limitar a máxima superposição entre elementos. Adotou-se um solapamento máximo igual a 5% do raio do elemento, o que representa uma área de superposição igual a 1,33% da área do elemento (ver figura 5.7). As forças de contato máximas foram obtidas rodando ensaios sob elevadas tensões de confinamento (até 2000kPa), sendo em todos os casos menores do que 250grf. Com este valor limite, e utilizando para o cálculo o menor elemento do modelo (assumido em raio = 0,05mm), a rigidez necessária para garantir o critério resulta em $kn = 100.000\text{grf/mm}$. Este valor de rigidez vem sendo utilizado amplamente nas simulações numéricas da presente pesquisa com resultados satisfatórios, e está na ordem dos valores utilizados por outros autores.

Enquanto ao contato entre elemento discreto e parede a análise para calibração é semelhante. Em se tratando de outros materiais – contato entre solo e aço – poderia se pensar em um valor maior para o parâmetro kn , mas não há motivo conceitual para assumir valores diferentes para os dois tipos de contato, desde que grãos e paredes são assumidos igualmente rígidos. Por outro lado, testes feitos neste sentido mostraram que não há influência na resposta do solo produto da variação dos valores relativos de ambas rigidezes. Desta forma, adotou-se para kn o mesmo valor, tanto para contatos entre discos como para contatos entre disco e parede.

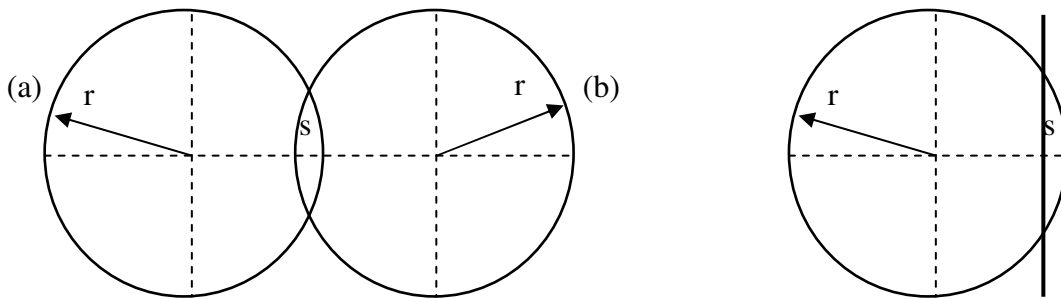


Figura 5.7: Superposição (s) de contato entre elementos discretos: a) Entre discos; b) Entre disco e parede.

5.2.2. Rigidez tangencial (ks)

Este parâmetro controla a relação entre o deslocamento tangencial relativo dos elementos e a força de cisalhante correspondente. O objetivo é garantir a correta simulação do mecanismo de atrito, permitindo que se desenvolvam as forças cisalhantes nos contatos entre elementos (o que pode não acontecer com um valor de ks muito baixo), mas evitando o enrijecimento virtual do modelo que pode acontecer para valores de ks muito elevados. O valor deste parâmetro deve garantir o completo desenvolvimento do mecanismo de atrito no modelo cisalhado.

O mecanismo de atrito que se desenvolve na massa de solo em resposta às forças cisalhantes é complexo e envolve diferentes fenômenos. Rowe (1962) estudou as características da resistência drenada de areias sob diferentes densidades iniciais e tensões de confinamentos. Os resultados sugeriram a existência de três componentes de resistência atuando de forma superposta para dar uma resposta mecânica global (ver figura 5.8), a saber:

- a) o atrito entre grãos de solo;
- b) o rearranjo e reorientação dos grãos de solo;
- c) a dilatação da massa de solo;

Interessa aqui assegurar o desenvolvimento do primeiro dos três fenômenos, o atrito por deslocamento relativo dos grãos. Este mecanismo limita-se pelo parâmetro de atrito ϕ_μ , que define a força cisalhante máxima τ_{\max} que poderá se desenvolver entre elementos sob uma tensão de contato σ_n , segundo

$$\tau_{\max} = \sigma_n \tan \phi_\mu \quad (5.1)$$

O valor deste parâmetro fica definido pelo material que constituem os elementos. No caso de contato entre elementos discretos, adota-se o ângulo de atrito para grãos de solo, cujo valor estima-se $\phi_\mu = 26^\circ$ (Rowe, 1962).

Tomando o valor de referência de 250grf para a máxima força de contato entre elementos, a força cisalhante correspondente, segundo a eq. 5.1 é de 122grf aproximadamente. Para o menor elemento do modelo (raio = 0,05mm), e estabelecendo que a força máxima deve atingir-se para um deslocamento relativo do

25% do raio, a rigidez mínima necessária é $k_s = 9.760 \text{grf/mm}$. Para a calibração do modelo assumiu-se $k_s = 10.000 \text{grf/mm}$, dando uma relação $k_n/k_s = 10$, que se corresponde com os valores utilizados em outras pesquisas.

No caso de contato entre elemento discreto e parede simula-se o contato entre os grãos de solo e as faces de aço da caixa. Isto não afeta conceitualmente a calibração da rigidez tangencial k_s , que pode ser assumida com o mesmo valor que a rigidez tangencial entre discos. Já o ângulo de atrito depende do material e no caso do aço apresenta um valor menor. O mesmo estimou-se na metade, $\phi_{\mu v} = 13^\circ$.

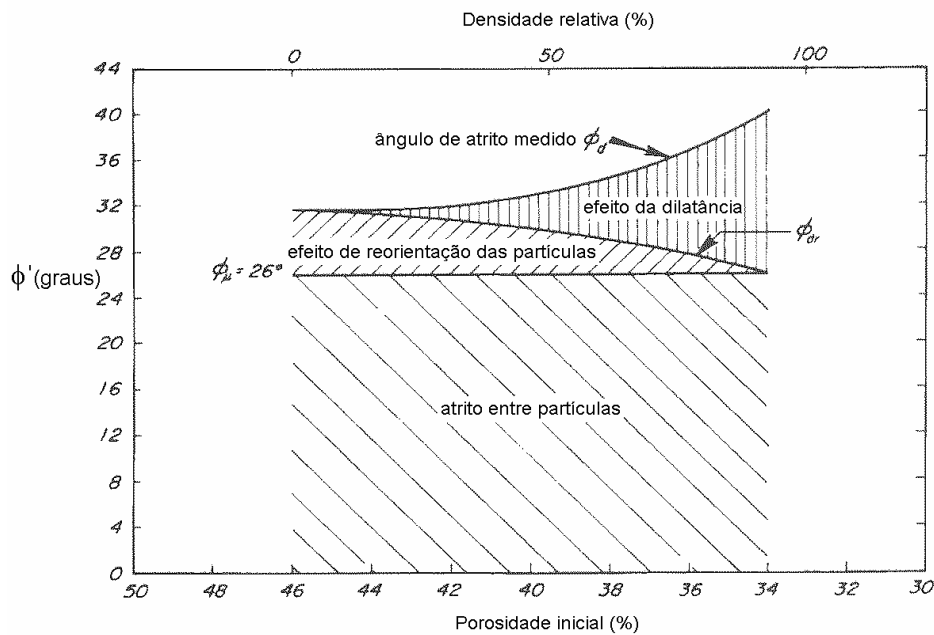


Figura 5.8: Componentes da resistência de areias (Rowe, 1962).

5.2.3. Amortecimento (Cn, Cs)

O amortecimento local utilizado define-se pelo parâmetro de proporcionalidade C (menor do que 1) que estabelece uma força amortecedora proporcional à velocidade de cada elemento. A fim de evitar uma distorção no movimento natural dos elementos os amortecimentos normal e tangencial são assumidos como um único parâmetro C . Um valor muito baixo deste parâmetro torna o problema instável, com tendência ao caos pela excessiva vibração dos elementos pouco amortecidos (efeito de “bolinha nervosa”). Já um valor muito próximo da unidade torna a convergência para a solução final muito demorada pela escassa mobilidade dos elementos.

O valor de C assume-se geralmente entre 0.75 e 0.90, e neste caso foi fixado em 0,80 conforme aconselhado em Figueiredo (1991). A análise de sensibilidade feita em torno deste parâmetro no intervalo antes citado mostrou pouca variação na resposta do ensaio, e em todos os casos o aspecto da curva solução foi semelhante.

5.2.4.

Massa das paredes (m_w)

As paredes, quando apresentam cargas distribuídas aplicadas a elas, têm liberdade de deslocamento e entram, portanto, no ciclo de cálculo do movimento do sistema. Isto requer da definição de um valor de massa para as mesmas, que venha a possibilitar o cálculo das acelerações a partir das forças desequilibradas resultantes. Cabe destacar que valores de massa muito baixos produzirão a excessiva mobilidade das paredes frente aos desequilíbrios de carga, dada a pouca inércia, o que não é desejável. Por outro lado, valores de massa muito altos produzirão um comportamento quase estático da parede, dada sua elevada inércia, o que pode não se corresponder com o comportamento real que se tenta simular.

No ensaio de referencia as paredes têm três tipos de restrições diferentes:

- a) As laterais da caixa superior permanecem fixas;
- b) A caixa inferior se desloca com velocidade constante;
- c) A tampa da caixa recebe um carregamento vertical e pode se deslocar.

Neste caso, apenas a tampa entra no ciclo de cálculo e sofre acelerações, pelo que sua massa deve ser definida. A mesma foi estimada a partir da densidade do aço e o volume aproximado da tampa real da caixa de cisalhamento.

A análise de sensibilidade mostrou que com uma tampa leve (valores menores de massa) a resposta do ensaio tornou-se mais errática, crescendo a tendência dilatante e caindo a resistência ao cisalhamento. Já com uma tampa pesada (valores maiores de massa) a curva de deslocamento vertical tornou-se aplanada, inibindo a dilatação, com o que aumentou sensivelmente a resistência ao cisalhamento. Isto vem a demonstrar que a tampa da caixa é um condicionante sensível do ensaio, que deve ser devidamente calibrado.

5.3. Calibração do ensaio de referência

Tem alguns aspectos da simulação discreta do ensaio de cisalhamento direto que precisam ser estudados com maior detalhe a fim de se garantir uma adequada representação e a validade da resposta obtida. Estes aspectos têm a ver com a representação do solo, a influência da separação das partes da caixa, e a parte da caixa que desloca. A seguir são discutidos estes assuntos e definem-se as hipóteses adotadas para a calibração do ensaio.

5.3.1. Influência da representação do solo

A representação das partículas de solo por elementos discretos respeitando o tamanho real destes torna-se inviável quando se simulam volumes não infinitesimais. Apela-se, portanto, à técnica do *upscaling* para deslocar a curva granulométrica no sentido dos tamanhos mais grossos, e representar assim o solo por elementos de maior tamanho. Isto diminui consideravelmente o número de elementos necessário para a modelagem e torna viável o cálculo. Adicionalmente, e feita uma discretização da curva adotando alguns tamanhos de grão representativos, ou inclusive um único tamanho médio (ver figura 5.9).

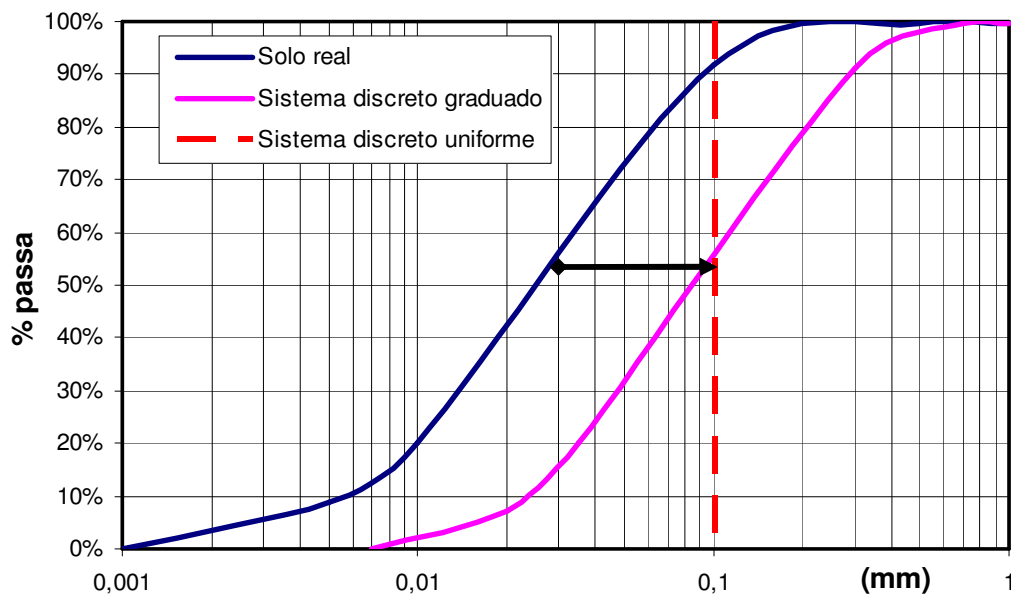


Figura 5.9: Upscaling. Deslocamento e discretização da curva granulométrica.

Esta prática, porém, suscita a necessidade de avaliar quais as características adequadas do *upscaling*, de modo a garantir uma resposta não invalidada por efeitos de escala. Como foi apontado, há dois aspectos em esta técnica que precisam ser analisados (ver figura 5.9):

- a) a relação de tamanhos entre a caixa e os grãos de solo, ou seja, a magnitude do deslocamento na curva granulométrica;
- b) a gradação do próprio solo, ou seja, a forma da curva granulométrica.

Estes dois aspectos do *upscaling* estão relacionados entre se, pelo que devem ser analisados em conjunto. Para isto foram geradas várias amostras de solo uniforme e graduado (três tamanhos diferentes) que foram logo cisalhadas nas mesmas condições de carregamento e velocidade.

A figura 5.10 mostra o resultado comparativo de uma amostra uniforme e outra graduada, ensaiadas sob a mesma tensão vertical em uma caixa de 75mm de lado e 10mm de altura desde a base até o plano de cisalhamento. O solo graduado foi composto por grãos de diâmetro 0.20mm, 0.30mm e 0.34mm em igual proporção, enquanto que o solo uniforme foi constituído por grãos de diâmetro 0.30mm. Este solo corresponde a uma areia média mal graduada em ambos os casos. Também pode representar uma areia fina com um *upscaling* da ordem de 5, ou até um solo argilo-siltoso com um *upscaling* da ordem de 50.

Pode se apreciar que no caso do solo uniforme há um comportamento oscilante que não se corresponde com o comportamento do solo real, o que sim acontece no caso graduado. Isto se deve à tendência da amostra uniforme a se arranjar em uma configuração regular, densa e estável (ver figura 5.11a,b), formando virtualmente blocos rígidos por cima e por baixo do plano de falha imposto pelo ensaio, deslocando um sobre o outro na medida que acontece o cisalhamento. Já que as posições relativas nos dois blocos virtuais são mantidas inalteradas, a força cisalhante e o deslocamento vertical acontecem na forma de pulsos segundo os blocos se desencaixam e logo voltam a se encaixarem, como mostra a figura 5.11c.

A amostra uniforme é claramente inadequada para a representação do solo, pelo que deve se optar pela variedade de tamanhos, o que garante a não formação dos blocos rígidos virtuais.

Na amostra graduada, por outro lado, formam-se arranjos densos, mas caóticos, e por isso susceptíveis de serem mudados para novas configurações quando cisalhados. Assim consegue-se reproduzir satisfatoriamente o comportamento observado de solos.

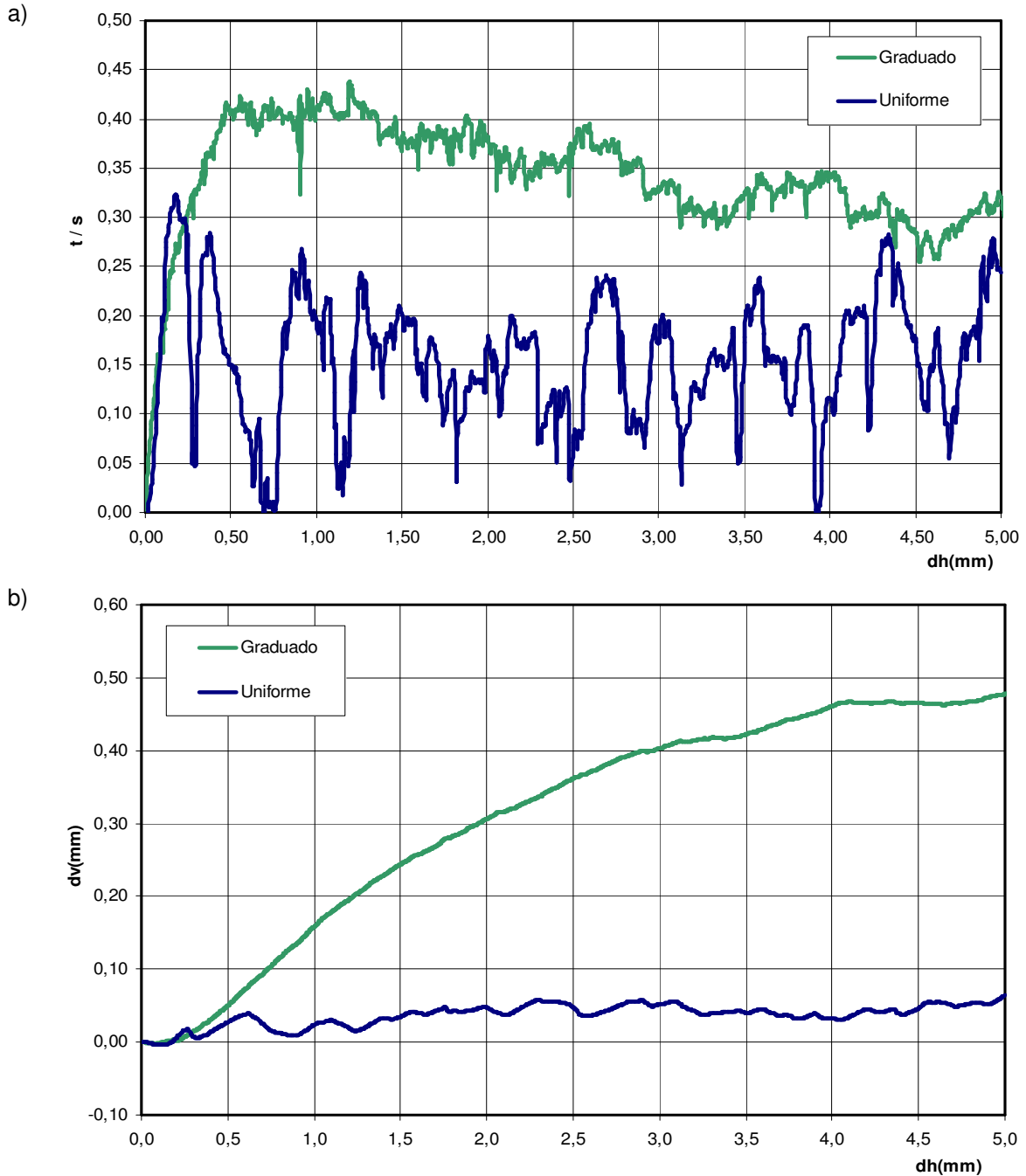


Figura 5.10: Ensaio de cisalhamento direto em amostras de solo graduado e uniforme: a) Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Enquanto à relação de tamanhos entre grão e caixa (altura das paredes da caixa inferior / diâmetro dos grãos), nos exemplos apresentados foram de 33,3 na amostra uniforme e 30 na graduada. No caso graduado, resultados satisfatórios foram obtidos a partir de relações na faixa dos 20.

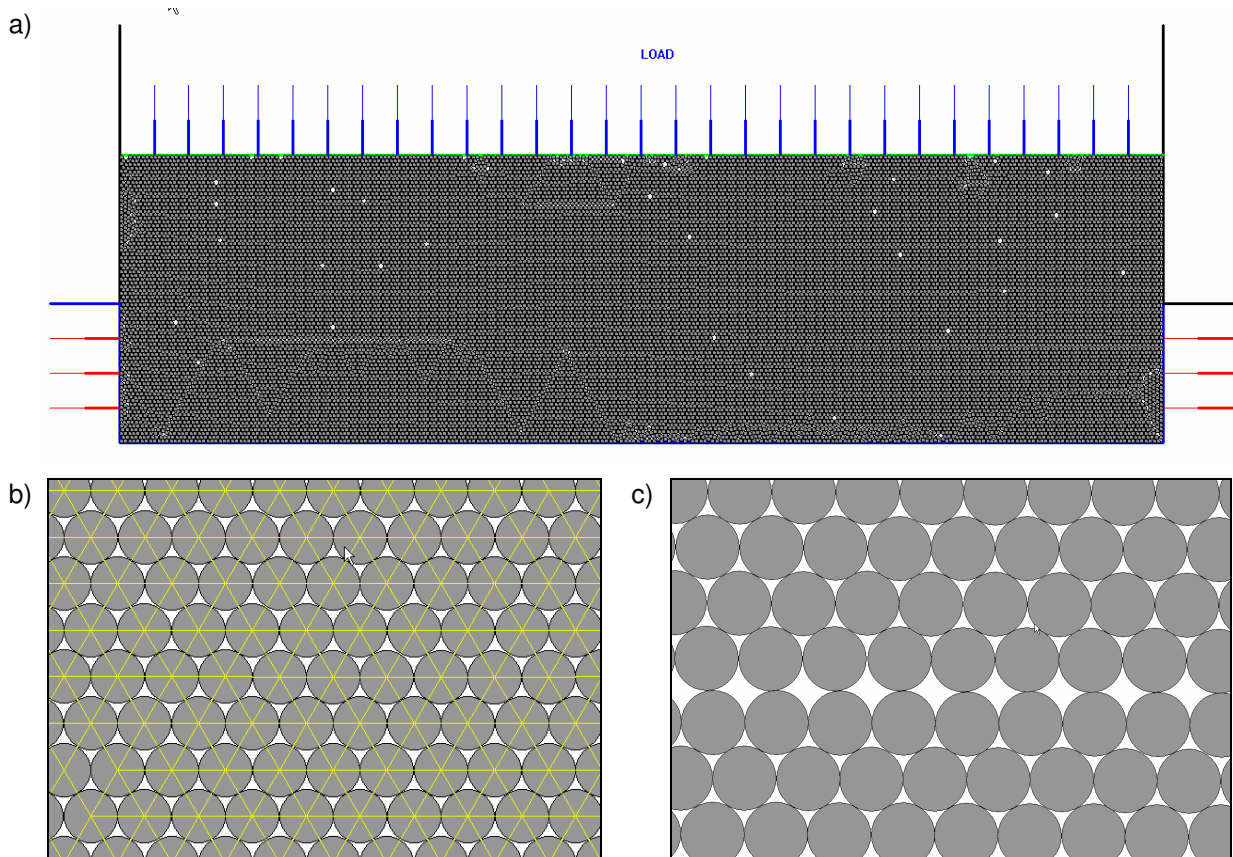


Figura 5.11: Ensaio de cisalhamento direto em amostra uniforme: a) Arranjo inicial; b) Detalhe do arranjo denso e estável; c) Detalhe do plano de cisalhamento.

Conclusões. A técnica de upscaling permite a simulação de matrizes de solos em forma discreta para dimensões não infinitesimais, pelo deslocamento da curva granulométrica. No entanto, o seu uso requer de certas verificações que garantam sua representatividade. No caso do ensaio de cisalhamento direto, a modelagem mediante amostras discretas uniformes se mostrou inadequada por favorecer a formação de uma fábrica regular que reduziu o ensaio ao deslocamento relativo de blocos pseudo-rígidos. Na representação por amostras graduadas o resultado foi satisfatório, especialmente para relações de tamanho maiores do que 20, já que formaram-se arranjos caóticos que simularam adequadamente a resposta do solo.

5.3.2. Influência do índice de vazios da amostra

Um aspecto crucial para a simulação discreta de solos é o relacionado com a reprodução dos diversos estados do solo, no que diz respeito à sua densidade. Da capacidade de reprodução de amostras fofas e densas dependerá a amplitude da simulação comportamental. Isto constitui atualmente um tema em aberto para os pesquisadores.

A maneira tradicional de montagem de amostras discretas consiste na população de um dado espaço por um determinado número de elementos discretos introduzidos de forma aleatória ou seguindo uma dada configuração, ao que se segue um tempo indeterminado de rodagem do programa a fim de permitir:

- A ação das forças gravitacionais devido ao peso dos elementos;
- A ação das forças de contato, normal e tangencial, entre os elementos em função da superposição dos mesmos;
- A ação das forças de contato, normal e tangencial, dos elementos com as paredes;

Estes três campos de forças serão os encarregados de levar a amostra à sua configuração estável na medida que se equilibrem, minimizando a energia interna do sistema de partículas. Esta convergência para a posição final é, obviamente, de caráter dinâmico, o que redundará na tendência a gerar arranjos fechados, densos, assim como se emprega o método de adensamento dinâmico em areias para obter amostras densas.

Método da rigidez tangencial. Uma tentativa para a obtenção de amostras fofas consiste na manipulação dos campos de forças antes citados durante a etapa de adensamento da amostra. A manipulação das forças tangenciais proposta por Liu *et al* (2005) consiste em assumir um valor nulo da rigidez transversal dos elementos para gerar amostras mais densas, usando o valor real da rigidez para produzir amostras mais fofas. A anulação das forças tangenciais entre elementos favorece o deslocamento relativo destes, com o que aumenta a densidade do arranjo. Esta técnica mostrou certa utilidade e foi empregada na presente pesquisa, se bem as duas amostras geradas tem caráter denso, podendo-se falar em amostras *densa* e *muito densa*.

Método do elemento fictício. Este método é proposto na presente pesquisa e tem mostrado excelentes resultados na geração de amostras fofas. A idéia básica consiste em explorar, assim como o método anterior, o efeito das forças tangenciais que conferem rigidez ao arranjo, mais desta vez forçando a surgimento do efeito de arqueamento. Para isto são introduzidos, no momento da população do domínio, elementos fictícios adicionais uniformemente distribuídos entre os outros elementos. Em uma primeira etapa o programa é rodado e estes elementos se comportam como os reais, interagindo uns com outros até o equilíbrio dos campos de forças. Nesse momento os elementos fictícios são retirados do modelo, restando apenas os elementos verdadeiros em um arranjo desequilibrado por causa dos vazios deixados pelos elementos fictícios. Em seguida o programa é rodado novamente e na busca pelo equilíbrio o sistema tende a fechar os vazios deixados pelos elementos retirados, ao que se opõem as forças de arqueamento geradas nos grãos em volta destes. Assim, a amostra encontra o seu equilíbrio em um arranjo aberto, cuja densidade dependerá do número de elementos fictícios utilizados.

A figura 5.12 mostra a geração de uma amostra de solos pela técnica de elementos fictícios. Nesta pesquisa a técnica possibilitou a geração das amostras *fofa* e *muito fofa* a serem utilizadas na validação do modelo discreto para solos.

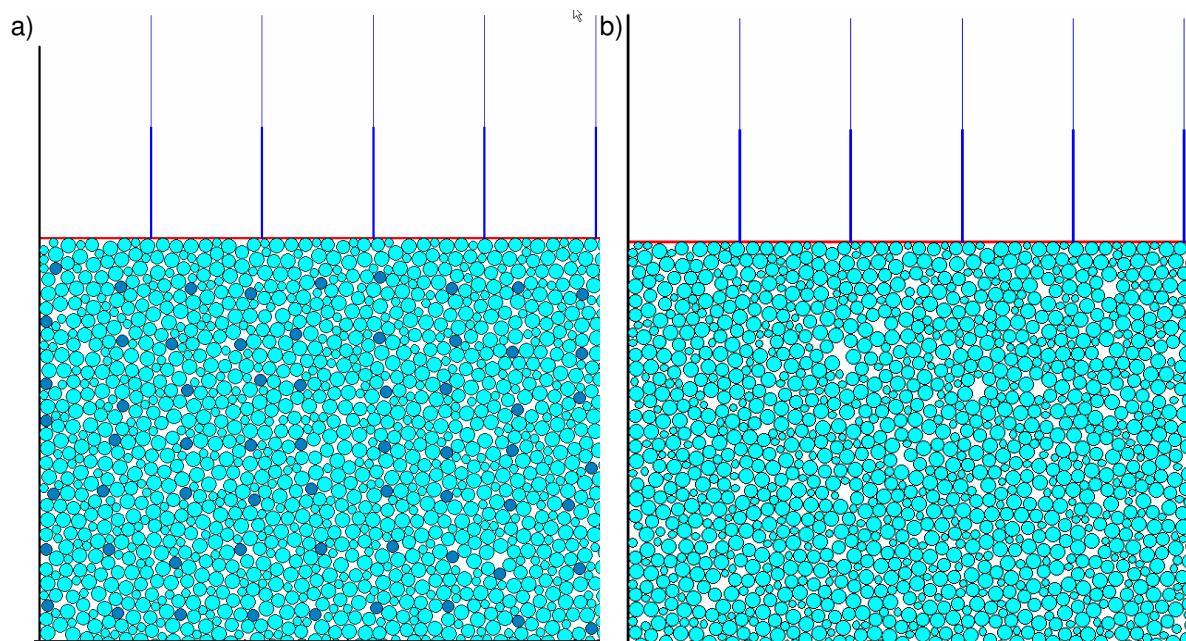


Figura 5.12: Técnica dos elementos fictícios: a) Amostra de solo inicial, com os elementos fictícios; b) Configuração final da amostra adensada após a retirada dos elementos fictícios.

5.3.3. Influência da separação da caixa

Um aspecto que também influi na resposta do ensaio de cisalhamento direto é a separação entre as duas partes da caixa. O fator em questão neste caso é a possível perda de material durante o ensaio através da abertura entre as partes da caixa, e como isto afeta o comportamento volumétrico e a resistência do solo.

Para analisar este fenômeno foram realizados dois ensaios de cisalhamento direto em uma amostra de solo com tamanhos de grão de 0,20, 0,30 e 0,34mm de diâmetro, com as seguintes disposições da caixa:

- a) caixa perfeitamente fechada;
- b) caixa aberta, com uma separação igual a 0,5mm (figura 5.13);

Os resultados obtidos desta análise estão apresentados na figura 5.14. As curvas de resposta apontam um efeito diferenciado no comportamento volumétrico e na resistência do solo, relacionados por sua vez com a separação da caixa e com a perda de material ocorrida durante o ensaio.

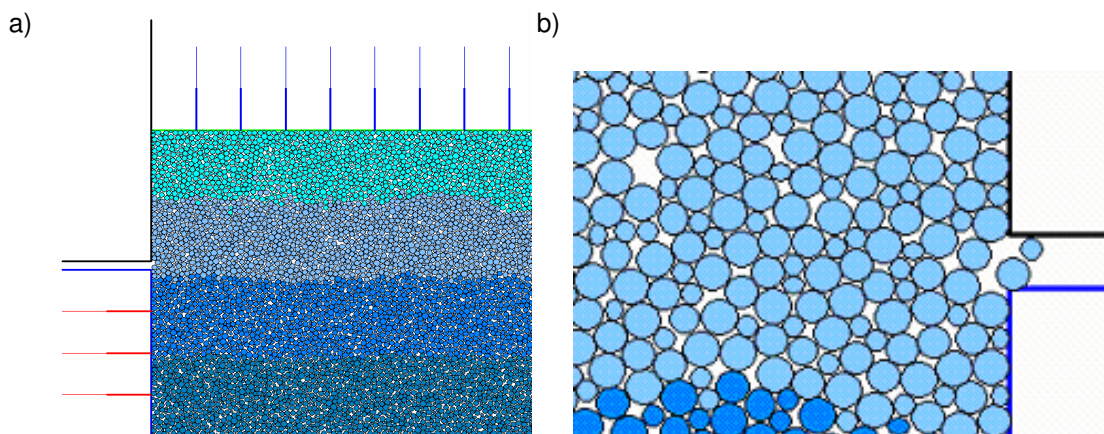


Figura 5.13: a) Ensaio de cisalhamento direto com as caixas inferior e superior separadas; b) Detalhe da disposição do solo na zona da abertura das caixas.

Comportamento volumétrico. Observa-se uma expansão do solo menor no ensaio com caixas separadas, o que se pode explicar pelo volume adicional que o recinto interior da caixa ganha durante o ensaio. Este espaço adicional, se bem pequeno, possibilita uma melhor redistribuição das partículas sob cisalhamento, o que se reflete na menor expansão da amostra. Adicionalmente, a perda de material também contribui para a diminuição da expansão do solo (ver figura 5.15).

Resistência. Observa-se uma queda na resistência no ensaio com caixas separadas, que pode explicar-se por uma queda nas forças de confinamento das partículas nas bordas da caixa, produzido pela fuga de material e o volume adicional, o que redonda em um menor atrito mecânico nessas regiões.

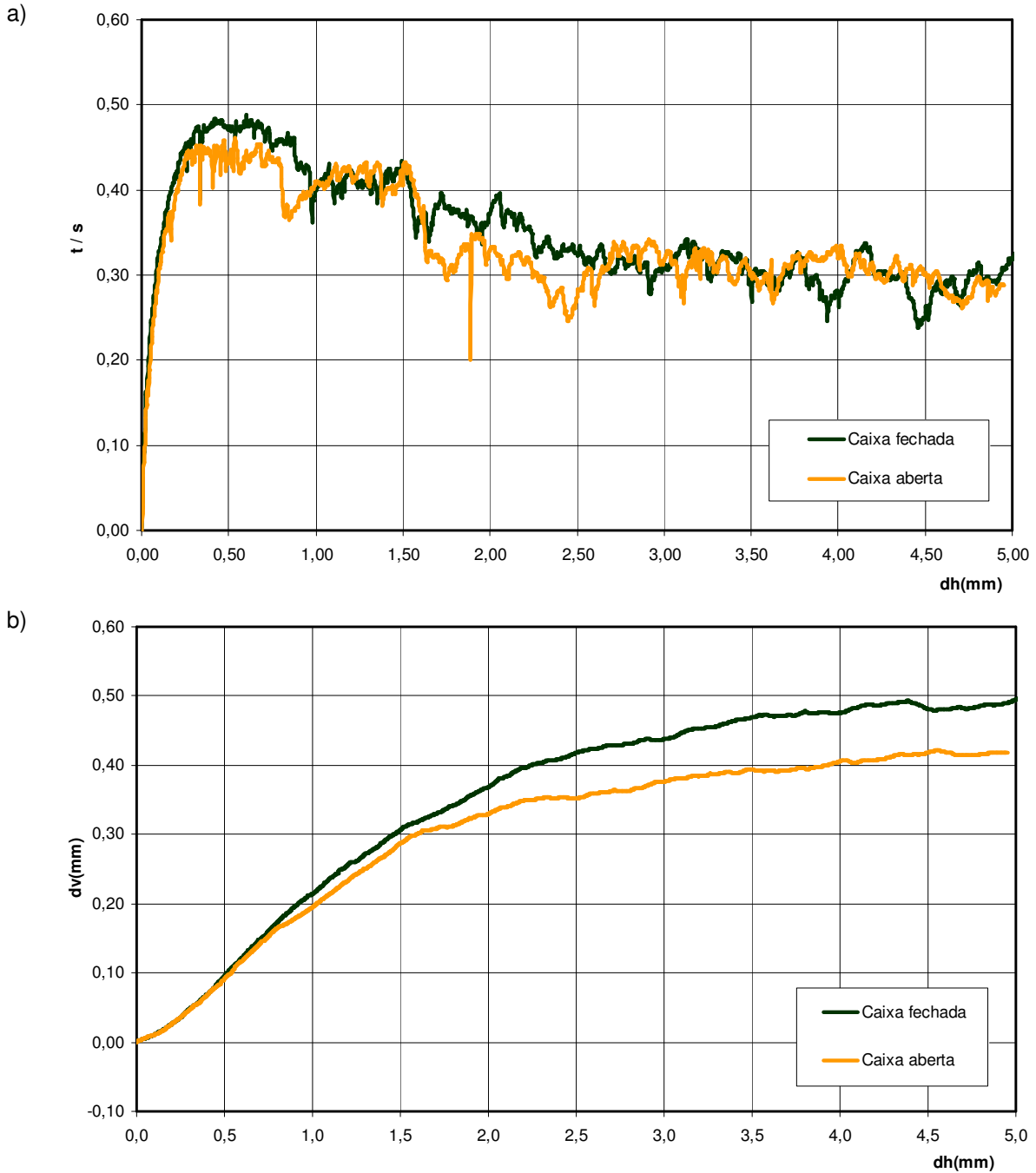


Figura 5.14: Ensaio de cisalhamento direto para caixa fechada e aberta: a) Curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

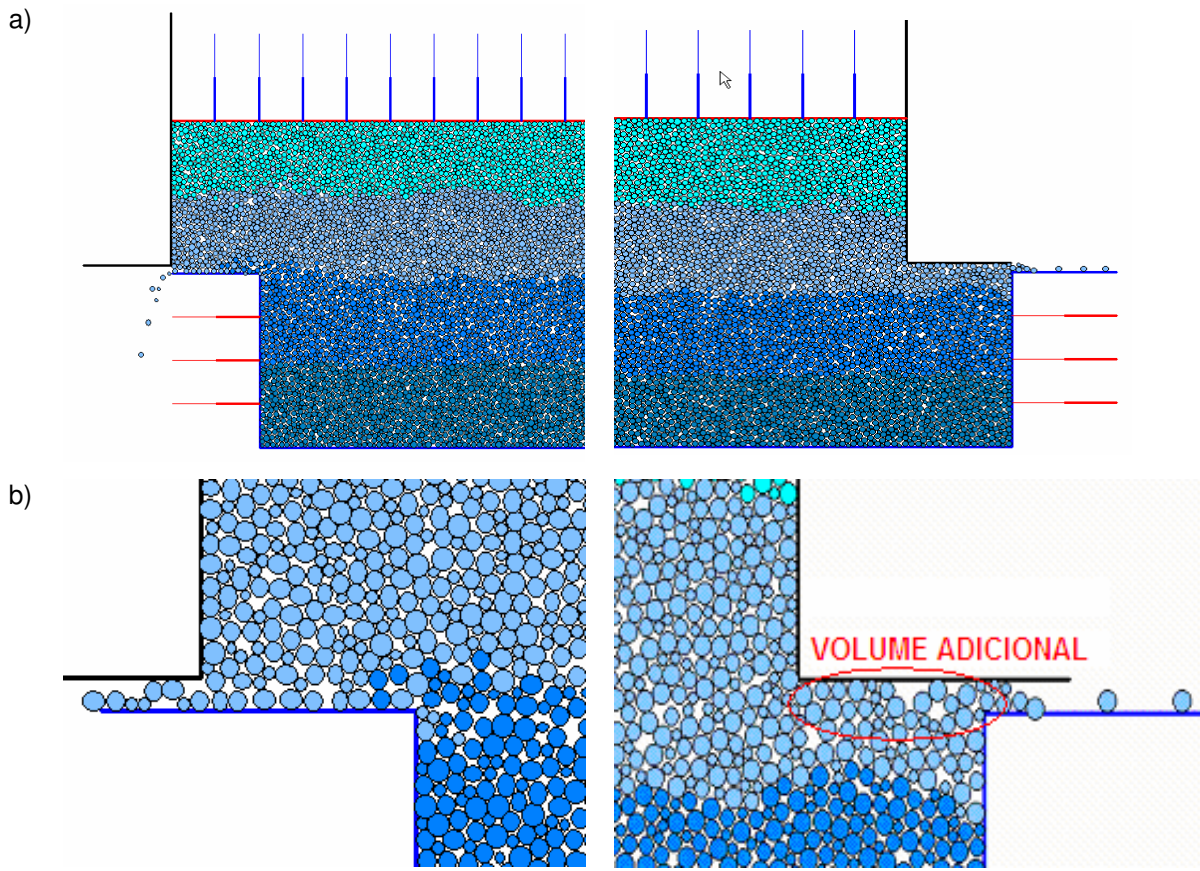


Figura 5.15: a) Fuga de material pela separação da caixa durante o cisalhamento da amostra de solo; b) Detalhe da fuga de material e o volume adicional da caixa.

Conclusões. A análise micro-mecânica mostrou que a separação da caixa de cisalhamento se reflete em uma queda na resistência e na tendência para a contração do solo, pelos efeitos combinados da fuga de material através da abertura entre as partes da caixa, e do volume adicional incorporado ao recinto interior durante o ensaio. A fuga de material pela abertura é um fenômeno sobre o qual não se tem controle e pouco se sabe, pelo que se torna um efeito indesejado na simulação discreta. Desta forma, opta-se pela caixa fechada nas simulações a serem feitas nesta pesquisa.

5.3.4. Influência da parte da caixa que desloca

O ensaio de cisalhamento direto, que consiste no deslocamento relativo das partes superior e inferior da caixa bipartida, pode ser executado de duas maneiras, a saber:

- a) Deslocando a parte superior da caixa enquanto a parte inferior da mesma permanece fixa (figura 5.16);
- b) Deslocando a parte inferior da caixa enquanto a parte superior da mesma permanece fixa (figura 5.17);

No ensaio executado segundo a metodologia (a) observou-se em alguns casos a formação de um vácuo entre o solo e a tampa da caixa no canto direito, correspondente ao frente de avanço da caixa. Isto acontece porque na parte superior da caixa se desenvolvem todos os deslocamentos, o horizontal das paredes (pela velocidade constante imposta) e o vertical da tampa (movimento livre sob cargas). Desta forma, forma-se no canto esquerdo uma zona altamente comprimida onde o solo empurra a tampa para cima, enquanto no canto direito as tensões são muito menores. Devido ao deslocamento vertical uniforme da tampa, esta descola do solo no canto direito gerando assim o vácuo. No ensaio executado segundo a metodologia (b) não se observa este fenômeno, já que os deslocamentos horizontal e vertical acontecem um em cada parte da caixa.

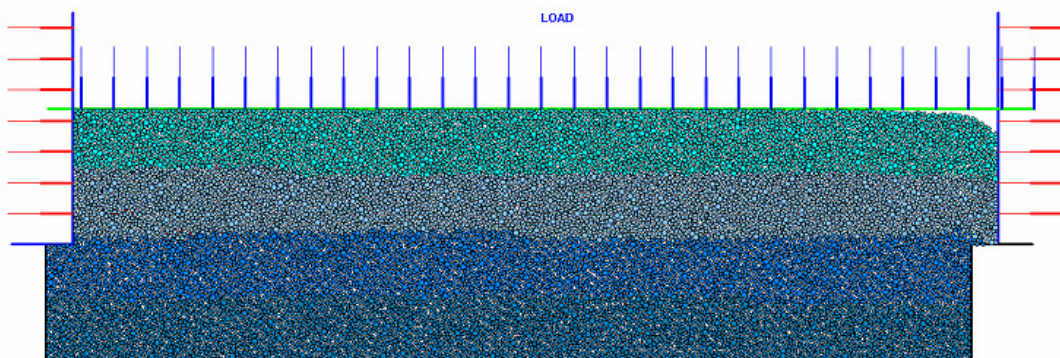


Figura 5.16: Ensaio de cisalhamento direto executado com a parte inferior da caixa fixa, e a superior deslocando.

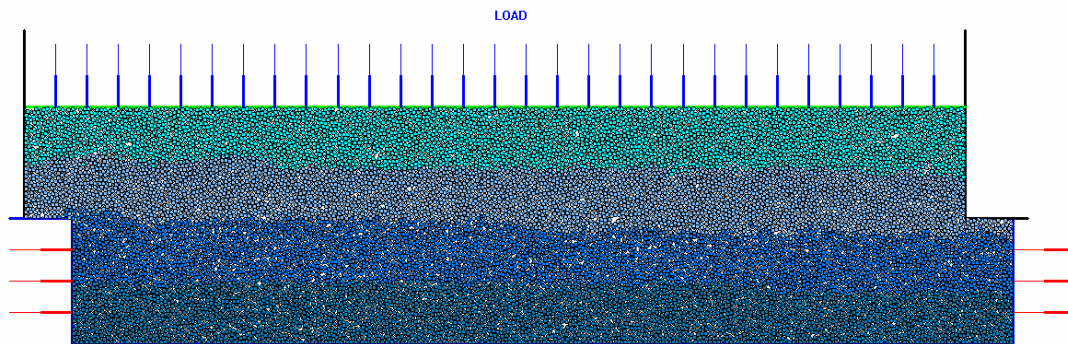


Figura 5.17: Ensaio de cisalhamento direto executado com a parte superior da caixa fixa, e a inferior deslocando.

A resposta do solo cisalhado em ambos os casos é apresentada nas figura 5.19. Pode-se observar que o pico de resistência se mostra maior no caso (a), o que se corresponde com uma maior dilatância. Ao atingirem o estado crítico (deformação volumétrica nula) ambos os ensaios mostraram a mesma resistência residual. Esta diferença comportamental baseia-se, como foi apontado, na concentração de esforços no canto superior esquerdo da caixa, o que redunda em uma tendência dilatante pronunciada. Isto pode se apreciar a partir da figura 5.18, onde se mostram as forças de atrito geradas nas paredes da caixa superior, onde o valor positivo delas indica sua oposição à dilatância do solo.

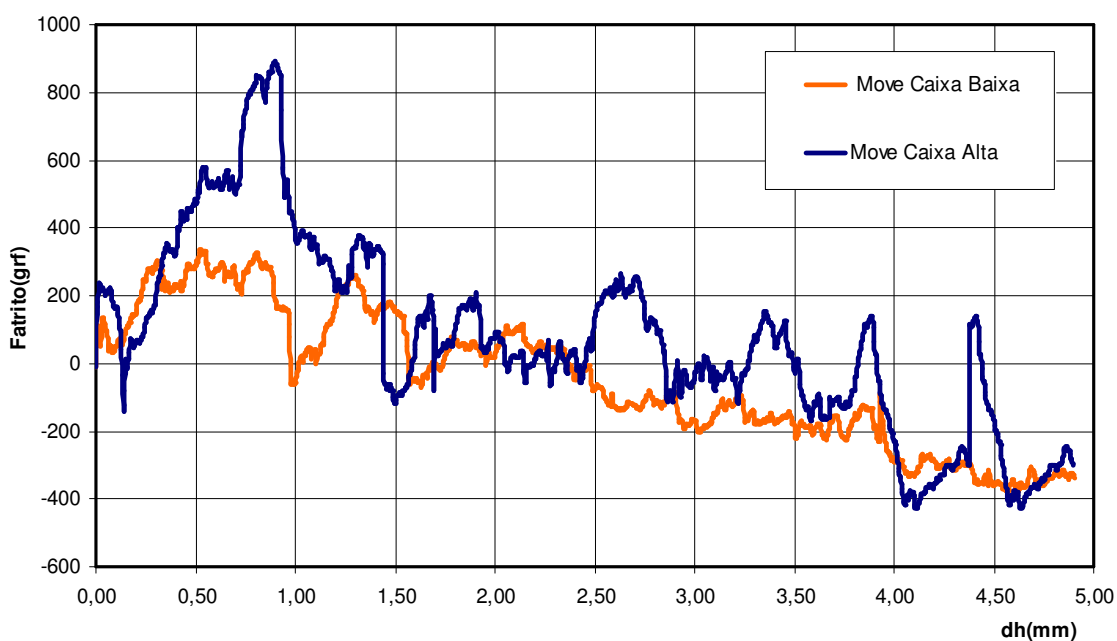


Figura 5.18: Forças de atrito nas paredes da caixa superior durante o ensaio.

Conclusões. Pode-se concluir desta análise que, a diferença da metodologia (b), a metodologia (a) introduz um efeito localizado indesejado ao criar uma região de alta concentração de esforços, o que redundava nos seguintes efeitos:

- Induz uma sobre-valorização da resistência ao cisalhamento do solo;
- Induz uma dilatância excessiva do solo;
- Cria uma zona onde o solo descola da tampa da caixa, no canto oposto à região de concentração de tensões.

Já a metodologia (b) assegura uma distribuição mais equilibrada das tensões dentro da caixa, o que evita que aconteçam esses efeitos indesejados, pelo que foi adotada para a validação do programa.

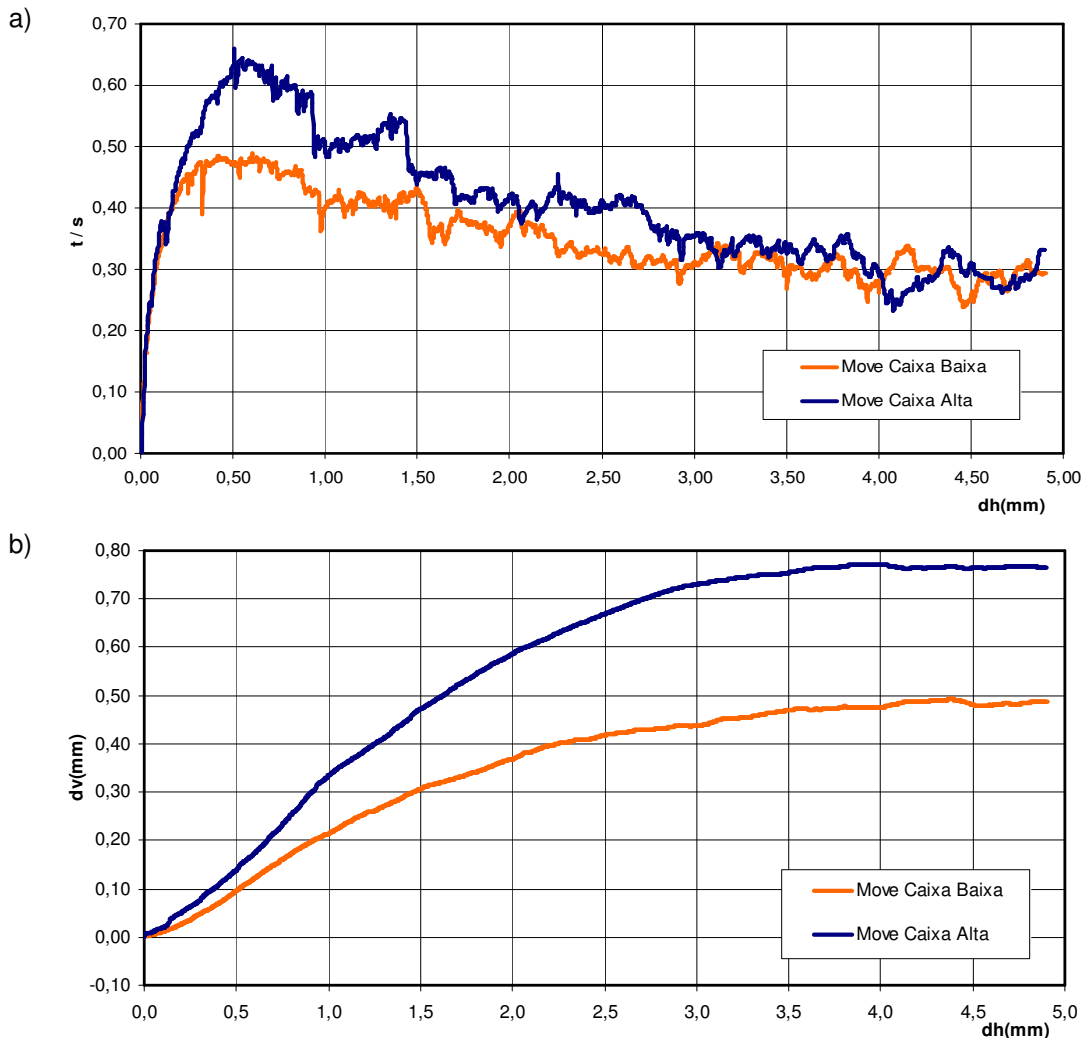


Figura 5.19: Resposta do ensaio de cisalhamento direto: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

5.4. Validação do programa

Uma vez concluído o processo de calibração, tanto dos parâmetros envolvidos na simulação pelo método dos elementos discretos, quanto a assunção de critérios de representação para a modelagem do ensaio de cisalhamento direto, resta a tarefa de validação da ferramenta desenvolvida. Isto implica em testar satisfatoriamente, a partir da calibração feita, sua capacidade em reproduzir o comportamento real observado para diferentes condições de contorno e trajetórias, distintas das condições e trajetórias envolvidas da calibração.

No que se segue são apresentados os resultados dos ensaios simulados para a validação, e na seqüência uma crítica dos mesmos é feita no intuito de obter conclusões sobre a capacidade de simulação do programa.

5.4.1. Resultados dos ensaios de validação

Para a validação do programa foram montadas quatro amostras de solo de diferente índice de vazios, a partir de uma totalidade de 18.225 elementos discretos tipo disco, consistentes em:

6075 elementos de raio $r = 0.10\text{mm}$;

6075 elementos de raio $r = 0.15\text{mm}$;

6075 elementos de raio $r = 0.17\text{mm}$;

Foram assumidos cinco níveis de tensão vertical para os ensaios, a saber, 100, 300, 600, 1000 e 1500kPa. A tabela 5.1 apresenta os valores de índice de vazios inicial das amostras de solo para as diferentes tensões verticais aplicadas.

Tabela 5.1. Índice de vazios inicial das amostras de solo usadas na validação.

Índice de vazios (e)	100kPa	300kPa	600kPa	1000kPa	1500kPa
Muito fofo	0,288	0,288	0,286	0,284	0,282
Fofo	0,264	0,263	0,262	0,260	0,258
Denso	0,203	0,202	0,201	0,200	0,197
Muito denso	0,192	0,191	0,191	0,188	0,185

Geração das amostras

As amostras de solos foram geradas visando a obtenção de quatro configurações diferentes que representassem os estados fofo e denso. A técnica utilizada em cada caso é resumida a seguir:

- *Amostra densa.* O solo denso foi simulado pelo adensamento natural dos elementos discretos com os parâmetros de contato conforme calculados na calibração.
- *Amostra muito densa.* A técnica foi semelhante à usada no solo denso, mais neste caso a rigidez transversal foi assumida muito baixa, a fim de facilitar os deslocamentos e giros relativos das partículas e maximizar o rearranjo destas.
- *Amostra fofo.* Neste caso foi utilizada a técnica dos elementos fictícios, com os parâmetros de contato conforme calculados na calibração, aproveitando a tendência ao arqueamento dos elementos discretos.
- *Amostra muito fofo.* Foi gerada como a amostra fofo, só que foram utilizados o dobro de elementos fictícios.

Resultados dos ensaios

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para as quatro amostras de solo, e para cinco tensões verticais diferentes, conforme mostrado na tabela 5.1. Adotou-se, por sua vez, caixa fechada (sem separação entre as partes da caixa) e que desloca a caixa inferior, enquanto a caixa superior permanece fixa.

Os resultados dos ensaios são apresentados pelas curvas de:

- Tensão cisalhante no plano de falha, normalizada pela tensão vertical no plano de falha, em função do deslocamento horizontal da caixa;
- Deslocamento vertical da tampa em função do deslocamento horizontal da caixa.

Nas figuras 5.20 a 5.24 são apresentadas as curvas correspondentes aos ensaios de cisalhamento direto para as tensões verticais de 100, 300, 600, 1000 e 1500kPa respectivamente.

Tensão vertical: 100kPa

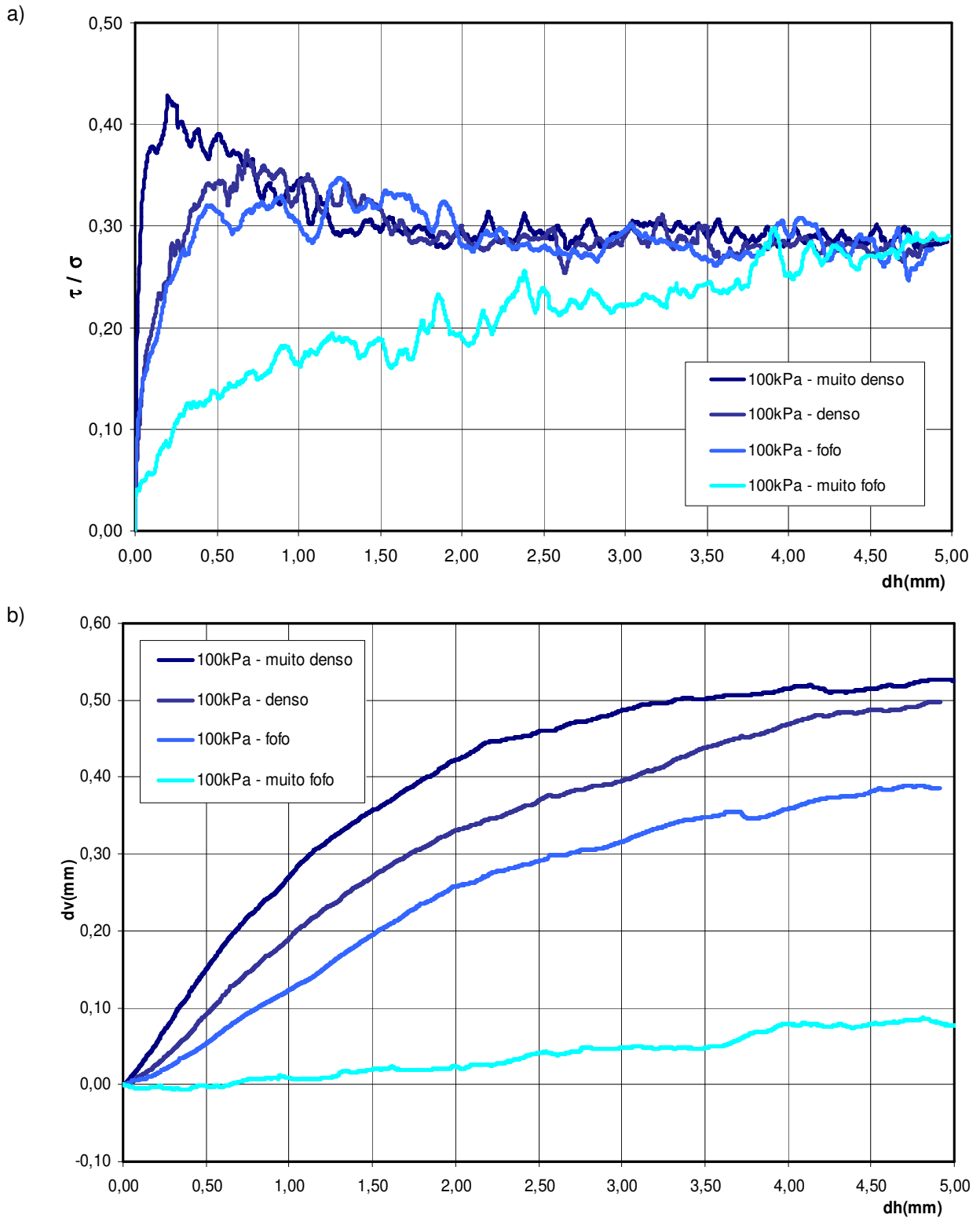


Figura 5.20: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 100kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Tensão vertical: 300kPa

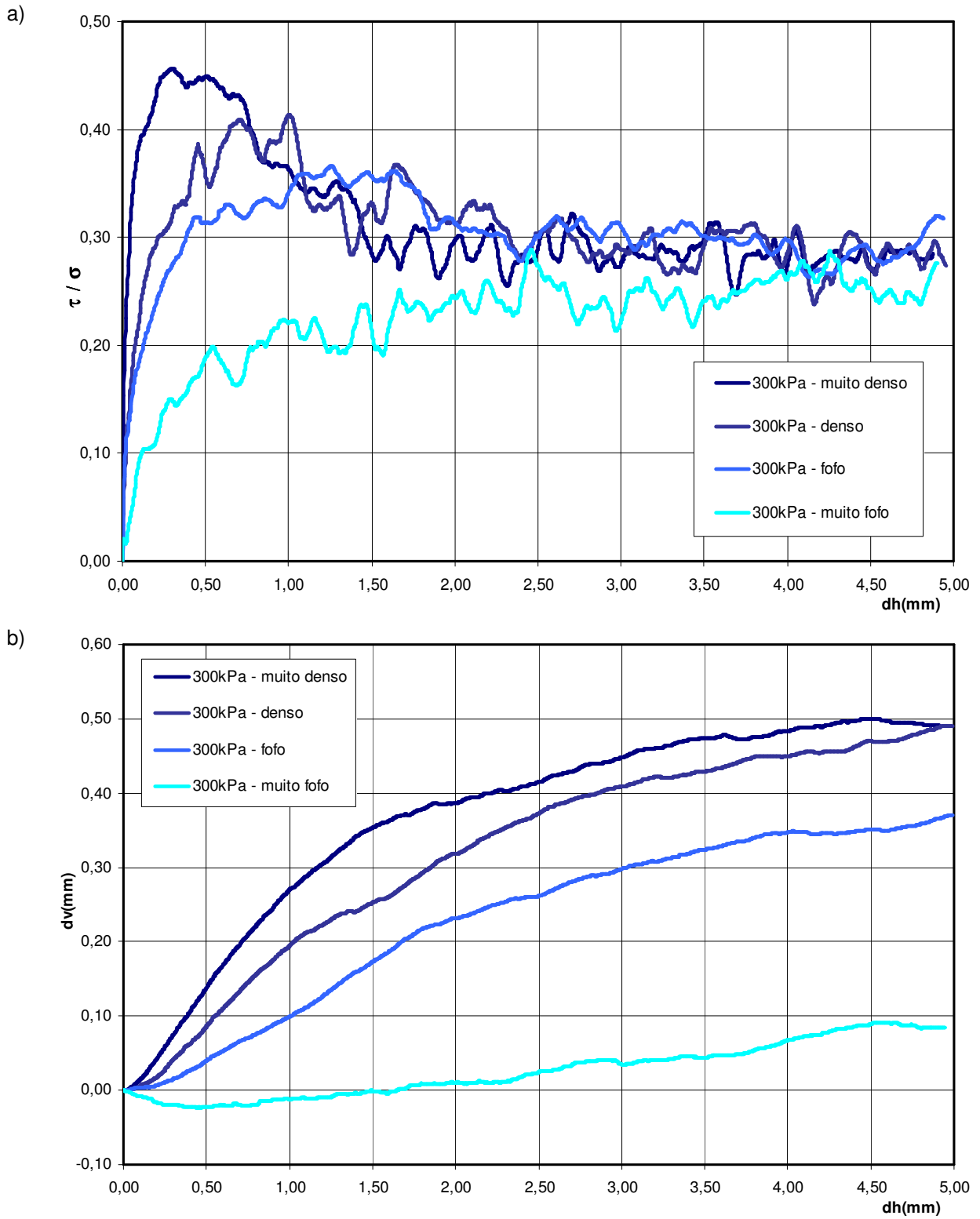


Figura 5.21: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 300kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Tensão vertical: 600kPa

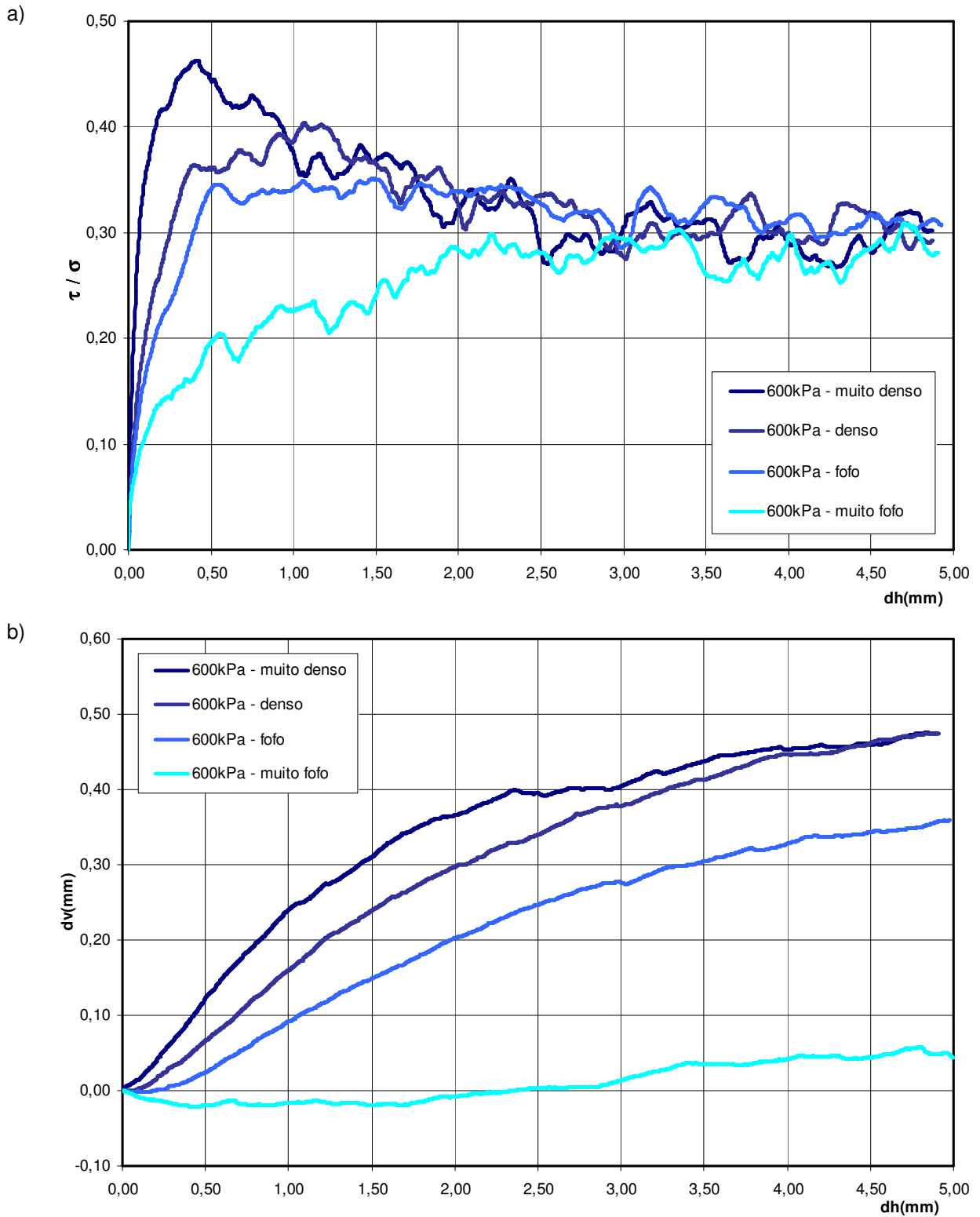


Figura 5.22: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 600kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Tensão vertical: 1000kPa

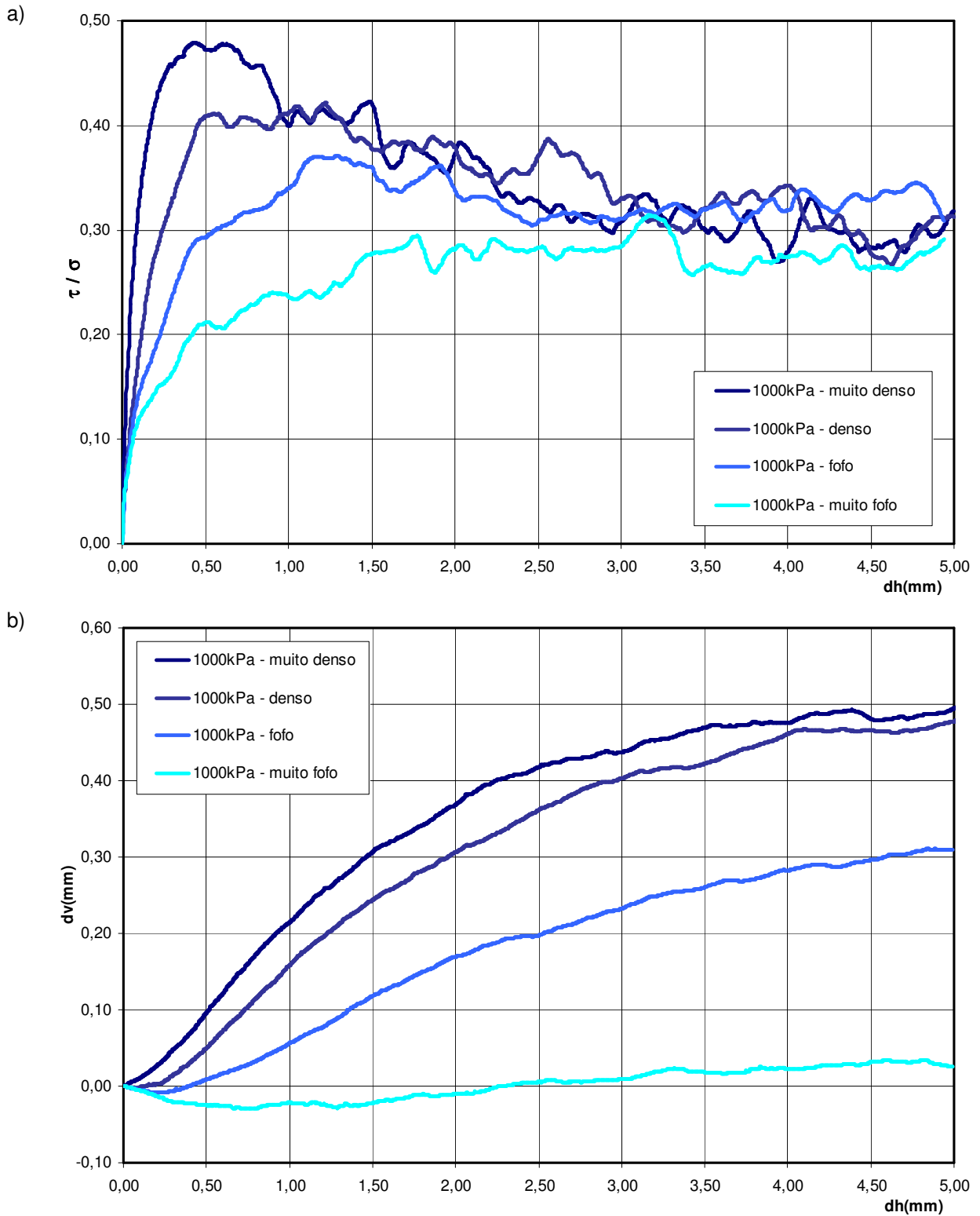


Figura 5.23: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 1000kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Tensão vertical: 1500kPa

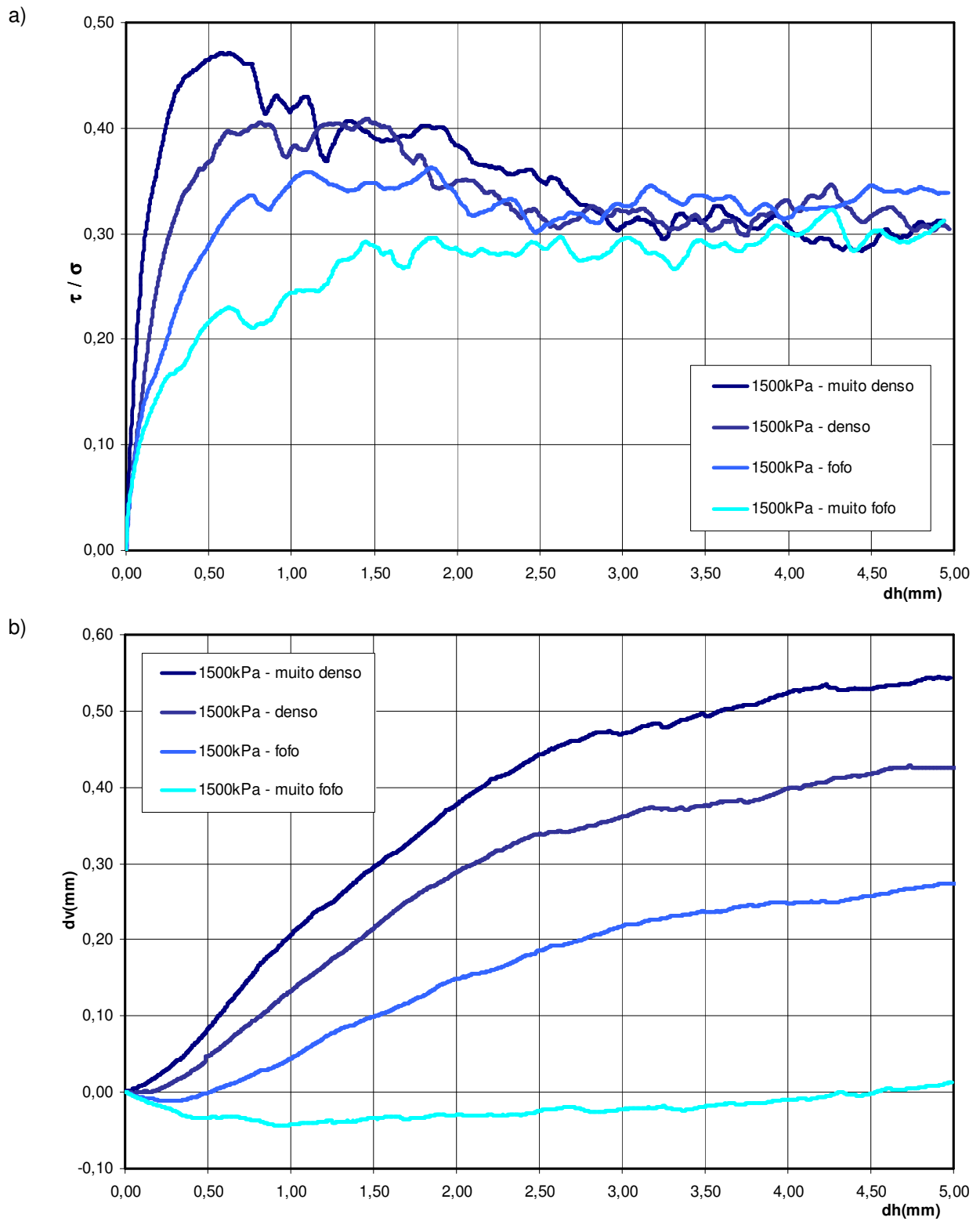


Figura 5.24: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical igual a 1500kPa: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

A envoltória de resistência de pico é apresentada na figura 5.25. O ângulo de atrito obtido em cada caso foi:

- $\phi = 26^{\circ}$ para o solo muito denso;
- $\phi = 23^{\circ}$ para o solo denso;
- $\phi = 21^{\circ}$ para o solo fofo;
- $\phi = 18^{\circ}$ para o solo muito fofo.

A resistência residual obtida foi praticamente a mesma para as quatro amostras, com um ângulo de atrito residual $\phi_{res} \approx 17^{\circ}$. A tabela 5.2 apresenta os valores inicial e final do índice de vazios e para todos os ensaios, entanto que a figura 5.26 mostra a evolução do índice de vazios para todos os ensaios. A figura 5.27 detalha a formação da área efetiva de cisalhamento na amostra cisalhada.

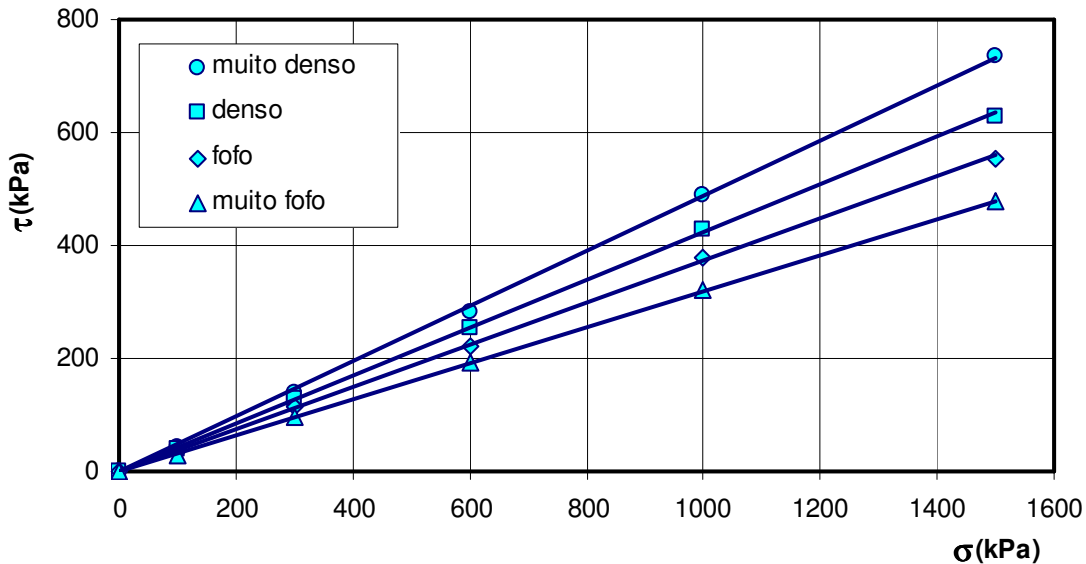
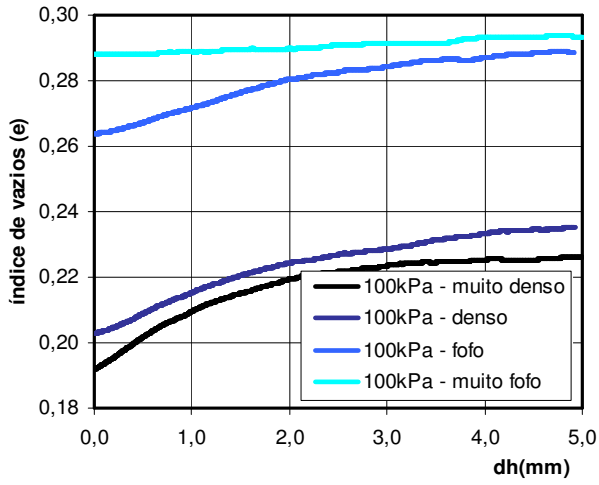


Figura 5.25: Envoltória de resistências de pico.

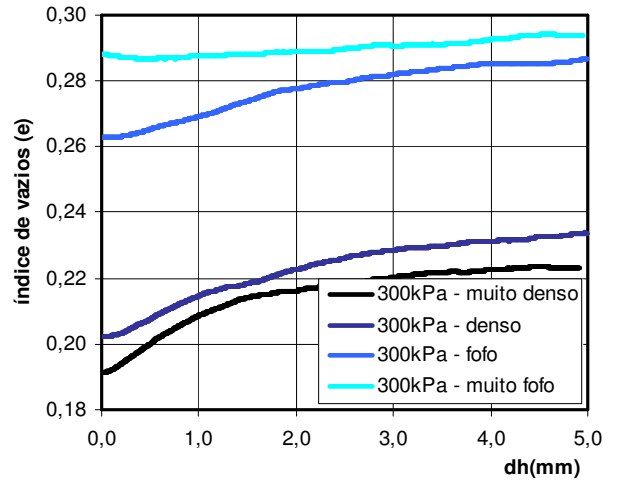
Tabela 5.2. Índice de vazios inicial e final das amostras ensaiadas.

Índice de vazios (e)	σ = 100kPa		σ = 300kPa		σ = 600kPa		σ = 1000kPa		σ = 1500kPa	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Muito fofo	0,288	0,293	0,288	0,294	0,286	0,289	0,284	0,286	0,282	0,283
Fofo	0,264	0,289	0,263	0,287	0,262	0,285	0,260	0,280	0,258	0,276
Denso	0,203	0,235	0,202	0,234	0,201	0,232	0,200	0,231	0,197	0,224
Muito denso	0,192	0,226	0,191	0,223	0,191	0,221	0,188	0,220	0,185	0,220

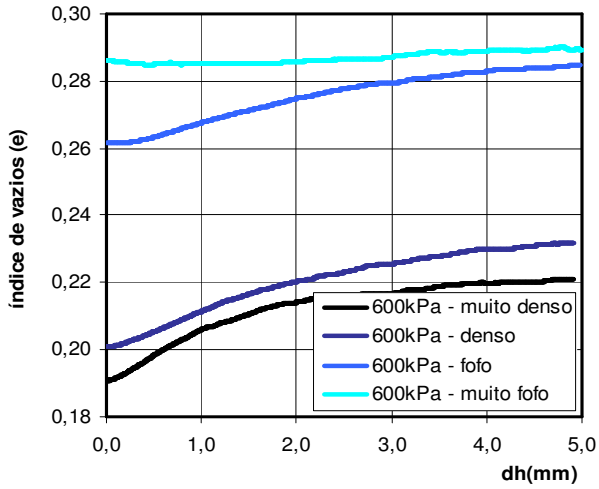
a) Tensão vertical = 100kPa



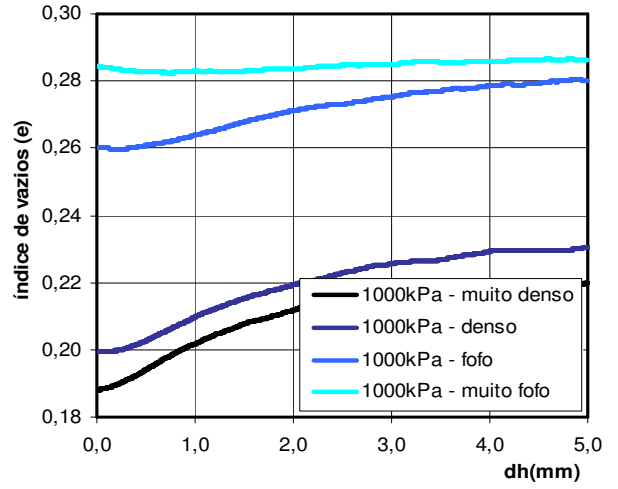
b) Tensão vertical = 300kPa



c) Tensão vertical = 600kPa



d) Tensão vertical = 1000kPa



e) Tensão vertical = 1500kPa

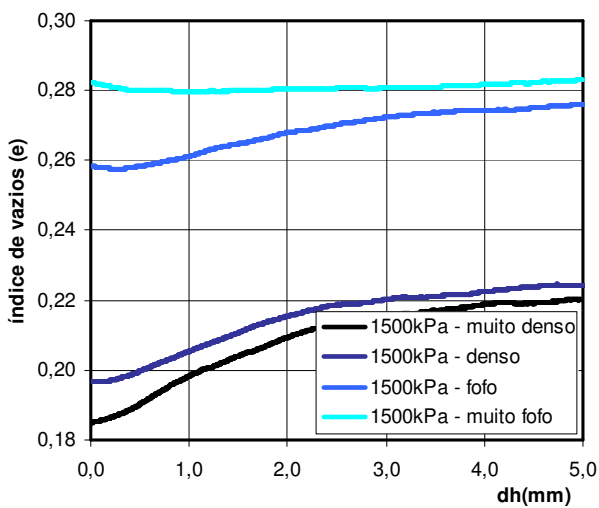


Figura 5.26: Evolução do índice de vazios e durante o cisalhamento.

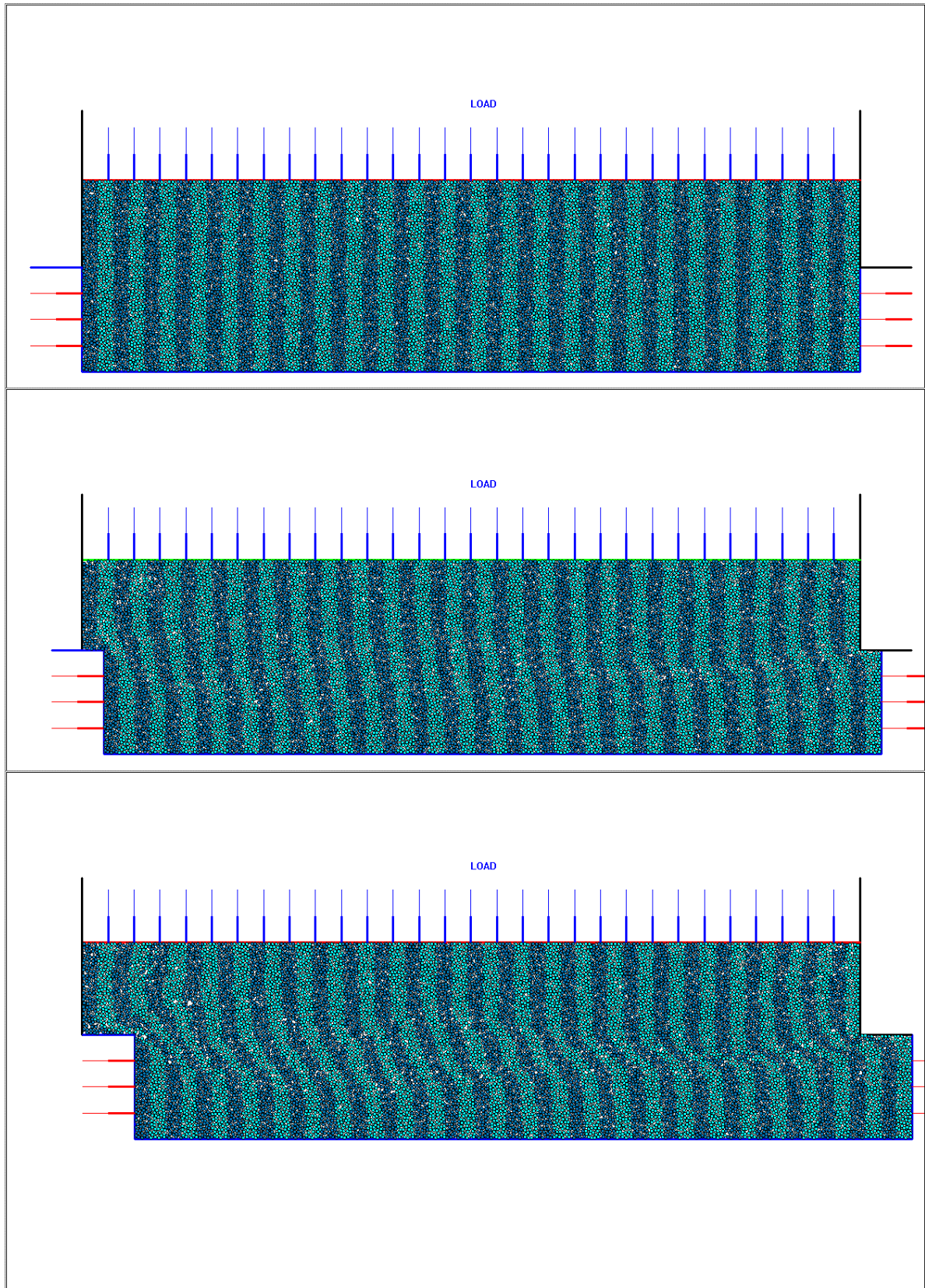


Figura 5.27: Ensaio de cisalhamento direto. Formação da zona de cisalhamento no interior da amostra de solo: a) Configuração inicial; b) c) Amostra cisalhada.

5.4.2. Crítica dos resultados obtidos

As amostras ensaiadas foram formadas por arranjos de elementos discretos rígidos, sem quaisquer das características especiais implementadas na presente pesquisa. Assim sendo, o comportamento das amostras baseia-se no atrito entre os elementos, com o qual pode ser comparado com um solo arenoso.

Para a crítica dos resultados obtidos vamos a considerar, pois, as características da resistência de areias observada em ensaios de laboratório. Complementarmente, serão levantadas as principais conclusões das pesquisas numéricas via elementos discretos já citadas.

a) Influência do índice de vazios e a tensão vertical

Casagrande (1940) demonstrou que o ângulo de atrito das areias depende diretamente do índice de vazios e da variação de volume durante o cisalhamento. Desta forma, areias densas dilatam durante o cisalhamento e exibem um elevado ângulo de atrito, enquanto que areias fofas contraem durante o cisalhamento e exibem um ângulo de atrito muito menor.

Esta tendência viu-se claramente nas simulações numéricas feitas para a validação, que mostraram que a magnitude da dilatação e a resistência diminuíram na medida que cresceu o índice de vazios.

As amostras *muito fofas* mostraram um comportamento volumétrico de contração, cuja magnitude aumentou com o valor da tensão vertical. Nestas amostras não houve pico de resistência e a curva de resistência em todos os casos cresceu suavemente até alcançar a resistência máxima no estado crítico.

As amostras *fofas* mostraram um comportamento levemente dilatante, de magnitude decrescente com a tensão vertical aplicada. A resistência máxima foi alcançada rapidamente para baixos deslocamento horizontais, e manteve-se ao longo do ensaio, sem acontecer um pico definido de resistência.

As amostras *densas* mostraram um pico definido de resistência e comportamento dilatante desde o início do ensaio, para depois alcançar a resistência residual no estado crítico.

As amostras *muito densas* mostraram um maior pico de resistência que as amostras densas, obtido para deslocamentos horizontais menores. Semelhantemente, exibiu comportamento altamente dilatante, até alcançar a resistência residual na condição de estado crítico.

As amostras em geral tiveram um comportamento relativamente mais dilatante do que o esperado, levando em conta o comportamento volumétrico dos solos arenosos reais. Esta discrepância deve-se em parte à dificuldade de reproduzir amostras fofas via elementos discretos, assim como a outros fatores como serem o fator de forma, fator de *upscaling*, o sub-amortecimento do ciclo de cálculo e a velocidade do ensaio. A influência destes parâmetros é discutida no item (c). A evolução do índice de vazios durante o ensaio, apresentada na figura 5.26, mostra uma leve tendência das amostras para um valor crítico de índice de vazios, mas nota-se uma divisão em quanto a comportamento entre as amostras fofas e densas. Foi detectado que a velocidade do ensaio influi nesta discrepância, e que a aplicação de velocidades mais baixas a reduzem. Isto, porém, torna o tempo real envolvido no ensaio muito elevado para a capacidade computacional atual.

A figura 5.25 sumariza a respostas obtidas na validação em termos de resistência. Nota-se uma linearidade na envoltória de resistência para todas as amostras, o que era esperado de um meio particulado incoerente.

b) Evolução do ângulo de atrito

Rowe (1962) estudou as características da resistência drenada de areias sob diferentes densidades iniciais e tensões de confinamentos. Os resultados sugeriram a existência de três componentes de resistência atuando de forma superposta para dar uma resposta mecânica global (ver figura 5.28), a saber:

- a) Resistência mobilizada pelo mecanismo de atrito simples. Esta parcela independe dos níveis de densidade e confinamento, apresentando um valor constante definido pelo ângulo de atrito intrínseco das partículas ϕ_{μ} .
- b) Resistência desenvolvida pela energia gasta no rearranjo e reorientação das partículas de solo. Esta parcela de resistência se desenvolve em maior medida para baixas densidades relativas, quando as partículas possuem

maior liberdade para girar e se rearranjar em novas configurações sob cisalhamento. O ângulo de atrito que engloba esta parcela e a anterior é o ângulo crítico ϕ_{cr} que define a condição de variação volumétrica nula.

- c) Resistência desenvolvida pela energia gasta na dilatação do solo. Esta energia compõe-se de duas parcelas, a energia gasta em atrito interno durante a dilatação e a referente ao trabalho externo necessário para a efetuar a variação de volume. O ângulo de atrito que engloba as três parcelas de resistência é o ângulo ϕ_d que é medido no ensaio.

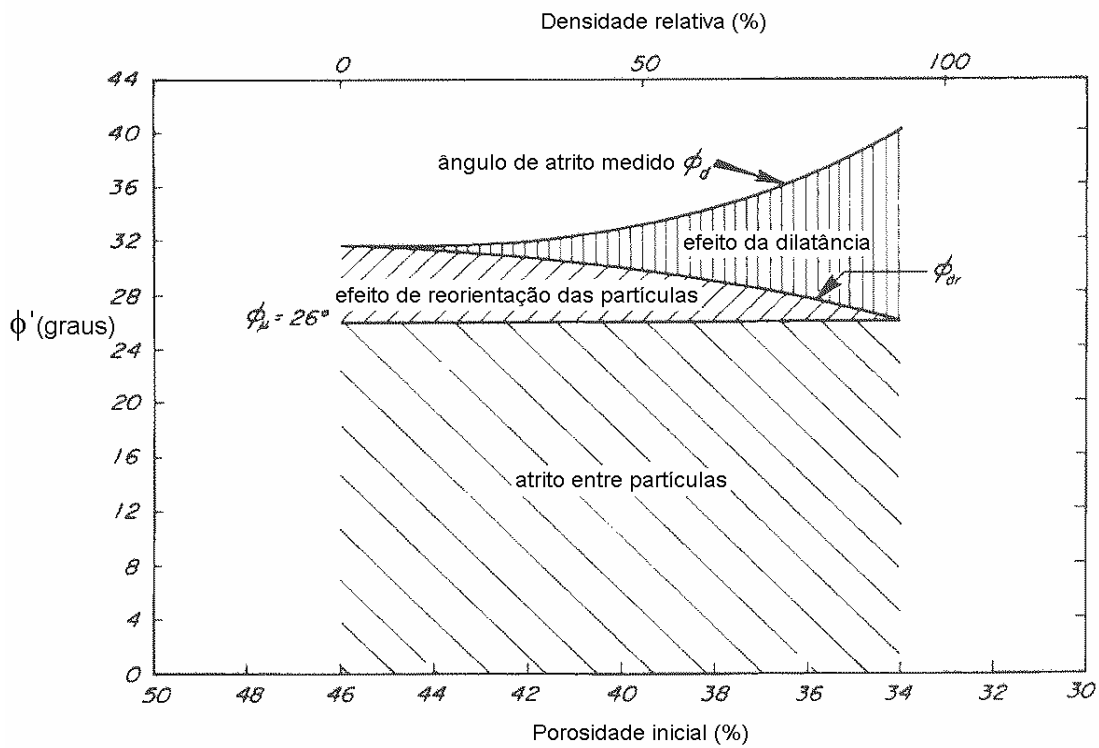


Figura 5.28: Componentes da resistência de areias (Rowe, 1962).

A evolução do ângulo de atrito com o índice de vazios (ou porosidade) é mostrado na figura 5.29. Como se pode apreciar, confirma-se a mesma tendência no crescimento do ângulo de atrito na medida que diminui o índice de vazios e cresce a densidade relativa da amostra. Enquanto aos valores obtidos do ângulo de atrito, e a discrepância com os valores observados em areias, este aspecto é tratado a seguir no marco das outras pesquisas via simulações numéricas discretas. A influência da quebra de grãos será tratada especificamente quando seja modelada nas amostras.

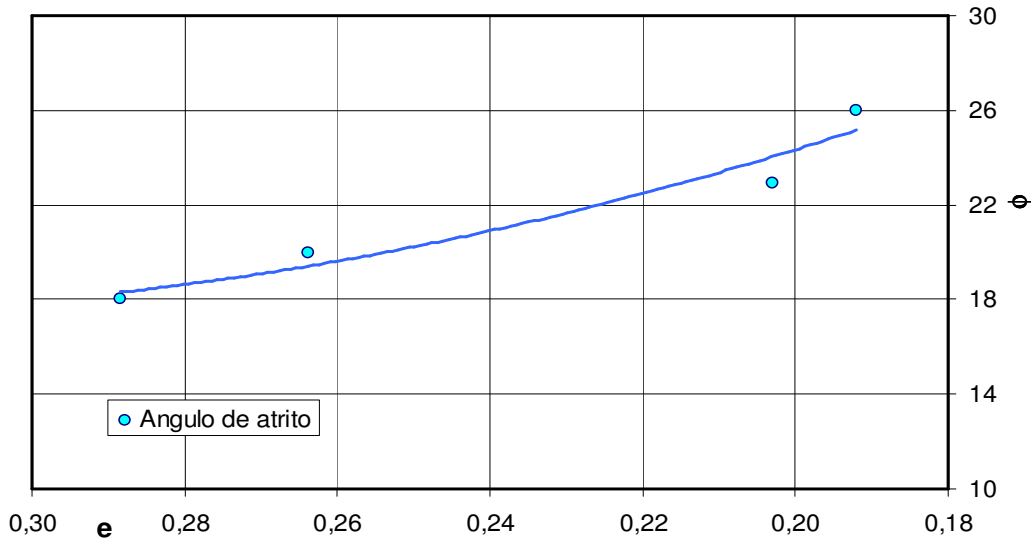


Figura 5.29: Evolução do ângulo de atrito com o índice de vazios.

c) Magnitude do ângulo de atrito

As pesquisas numéricas detalhadas no item 5.1.3 abordam a questão do ângulo de atrito obtido nos ensaios virtuais, e a sua discrepância com respeito aos valores obtidos com modelos físicos y os dados experimentais em areias (em geral os valores de ângulo de atrito resultantes de ensaios virtuais mostraram-se menores).

Ni *et al* (2000) analisou, em simulações 3D, a influência do fator de forma dos elementos discretos na resposta do ensaio. Esta pesquisa apontou que o ângulo de atrito, assim como a dilatância, incrementaram-se com o aumento do fator de forma, isto é, na medida que os elementos afastaram-se da forma circular. Adicionalmente, comprovou-se que o número de elementos discretos utilizados (ou seja, o valor do *upscaling*) influi na resposta do ensaio, já que a maior número de elementos verificou-se uma queda substancial na dilatância y uma diminuição do ângulo de atrito, especialmente o residual.

Um outro aspecto a relacionar o constitui o caráter sub-amortecido do algoritmo de cálculo dinâmico utilizado, o que redundava em um movimento oscilatório residual dos elementos discretos em torno da posição de equilíbrio. Este fenômeno, associado a velocidades de cisalhamento elevadas, mantém a amostra num estado dilatado e portanto mais solto, o que contribui para uma queda nas tensões cisalhantes no plano de falha, o que diminui o valor do ângulo de atrito, especialmente o residual.

Desta forma, podem ser apontadas três causas para o menor valor do ângulo de atrito obtido nas simulações via elementos discretos:

- O fator de forma, dada a forma circular dos elementos discretos utilizados;
- O fator de *upscaling*, especificamente pela pouca variedade de tamanhos de grãos incorporada à amostra;
- O sub-amortecimento do algoritmo de cálculo e a velocidade de cisalhamento.

Neste contexto, cabe destacar que os valores de ângulo de atrito obtidos por Zhang & Thornton (2007) coincidem com os obtidos na presente pesquisa.

d) Estado crítico do solo

O estado crítico, caracterizado pela resistência de valor constante com deformação volumétrica nula, foi alcançado por todas amostras e sob as diferentes tensões verticais. O valor do ângulo de atrito residual $\phi_{res} \approx 17^{\circ}$ foi igual para as quatro amostras de diferente densidade inicial, correspondente a uma relação de tensão $\tau/\sigma \approx 0,30$. O estado crítico foi alcançado, em todos os casos, para um deslocamento horizontal dh entre 3,5mm e 4,0mm. Zhang e Thornton (2007) apontaram que, independentemente do valor da tensão vertical, a partir de um dado valor do deslocamento vertical as amostras atingiram o estado crítico para uma relação $\tau/\sigma \approx 0,30$, o que coincide com o valor obtido na presente pesquisa.

Conclusões

A calibração e validação do programa de elementos discretos utilizado na presente pesquisa foi levada a cabo com sucesso, pois o programa conseguiu representar o ensaio de cisalhamento direto simulando quatro diferentes amostras, e reproduziu o seu comportamento mecânico e volumétrico satisfatoriamente para diferentes tensões verticais.

Os resultados da validação foram discutidos, e apontaram-se em cada caso as virtudes e limitações da simulação. As discrepâncias com o comportamento esperado foram analisadas à luz de outros autores e pesquisas, procurando em cada caso a explicação adequada a fim de entender o motivo das mesmas.

5.4.3. Refinamento da distribuição granulométrica

O principal aspecto no qual houve discrepância com a resposta experimental de solos arenosos foi no referente à magnitude do ângulo de atrito obtido nas simulações. Sobre esta deficiência foram levantadas três possíveis causas, a saber:

- O fator de forma;
- O fator de *upscaling*;
- O sub-amortecimento;

O sub-amortecimento é uma característica constitutiva do algoritmo de cálculo, e a otimização deste algoritmo requer de uma pesquisa mais específica que escape aos tempos e objetivos da presente pesquisa. O fator de forma, por sua vez, encontra a limitação da geometria circular assumida para o elemento base da modelagem discreta. O fator de *upscaling*, finalmente, encontra limite ao número e tamanho das partículas utilizadas na modelagem na capacidade computacional e o tempo de análise disponível.

A partir de este cenário, e na tentativa de fornecer respostas às dificuldades levantadas, apresenta-se um breve estudo adicional realizado sobre a influência do fator de *upscaling* e o fator de forma.

Influência do fator de upscaling

A amostra montada na validação do modelo de análise micro-mecânica está formada por elementos de três tamanhos diferentes, conforme mostrado na tabela 5.3. A classificação desta amostra no sistema unificado de classificação (SUCS) dá uma areia pobremente graduada (SP), e sua curva granulométrica correspondente é mostrada na figura 5.30.

Tabela 5.3: Dados granulométricos da amostra com três tamanhos de grãos diferentes.

raio (mm)	Volume (mm ³)	quantidade	% peso	D₁₀	0,090
0,10	0,031	6.075	16,3%	D₃₀	0,110
0,15	0,071	6.075	36,6%	D₆₀	0,205
0,17	0,091	6.075	47,1%	C_c	0,66 < 1,0
Total		18.225	100,0%	C_u	2,28 < 6

Foi montada uma segunda amostra contendo nove tamanhos diferentes de grãos, no intuito de melhorar a descrição granulométrica do solo. Os dados granulométricos são apresentados na tabela 5.4, e a classificação desta amostra no sistema unificado (SUCS) dá também uma areia pobremente graduada (SP). Sua curva granulométrica correspondente é mostrada na figura 5.30.

Tabela 5.4: Dados granulométricos da amostra com nove tamanhos de grãos diferentes.

raio (mm)	Volume (mm ³)	quantidade	% peso	D₁₀	0,095
0,025	0,002	2.294	0,33%	D₃₀	0,130
0,050	0,008	2.294	1,32%	D₆₀	0,330
0,075	0,018	2.294	2,96%	C_c	0,54 < 1,0
0,100	0,031	2.294	5,26%	C_u	3,47 < 6
0,125	0,049	2.294	8,22%		
0,150	0,071	2.294	11,84%		
0,175	0,096	2.294	16,12%		
0,200	0,126	2.294	21,05%		
0,250	0,196	2.294	32,89%		
Total		20.646	100,0%		

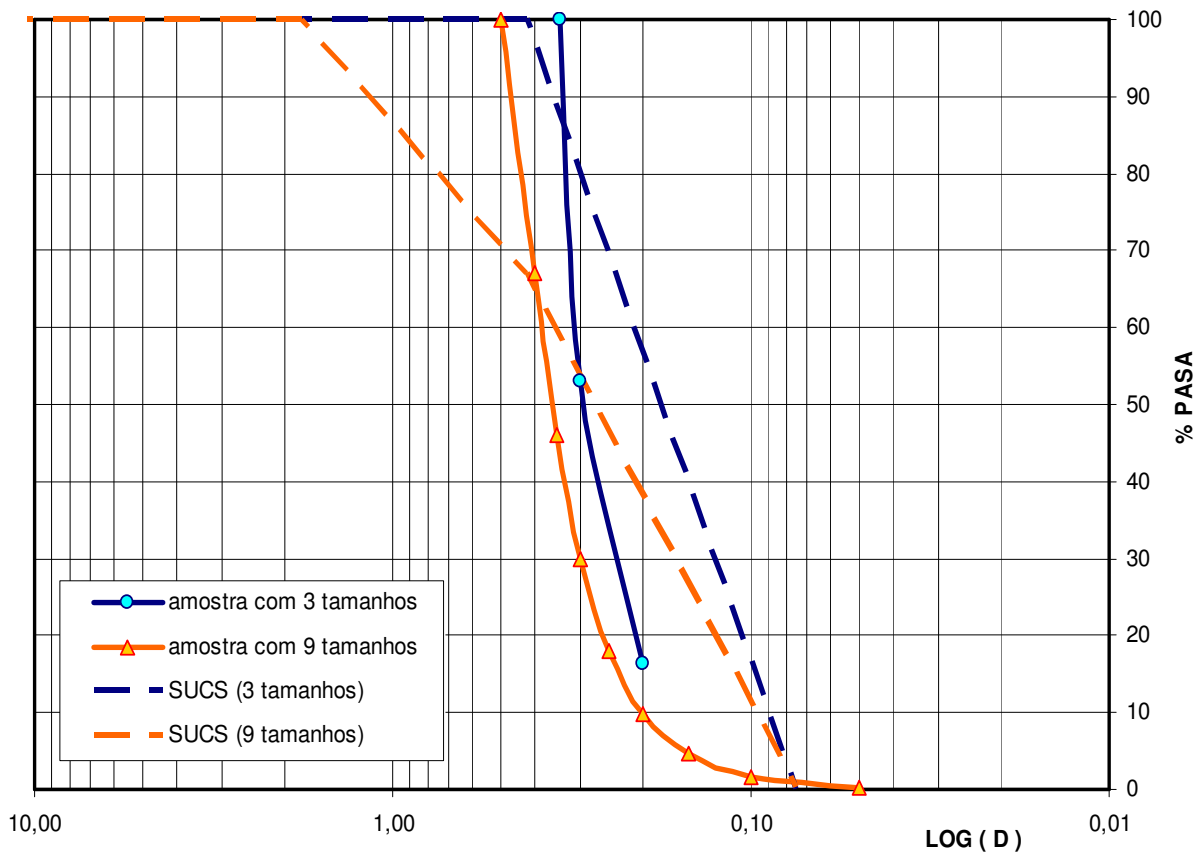


Figura 5.30: Curvas granulométricas de amostras com 3 e 9 tamanhos de grãos diferentes, a as suas correspondentes curvas de classificação pelo SUCS.

Como pode se observar nas curvas granulométricas da figura 5.30 houve uma melhora na distribuição de tamanhos ao passar de três para nove tamanhos diferentes. Mesmo assim, a amostra continuou a classificar como pobremente graduada, e isto devido a dois motivos:

- A pouca presença de finos (0,33% em peso), o que se deve ao fato de modelar os finos a partir de sua aglomeração em grumos argilosos, e principalmente porque elementos muito pequenos (de pouca massa m) tornam o cálculo bastante mais demorado, pois o passo de tempo em cada ciclo está limitado por $\Delta t \leq 2\sqrt{m/k}$;
- A ausência de grãos do tamanho de areia grossa, o que tem a ver com a limitação da relação de tamanhos grão/caixa. Na calibração esta relação foi estudada, estabelecendo-se uma cota superior de 1/20, pelo que o maior elemento deve ter como máximo 0,50mm (a altura da meia caixa é de 10mm), o que foi respeitado na amostra gerada. Esta limitação verifica-se também na execução dos diversos ensaios em laboratório, onde as amostras remoldeadas são montadas com a fração de solo que passa a peneira especificada na normativa correspondente.

Devido ao considerável tempo envolvido na geração da amostra com nove tamanhos, especificamente com o posicionamento dos elementos por influência exclusiva da gravidade, foi montada apenas uma amostra muito densa para a avaliação da influência do fator de upscaling.

A figura 5.31 apresenta as curvas de resposta de um ensaio de cisalhamento direto executado na amostra muito densa com nove tamanhos de grão, para uma tensão vertical de 300kPa, e a compara com o mesmo ensaio em amostra muito densa com três tamanhos de grão.

Como se pode observar, a melhor discretização dos tamanhos de grãos trouxe aparelhada uma variação na resposta do solo, a saber:

- Uma maior rigidez inicial;
- Uma maior resistência de pico (o ângulo de atrito correspondente ao pico passou de $\phi' = 26^0$ para $\phi' = 28^0$). A resistência residual não mudou.
- Uma menor tendência dilatante.

Desta forma, se verificou que uma melhor representação da curva granulométrica contribui a melhorar a capacidade de simulação do modelo.

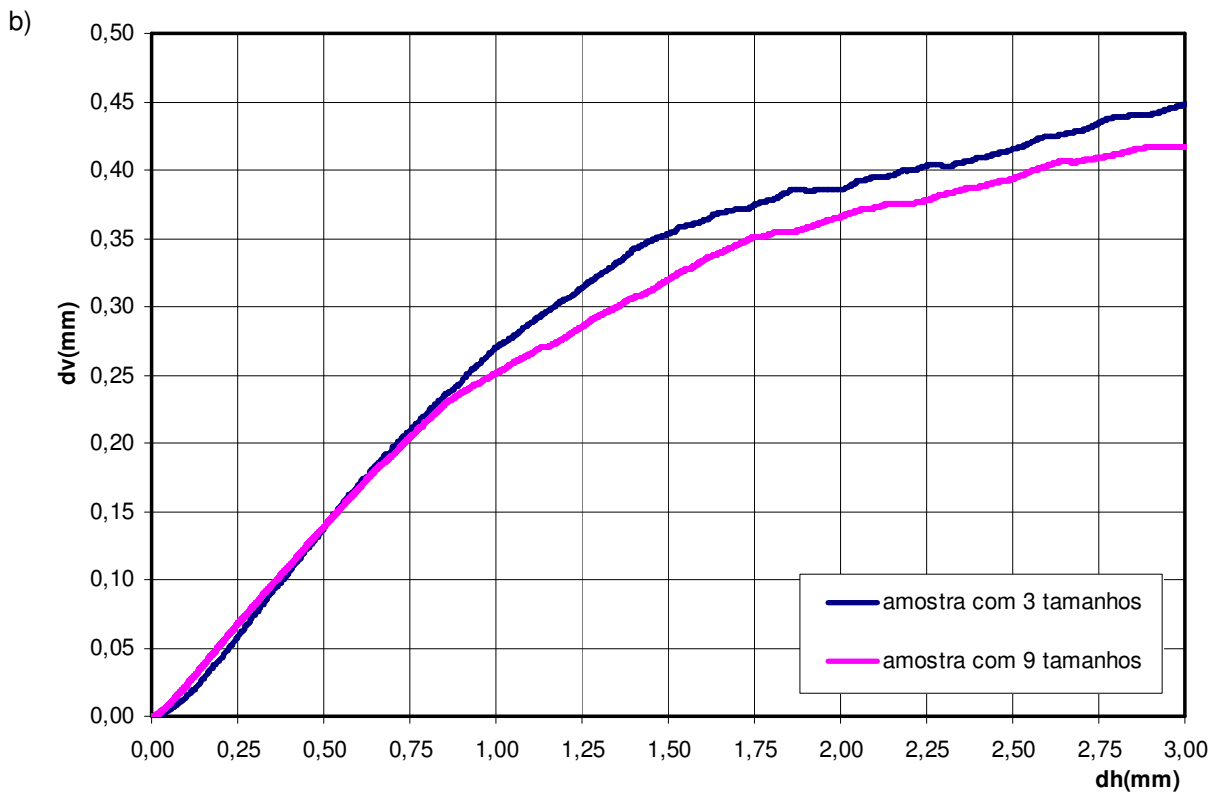
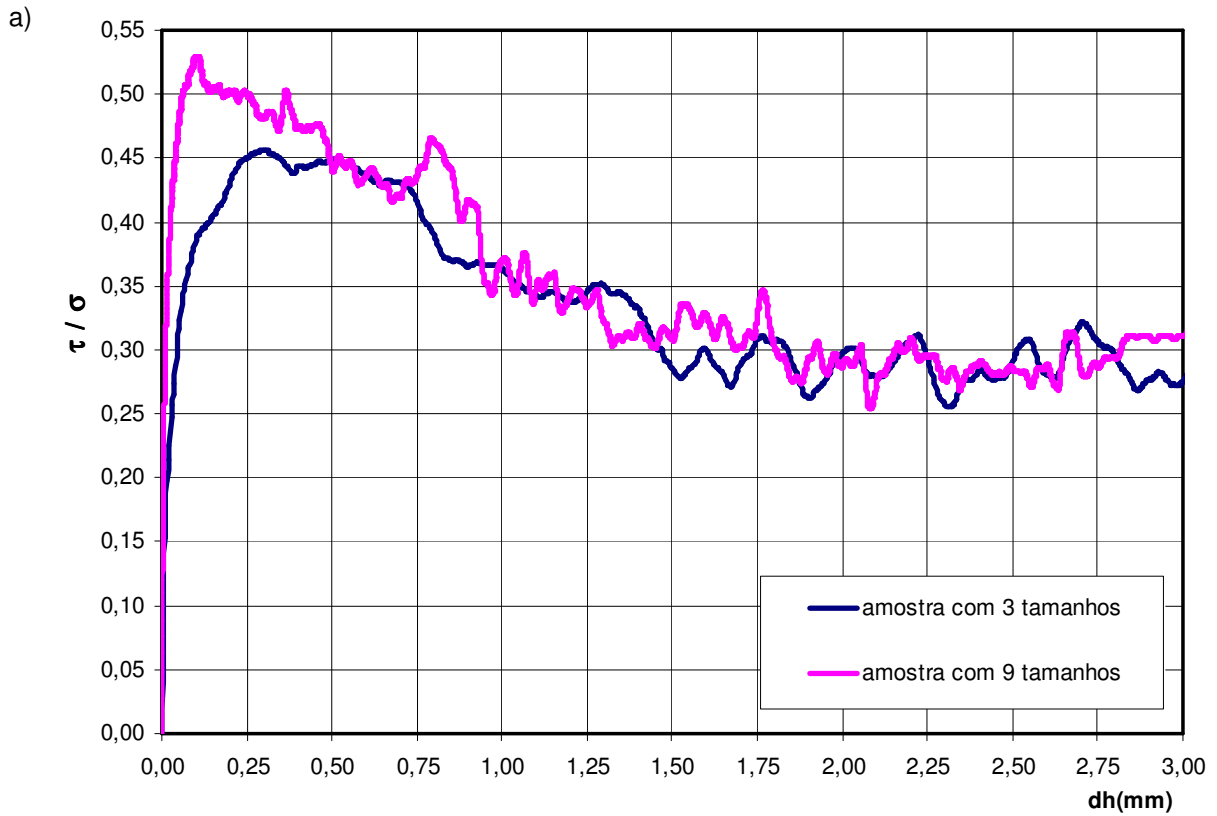


Figura 5.31: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical de 300kPa para amostras muito densas com 3 e 9 tamanhos diferentes de grãos: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Influência do fator de forma

Enquanto ao fator de forma, é sabido que as formas que se afastam da seção circular oferecem maior oposição ao deslocamento relativo, pelo que fornecem uma maior resistência ao cisalhamento. O estudo da influência da forma dos grãos, porém, encontra a limitação na forma circular dos elementos discretos utilizados na modelagem.

Neste sentido, procurou-se obter uma aproximação de uma amostra com grãos de forma diferenciada fazendo uso da formulação implementada no código no referente à ligação rochosa a partir do estabelecimento de *links* rígidos entre elementos discretos. Os elementos assim ligados podem ser entendidos como um grão de geometria especial, como mostrado na figura 5.32.

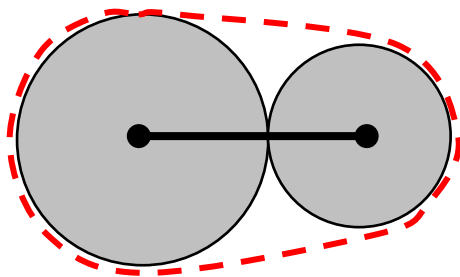


Figura 5.32: Elemento de geometria especial formado a partir da ligação rígida de dois elementos circulares.

Uma amostra muito densa com grãos especiais foi gerada a partir da amostra com nove tamanhos diferentes de grãos, pela definição aleatória de links rígidos na proporção de 1 cada 30 links. Os resultados da simulação do cisalhamento são mostrados na figura 5.33, podendo se apontar:

- Uma maior rigidez inicial por causa dos grãos especiais;
- Um maior e mais amplo pico de resistência (o ângulo de atrito correspondente ao pico passou de $\phi' = 28^{\circ}$ para $\phi' = 30^{\circ}$). A resistência residual também foi incrementada, passando de $\phi' = 17^{\circ}$ para $\phi' = 19^{\circ}$.
- Uma maior tendência dilatante em concordância com o acréscimo na resistência de pico.

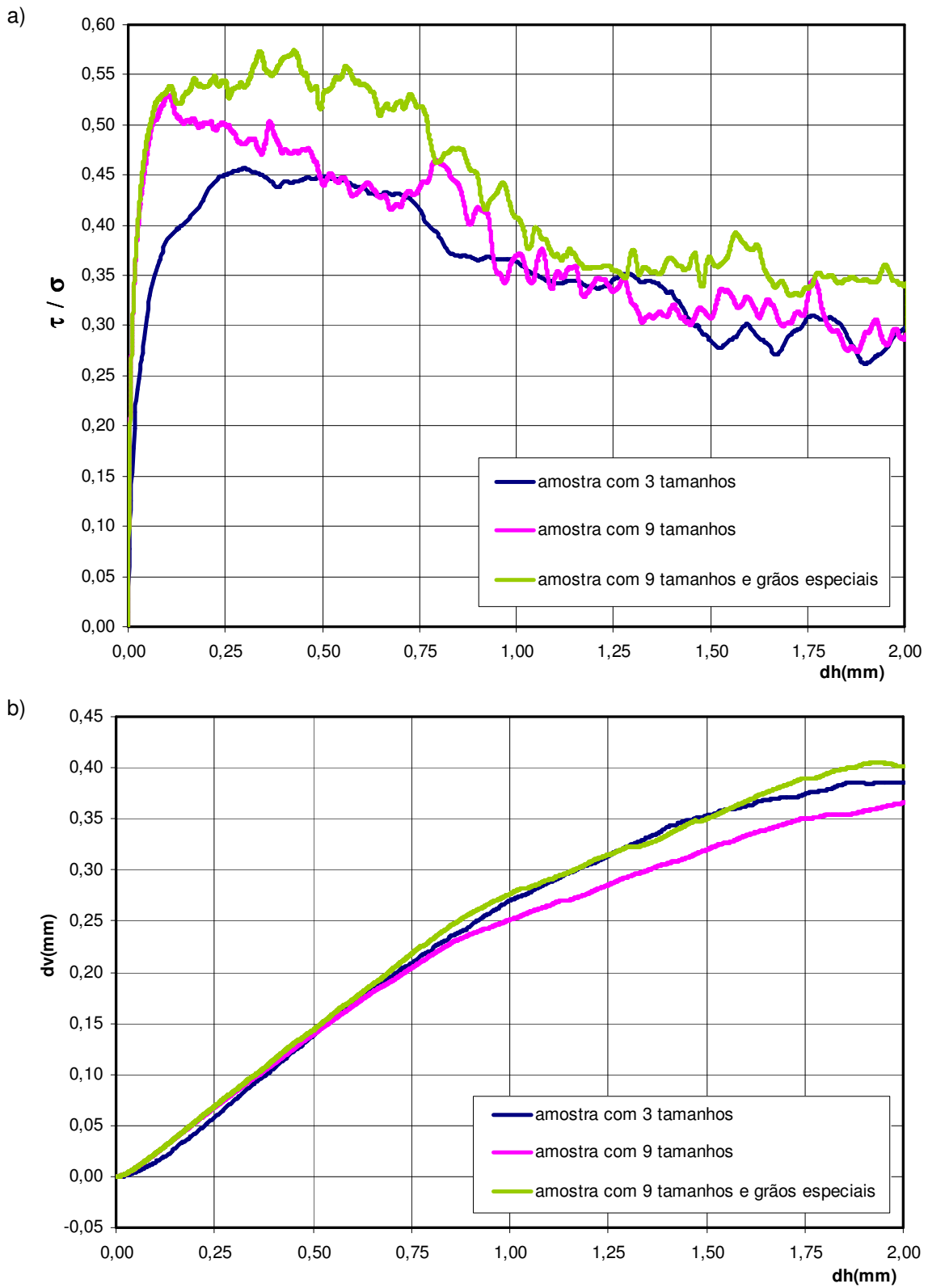


Figura 5.33: Resposta da simulação do ensaio de cisalhamento direto com tensão vertical de 300kPa para amostras muito densas com 9 tamanhos diferentes de grãos, com e sem grãos especiais: a) Curva tensão x deslocamento horizontal; b) Curva deslocamento vertical x deslocamento horizontal.

Conclusões

Na crítica dos resultados obtidos na validação do modelo de análise foi levantada a questão da discrepância nos valores de ângulo de atrito obtido no modelo discreto em comparação com os valores medidos experimentalmente em meios particulados incoerentes. Também foram apontadas possíveis fontes para esta discrepância no fator de forma e de upscaling utilizados, assim como no subamortecimento do algoritmo de cálculo.

A influência do fator de upscaling foi estudada cisalhando uma amostra constituída com nove tamanhos diferentes de grãos, em contraste com a amostra de três tamanhos utilizada na validação. Os resultados mostraram um acréscimo na resistência e no ângulo de atrito causado pela melhor distribuição de tamanhos. No entanto, o tempo envolvido nesta análise numérica foi consideravelmente maior, o que torna inviável sua utilização sistemática na presente pesquisa.

Adicionalmente, a influência do fator de forma foi analisada gerando, na amostra de nove tamanhos de grãos, alguns grãos de geometria especial mediante a ligação rígida de dois elementos discretos. O cisalhamento desta amostra mostrou um acréscimo adicional na resistência e ângulo de atrito por casua dos grãos especiais, tanto no pico quanto no valor residual.

Desta forma, comprova-se que é possível melhorar o ajuste entre o modelo discreto e o comportamento experimental observado. Uma pesquisa mais específica se faz necessária neste assunto, especialmente na implementação de elementos discretos de geometria variada e na otimização do algoritmo de cálculo que permita minimizar os efeitos do sub-amortecimento e os tempos envolvidos na análise numérica.