

3

Modelagem Micro-Mecânica Discreta de Solos Residuais

Em este capítulo é abordada a questão da modelagem numérica dos solos nas suas diversas vertentes, focando a análise das suas capacidades e limitações. Também é introduzida a perspectiva de modelagem oferecida pela micro-mecânica clássica, via o método dos elementos discretos (MED), que será a utilizada na atual pesquisa (Lemos, 2004; Bolton, 2000; Bolton & Cheng, 2002).

Primeiramente é feito um apanhado histórico da evolução da modelagem geotécnica, mostrando o contraste entre a análise mecânica e a micro-mecânica e apontando as diferenças entre as concepções contínua e discreta. Logo se destacam os métodos discretos surgidos como uma alternativa – na verdade um complemento – aos métodos contínuos, no intuito de formular modelos mais achegados às características de certos problemas da engenharia. Seguidamente são apresentados sucintamente os fundamentos do MED e suas principais características e perspectivas de desenvolvimento, assim como suas aplicações no âmbito da geotécnica. Posteriormente é descrita a biblioteca de elementos discretos *DEMLib* e seu aplicativo *Sand*, usados como código base nesta pesquisa. Finalmente, são apontados os aspectos que devem ser incluídos na biblioteca para uma adequada modelagem micro-mecânica orientada aos solos residuais.

3.1.

Modelagem contínua e discreta

A mecânica dos solos tem entre seus objetivos o fornecimento de modelos que representem o comportamento dos solos nos diferentes problemas geotécnicos. Desde os primórdios desta disciplina duas linhas básicas têm orientado esta busca, a idéia do contínuo por um lado, e a concepção discreta por outro. A concepção do solo como um meio contínuo e elástico, e a representação do solo como um bloco em equilíbrio limite mobilizando sua resistência cisalhante máxima em planos pré-definidos, eram os modelos disponíveis na engenharia do início de século XX. Desde então, estas duas concepções têm acompanhado e influenciado o desenvolvimento da mecânica dos solos. No que se segue percorrem-se os diversos aportes que estas duas conceituações fizeram à modelagem mecânica de solos, e à mais recente modelagem micro-mecânica.

3.1.1. Modelagem mecânica

Modelos do contínuo

A análise mecânica em meios geológicos requer da idealização destes por modelos de representação adequados, capazes de levar em conta suas principais características morfológicas e comportamentais. Esta idealização deu-se primeiramente baseada nos conceitos da *mecânica dos meios contínuos*, fundamentalmente pela teoria da elasticidade na primeira metade do século XX. Posteriormente os modelos passaram a se basear também na teoria da plasticidade, inspirada inicialmente na plasticidade de metais, mas ganhando identidade própria com a consagração dos conceitos de endurecimento volumétrico e estado crítico.

O sucesso da teoria da plasticidade como complemento à já conhecida teoria da elasticidade foi o catalisador para o florescimento da pesquisa de modelos constitutivos, e a conseqüente proposta de formulações baseadas em ambas as teorias. Esta junção deu lugar aos modelos elasto-plásticos da mecânica dos solos clássica, aplicados com sucesso para a modelagem do comportamento de solos sedimentares em muitos problemas geotécnicos.

Havia, contudo, os problemas em que a abordagem contínua não era satisfatória, onde as descontinuidades do meio geológico determinam o comportamento global e devem ser modeladas a fim de se obter uma solução realista. Este é o caso, por exemplo, dos taludes em maciços rochosos diaclasados, para os quais os modos de ruptura são controlados pela configuração de descontinuidades, tendo as deformações internas dos blocos escassa influência.

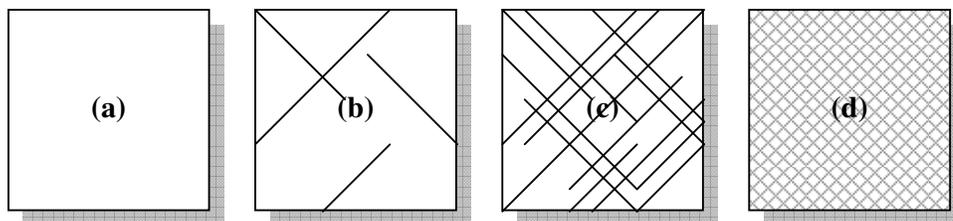


Figura 3.1: Diferentes meios e suas descontinuidades.

A figura 3.1 vem a ilustrar esta problemática na modelagem. O meio (a) é homogêneo e não apresenta descontinuidades, entanto que o meio (d) tem descontinuidades homogeneamente distribuídas numa densidade tal que formam

um padrão contínuo. Nestes casos a modelagem contínua é adequada, pois existe um padrão característico que se repete em toda a amplitude do domínio. Já os casos (b) e (c) representam casos intermédios onde as descontinuidades constituem anomalias no domínio sem guardar um padrão homogêneo, pelo qual a modelagem contínua, que ignorará estas irregularidades, não é adequada.

Modelos discretos

Os métodos de equilíbrio limite ganharam nova força nestes casos, pois incorporavam estas descontinuidades do meio na análise de ruptura, ainda que de forma bastante elementar. Iniciava-se a mecânica dos meios descontínuos ou *mecânica clástica* (Trollope, 1968), como uma forma de abordagem alternativa à mecânica do contínuo.

O desenvolvimento do método dos elementos finitos (MEF), baseado no paradigma de meio contínuo, permitiu a modelagem de problemas geotécnicos mais complexos, mas a necessidade de incluir as descontinuidades do meio na modelagem para uma correta análise continuava. Assim, Goodman *et al* (1968) propuseram o elemento de junta para modelagem de interfaces e superfícies de descontinuidade, mantendo, porém as características de inalterabilidade da conectividade, a hipótese de pequenos deslocamentos e a solução matricial.

A mecânica clástica consolidou-se como caminho alternativo com a proposta de Cundall (1971) de um método de análise de sistemas de blocos rígidos, posteriormente designado como *método dos elementos discretos* (MED). Este, baseado num poderoso algoritmo de integração das equações de movimento, permitia a modelagem de problemas mais complexos do que os abordados pelo método do equilíbrio limite. Além de discretizar cada bloco separadamente, o método possibilitava levar em conta a alteração progressiva da geometria do sistema, e a própria separação dos blocos.

Nascido no âmbito da mecânica das rochas, este método evoluiu para atender outras áreas tais como a micro-mecânica de meios particulados e fraturas de geomateriais. Isto permitiu o aperfeiçoamento do método pelos sucessivos aportes tendentes a melhorar sua capacidade de simulação dos diferentes materiais assim como o seu desempenho computacional para simulações de grande porte.

Limitações da modelagem mecânica

Os últimos trinta anos da mecânica dos solos têm mostrado um trabalho pujante na pesquisa sobre modelagem de solos, marcado pela proliferação de modelos constitutivos baseados na plasticidade e na abordagem contínua. Muitos destes modelos foram formulados para atender a modelagem de características mais complexas dos solos, como ser anisotropia, não saturação, carregamentos cíclicos, *creep*, estruturação, etc (ver tabela 3.1 a 3.3).

O resultado foi uma ampla gama de modelos constitutivos considerados avançados, com elevado grau de complexidade e acarretando duas limitações no referente aos parâmetros utilizados e à questão da representatividade. Por um lado estes modelos empregam em geral um elevado número de parâmetros, requeridos nas formulações que incorporam as novas características comportamentais. Estas formulações, partindo das abstrações da plasticidade, conjugam ajustes matemáticos de curvas de ensaios experimentais com hipóteses geométricas de representação, se servindo no processo da definição de diversos parâmetros. Estes parâmetros muitas vezes carecem de um sentido físico claro, assim como de um critério confiável para a sua determinação. É comum encontrar para eles valores sugeridos pelos autores, baseados na experiência dos casos estudados.

Adicionalmente aparece o problema da representatividade dos modelos. A incerteza centra-se sobre a aplicabilidade desses modelos sofisticados em solos diferentes daqueles utilizados para o seu desenvolvimento. Estes modelos foram desenvolvidos tomando como base o comportamento de alguns solos selecionados, que serviram também para a obtenção dos valores sugeridos para alguns parâmetros, coeficientes e expoentes da formulação. Assim sendo, o uso destes modelos em solos de características diferentes traz aparelhada a confrontação com a validade destes *valores* incorporados aos modelos.

Enquanto à capacidade destes modelos na representação dos fenômenos que se propunham representar, os resultados são dispares. Em Ibañez (2003) são apontadas detalhadamente virtudes e limitações de uma variedade de modelos analisados. Cabe destacar que todos eles descrevem na macro-escala as características comportamentais dos solos, as quais são definidas na microestrutura. Esta carência de modelagem levou os pesquisadores a trabalhar no desenvolvimento da modelagem micro-mecânica de solos.

Tabela 3.1: Alguns modelos constitutivos elasto-plásticos básicos (Ibañez, 2003).

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	PARÂMETROS
<i>Mohr-Coulomb</i>	Elasto-perfeitamente plástico.	Critério de escoamento incorpora dependência da tensão esférica, com diferentes respostas para compressão e extensão. Pode ser ampliado para controlar a dilatância e simular endurecimento-amolecimento plásticos.	4 parâmetros. Modelo ampliado (até 11 parâmetros). De fácil obtenção e com sentido físico
<i>Drucker-Prager</i>	Elasto-perfeitamente plástico.	Critério de escoamento incorpora dependência da tensão esférica, mas prevê a mesma resposta para compressão e extensão. Pode ser ampliado para controlar a dilatância e simular endurecimento-amolecimento plásticos.	4 parâmetros. Modelo ampliado (até 11 parâmetros) De fácil obtenção e com sentido físico
<i>Generalizado</i>	Elasto-plástico endurecimento-amolecimento plásticos.	Formulação generalizada de critérios de ruptura. Inclui efeito da tensão intermediária, simula endurecimento e amolecimento plásticos.	5 parâmetros De fácil obtenção, mas sem sentido físico.
<i>HSM</i>	Elasto-plástico endurecimento a duas superfícies.	Baseado no modelo hiperbólico, mas formulado no âmbito da teoria da plasticidade. Inclui critério de ruptura Mohr-Coulomb, endurecimento com duas superfícies de escoamento, controle de dilatância.	8 a 10 parâmetros. De fácil obtenção e com sentido físico.
<i>Cam Clay Modificado</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento.	Baseado na teoria do estado crítico. Assume superfície de escoamento elípticas. Modela o comportamento de argilas pré-adensadas (amolecimento e dilatância) e normalmente adensadas (endurecimento e contração).	5 Parâmetros. De fácil obtenção e com sentido físico.
<i>Modelo Cap</i>	Elasto-plástico com endurecimento.	Modelo de estado crítico. Incorpora uma superfície <i>cap</i> móvel e outra de ruptura fixa. Fluxo plástico associado. Superfície de ruptura combina os critérios clássicos de von Mises, Drucker-Prager ou Mohr-Coulomb.	8 parâmetros. Alguns de difícil obtenção e sem sentido físico.

Tabela 3.2: Alguns modelos constitutivos elasto-plásticos avançados (Ibañez, 2003).

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	PARÂMETROS
<i>Lade-Kim</i>	Elasto-plástico endurecimento e amolecimento isotrópicos.	Formulação tridimensional para materiais com atrito interno. Superfície de plastificação com endurecimento tipo <i>work hardening</i> e um critério de ruptura próprio. Fluxo não associado. Inclui influência da tensão de confinamento na rigidez.	12 parâmetros. De difícil ajuste e sem sentido físico.
<i>Hierárquico</i>	Elasto-plástico endurecimento e amolecimento isotrópicos.	Formulação hierárquica permite assumir diversos critérios de ruptura. Diferentes versões incluindo fluxo associado e não associado, endurecimento cinemático e anisotropia induzida.	9 parâmetros. De difícil ajuste, alguns sem sentido físico.
<i>Matsuoka-Nakai</i>	Elasto-plástico com endurecimento isotrópico.	Formulação baseada no conceito do plano espacial mobilizado, para materiais com atrito interno. Assume superfície de escoamento e de ruptura dependentes do ângulo de atrito. Adota lei de endurecimento hiperbólica.	8 parâmetros. De fácil ajuste e com sentido físico.
<i>Superfícies aninhadas</i>	Elasto-plástico com endurecimento cinemático.	Formulação com endurecimento misto, isotrópico e cinemático. Considera n superfícies de escoamento concêntricas que se movem solidariamente. Reproduz deformações plásticas geradas durante carregamentos cíclicos. Formulações para os casos drenado e não drenado. Incorpora anisotropia do material.	Elevado número de parâmetros difícil ajuste e sem sentido físico.

Tabela 3.2: Alguns modelos constitutivos elasto-plásticos avançados (*continuação*).

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	PARÂMETROS
<i>Superfície limite</i>	Elasto-plástico endurecimento e amolecimento cinemáticos.	Formulação anisotrópica com endurecimento misto, isotrópico e cinemático. Adota 2 superfícies de escoamento (limite e atual). Baseado no modelo Cam Clay Modificado. Simula carregamentos cíclicos. Critério de ruptura anisotrópico. Modela o comportamento elástico histerético de argilas pré-adensadas, assim como amolecimento plástico.	Utiliza 15 parâmetros de difícil ajuste, sem sentido físico.
<i>Tipo 'Bolha'</i>	Elasto-plástico endurecimento e amolecimento cinemáticos.	Incorpora uma superfície de escoamento cinemática (<i>bolha</i>) no modelo Cam Clay Modificado, que atua como superfície limite. Endurecimento misto. Comportamento elástico no interior da <i>bolha</i> . Carregamentos cíclicos com descarregamento elasto-plástico.	7 parâmetros. De fácil obtenção, com sentido físico.
<i>Hipoplástico</i>	Teoria da hipoplasticidade.	Baseado na teoria da hipoplasticidade. Utiliza uma única equação válida para situações de carregamento e de descarregamento. Faz previsão da dilatância de solos.	4 parâmetros. De fácil obtenção mas sem sentido físico.

Tabela 3.3: Alguns modelos para solos não saturados e estruturados (Ibañez, 2003).

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	PARÂMETROS
<i>Barcelona</i>	Elasto-plástico endurecimento amolecimento	Baseado no modelo Cam clay Modificado (caso saturado), incluindo a sucção como uma segunda variável de tensão. Superfície de escoamento adicional para variações de sucção. Simula deformações por variações na sucção, colapso, expansão e o aumento de resistência com a sucção. Dilatância.	10 parâmetros. De fácil ajuste e com sentido físico.
<i>Hierárquico $\delta 1$ modificado</i>	Elasto-plástico endurecimento amolecimento	Considera os efeitos da sucção diretamente nos valores dos parâmetros do solo, definidos como dependentes da sucção. Útil para análises com sucção constante. Não simula deformações devidas a variações na sucção (colapso/expansão).	8 a 10 parâmetros. De difícil ajuste, alguns sem sentido físico.
<i>Cam Clay Estruturado</i>	Elasto-plástico endurecimento amolecimento	Baseado no modelo Cam Clay modificado, incluindo colapso dos solos estruturados. Simula amolecimento com deformação volumétrica de contração. Modela efeito da cimentação e da estrutura, e reproduz a desestruturação (colapso) sob carregamento.	8 parâmetros. De fácil ajuste e com sentido físico.

3.1.2. Modelagem micro-mecânica

A modelagem micro-mecânica constitui a mais recente linha de pesquisa na modelagem numérica de solos, impulsionada pela convicção cada vez mais crescente no meio científico geotécnico do rol fundamental da micro-estrutura e a mineralogia na definição das características comportamentais. Ambas as abordagens contínua e discreta foram utilizadas como marco de desenvolvimento de novas teorias micro-mecânicas para solos, as quais são apresentadas a seguir.

Micro-mecânica contínua

A pesquisa no campo da micro-mecânica de solos tem seu ponto de partida no conceito de *dupla porosidade* (ou também dupla estrutura) surgido recentemente de pesquisas experimentais, que vem a estabelecer uma mudança conceitual na abordagem de problemas hidro-mecânicos em solos argilosos. A teoria de homogeneização, por outro lado, é trazida para o seio da modelagem geotécnica como técnica complementar que fornece uma adequada ligação matemática entre a micro e macro-escalas, o que permite a expressão da formulação desenvolvida na macro-escala.

A *teoria da dupla estrutura* (ver mais detalhes no apartado 2.2.3) propõe basicamente que os solos argilosos são possuidores de dois níveis estruturais: o nível da micro-estrutura correspondente à matriz argilosa e sua rede de micro-poros, e o nível da macro-estrutura correspondente ao arranjo dos diferentes grãos e grumos e sua rede de macro-poros. Estes dois níveis apresentam características diferenciadas e interagem entre si mecânica e hidraulicamente para dar uma resposta global. A análise micro-mecânica postula a modelagem destes dois níveis estruturais, assim como sua interação.

a) Modelo de Barcelona com dupla estrutura

O modelo de Barcelona com dupla estrutura (Alonso *et al*, 1994) consiste na extensão do modelo de Barcelona para solos não saturados (Alonso *et al*, 1990), pela inclusão de uma formulação simples para simular o comportamento mecânico micro-estrutural.

A modelagem da micro-estrutura baseia-se nas hipóteses de isotropia do material, saturação, validade do princípio das tensões efetivas e caráter elástico-volumétrico das deformações. Assume-se também que a tensão volumétrica p e a sucção s exercem o mesmo efeito na micro-estrutura. Define-se no plano p - s uma região elástica delimitada por superfícies de escoamento micro-estruturais, de tal forma que toda vez que as tensões no solo ultrapassam tais limites acontece endurecimento do material, o qual é repassado para a superfície de escoamento macro-estrutural materializando o acoplamento hidro-mecânico entre os dois níveis.

b) Modelos micro-mecânicos homogeneizados

Outra linha de pesquisa nesta área o constituem os modelos micro-mecânicos homogeneizados (Murad & Cushman, 1996-1997; Murad *et al*, 2001; Chateau & Dormieux, 2002), caracterizados pelo uso extensivo de princípios matemáticos para o desenvolvimento das formulações, e pela aplicação da técnica de homogeneização para vincular os distintos níveis estruturais.

b.1) Modelo para argilas expansivas

Murad & Cushman (1996-1997) formularam um modelo para argilas expansivas utilizando três escalas diferentes: A *micro-escala* ao nível das plaquetas de minerais argilosos e da água adsorvida, a *meso-escala* ao nível das partículas de argila e a água ocupando os poros inter-partículas, e a *macro-escala* ao nível do arranjo dos diversos pacotes argilosos e a água ocupando os macroporos desse arranjo (ver figura 3.2). Este modelo consegue representar o inchamento de solos argilosos e adensamento secundário, ao incorporar os efeitos físico-químicos e de fluxo na micro-estrutura.



Figura 3.2: Três escalas de modelagem de argilas (Murad & Cushman, 1996).

Na micro-escala as plaquetas de argila e a água adsorvida nelas são consideradas separadamente, pelo que se modela esta escala como um contínuo com duas fases *não sobrepostas*. Os campos de forças atuantes nesta escala diferem dos definidos classicamente para a macro-escala: tensão efetiva e poro-pressão. Trata-se de forças de atração-repulsão que independem do contato direto das partes. Basicamente são três campos: as forças de atração de Van der Waals, as forças de repulsão eletrostática ou osmótica, e as forças superficiais de hidratação.

A inovação da modelagem micro-mecânica vem dada pela inclusão destas forças físico-químicas num princípio das tensões efetivas *modificado* para a micro-escala. Da mesma forma, formula-se a lei de Darcy para a micro-escala, onde se incluem gradientes de atração que levam em conta o efeito de adsorção exercido nas moléculas de água pelas plaquetas de argila.

Já na meso-escala (escala intermediária) as duas fases da micro-escala são homogeneizadas segundo a teoria de misturas híbridas aplicada a sistemas multifásicos. Mediante o uso de equações de balance volumétrico esta técnica deriva uma expressão *média* para cada propriedade das diferentes fases na totalidade do domínio do sistema. Desta forma ambas as fases passam a ser representadas como dois contínuos *sobrepostos*, cada um deles com sua respectiva densidade.

Neste marco de modelagem, a formulação é desenvolvida a partir dos postulados energéticos da termodinâmica (energia interna e entropia), obtendo-se uma expressão ampliada do princípio das tensões efetivas, com a inclusão das forças físico-químicas da micro-escala. O fenômeno do inchamento também é derivado naturalmente pela formulação termodinâmica, derivando-se uma expressão para a pressão de inchamento.

Finalmente, a técnica de homogeneização é aplicada na mistura argila-água da meso-escala para obter uma formulação unificada na macro-escala, cujas equações são discretizadas pelo método dos elementos finitos. Nesta homogeneização, o sistema de dupla porosidade é unificado, e os micro-poros (contínuo *água* na meso-escala) passam a constituir fontes ou sumidouros na fase água da macro-escala.

b.2) Modelo para adensamento secundário e “creep” em argilas

Murad *et al* (2001) propuseram também um modelo micro-mecânico para simular o processo de adensamento em argilas, focalizando especialmente os mecanismos físico-químicos responsáveis pelos fenômenos de adensamento secundário e *creep*. O solo é modelado como um contínuo poroso, deformável, na condição saturada, e com dupla porosidade. O sistema de dupla porosidade foi representado como uma matriz de células permeáveis micro-porosas cercadas de condutos interligados que simulam a rede de macro-poros (figura 3.3).

A técnica de homogeneização é aplicada para levar a formulação dual da micro-estrutura ao nível macro-estrutural, no qual as células poro-elásticas passam a atuar como fontes e sumidouros de fluxo. Desta forma, o sistema bimodal é simplificado num sistema viscoelástico de porosidade simples. O modelo provê uma formulação para os fenômenos de adensamento secundário e creep como resultado da drenagem retrasada das células poro-elásticas.

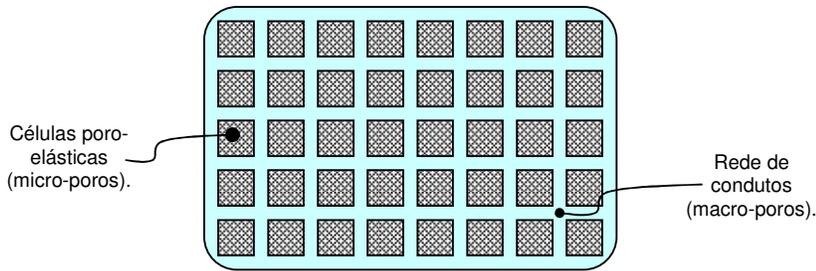


Figura 3.3: Modelo bimodal para argilas (Murad *et al*, 2001).

b.3) Modelo para fluxo saturado e não saturado em meios porosos

Chateau & Dormieux (2002) propuseram uma formulação micro-mecânica para descrever o comportamento de meios porosos saturados e não saturados. O meio poroso é modelado como um sistema bifásico sólido-poro, onde a fase sólida, assumida homogênea e linear-elástica, recebe as condições de contorno do problema (figura 3.4a). A fase poro fica preenchida com fluido sob pressão no caso saturado, enquanto que no caso não saturado fica preenchido com líquido e gás sob pressão. Para a fase poro é adotado um modelo morfológico de poros circulares e condutos que os vinculam, o qual define a distribuição e tamanho destes (figura 3.4b).

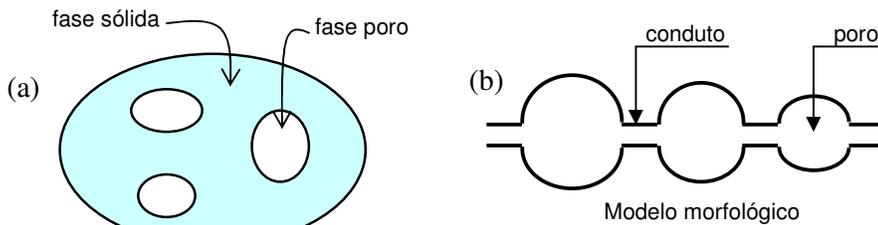


Figura 3.4: Modelo bimodal para meios porosos não saturados (Chateau & Dormieux, 2002).

Quando acontece drenagem, o problema é controlado pelo raio dos condutos, entanto que durante a imbibição o problema é governado pelo raio dos poros. Desta forma, o comportamento histerético da curva característica de solos é reproduzida, da mesma forma do que as forças capilares devido à tensão superficial na interface entre líquido e gás na fase poro. Com auxílio da técnica de homogeneização a formulação é levada de forma unificada à escala macro.

Limitações da micro-mecânica contínua

Os modelos micro-mecânicos contínuos aqui apresentados significam um grande avanço na simulação do comportamento hidro-mecânico de solos. No entanto, estes modelos enfrentam limitações decorrentes das hipóteses nas quais se baseiam, entre as que podem se apontar:

- Os modelos descrevem a micro-estrutura visando apenas a formulação específica a desenvolver, ignorando assim os outros aspectos presentes nessa escala. Estas descrições, por sua vez, mudam segundo seja o foco de modelagem, pelo que estes modelos específicos tornam-se incompatíveis de atuar em forma agregada para simular vários fenômenos simultaneamente.
- Os modelos assumem em geral o comportamento elástico para a fase sólida, o que limita sua capacidade de simular cenários plásticos.
- Não são consideradas quaisquer tipo de anisotropia nos modelos.
- Os aspectos geométricos da micro-estrutura não são levados em conta, apenas define-se a fração de cada fase sobre o domínio total.

Micro-mecânica discreta

A análise micro-mecânica deve lidar com a representatividade dos meios na escala da sua micro-estrutura. Como foi visto, as técnicas de homogeneização oferecem um caminho para incluir as irregularidades presentes na escala micro, modelando o meio irregular como um meio regular equivalente. A modelagem discreta, por outra parte, concebe o meio como irregular de forma explícita, sem necessidade de critérios de homogeneização. Esta aproximação do modelo à realidade, e não da realidade ao modelo, é que torna a modelagem discreta atraente e de grande potencialidade. No que se segue apresenta-se o método dos elementos discretos, ferramenta principal deste tipo de modelagem.

3.2.

Fundamentos do método dos elementos discretos (MED)

A família dos métodos discretos deriva-se do método proposto por Cundall (1971), o qual foi concebido para simular cenários de ruptura com o objetivo de avaliar a capacidade última de sistemas geomecânicos. Para conseguir isto, o método incluiu os mecanismos de ruptura por deslizamento e abertura de descontinuidades, passando para o regime de grandes deslocamentos onde os blocos podem se separar e movimentar sem restrição. As características básicas do MED são apontadas a seguir, o que inclui a definição dos elementos discretos, seus contatos, e do algoritmo de cálculo.

3.2.1.

Representação de blocos e partículas

Inicialmente assumiu-se a característica de corpo rígido para os blocos, visando a modelagem de problemas governados por descontinuidades e envolvendo baixas tensões. Trabalhos posteriores introduziram os blocos deformáveis (Itasca, 1996), utilizando duas técnicas: a) Adotando a hipótese de que o estado de tensão é constante dentro do bloco, e derivando assim o estado de deformação do mesmo empregando alguma lei constitutiva; b) Discretizando o bloco mediante uma malha de elementos finitos a fim de calcular tensões e deformações no interior do mesmo. A primeira técnica mostrou-se pobre em resultados e não se difundiu o seu uso, enquanto a segunda tornou-se a mais utilizada, apesar do inconveniente do maior gasto computacional associado.

Uma outra vertente dos modelos discretos foi introduzida por Cundall & Strack (1979), substituindo os blocos irregulares por partículas circulares rígidas (esféricas em 3 dimensões), visando a análise micro-mecânica dos meios granulares. A técnica teve grande expansão e é usada atualmente nas mais diversas aplicações.

No presente trabalho é utilizada a partícula circular rígida como elemento discreto, ao tempo que é desenvolvida uma formulação para a partícula circular deformável, com capacidade de adensar elasticamente sob carga e de trocar água com o meio durante esse processo. Também é proposta uma partícula circular susceptível de quebra, a qual quando rompe dá lugar a duas novas partículas circulares de tamanho menor.

3.2.2. Representação do contato

A mecânica do contato é uma área complexa e sensível da modelagem discreta, que influi na interação dos elementos discretos e com isso na resposta final da modelagem. De uma forma geral opta-se por adotar a hipótese de contato puntual, onde os blocos interagem a partir do deslocamento relativo entre eles, gerando-se forças de contato quando acontece superposição, segundo uma rigidez linear-elástica amortecida (modelo *mola-amortecedor*). Definidos desta forma, os contatos podem ser gerados ou destruídos em função dos movimentos relativos, possibilitando a simulação de grandes deslocamentos (ver figura 3.5).

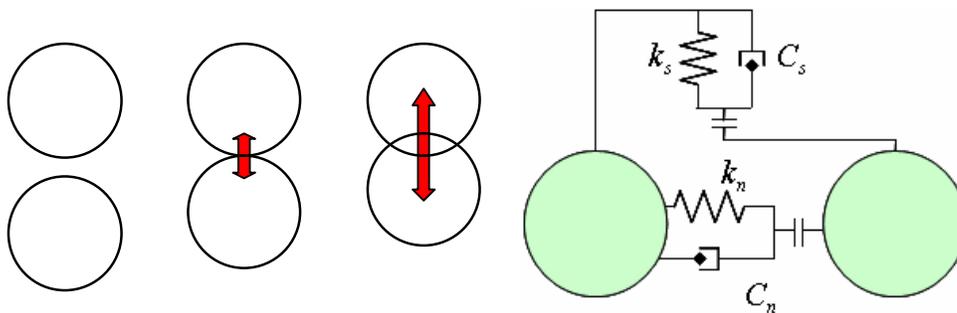


Figura 3.5: a) Contato entre elementos e forças de contato geradas; b) Rigidez tipo mola-amortecedor.

A verificação da existência e atualização dos contatos, se bem compreende operações geométricas elementares, é um assunto relevante pelo gasto computacional associado, com o que os algoritmos devem ser robustos e eficientes. Neste sentido, os elementos tipo partícula avantajam aos do tipo bloco pela sua geometria simplificada, que os torna mais atrativos.

3.2.3. Algoritmo de solução

Uma das características mais salientes dos métodos discretos é o emprego do algoritmo de *relaxação dinâmica*, que contrasta com os métodos matriciais adotados na modelagem por elementos finitos. Trata-se de uma técnica iterativa que resolve, de forma desacoplada e explícita, o sistema de equações do movimento dinâmico dos elementos. Este algoritmo é adequado para cálculos não lineares, tendo a vantagem de evitar a formação de uma matriz de rigidez, já que obtém a solução pela integração sucessiva, por diferenças finitas centrais no passo

de tempo, das equações de movimento amortecido dos elementos discretos. A magnitude do passo de cálculo (passo de tempo) garante o desacoplamento das equações do sistema. O ciclo de cálculo é sumarizado na figura 3.6.

Em se tratando de um método dinâmico, a solução estática é obtida pela adequada manipulação do amortecimento para aproximá-lo dos valores críticos, a fim de minimizar o movimento vibratório e forçar a convergência para a o valor estático. A escala de tempos envolvida no processo de integração passo a passo perde sentido físico pela manipulação do amortecimento. Isto, porém, não resta validade à solução, visto que se procura a solução em termos de deslocamentos, e não dos tempos envolvidos no processo. Quando o tempo passa a ser uma variável de importância no cálculo, como problemas envolvendo fluxo, providências devem ser tomadas para controlar o passo de tempo e tornar a solução válida.

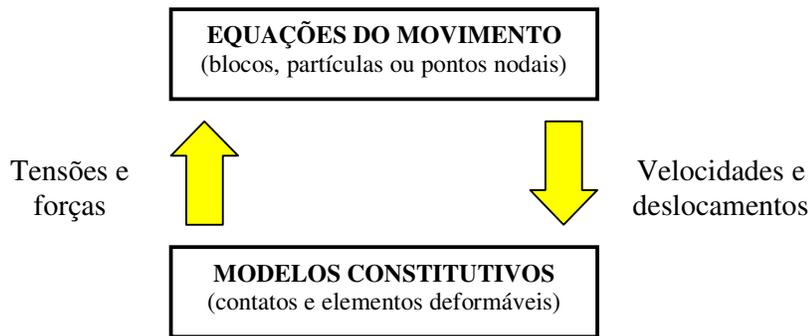


Figura 3.6: Ciclo de cálculo do algoritmo de Relaxação Dinâmica.

O caráter explícito da técnica faz da relaxação dinâmica um algoritmo condicionalmente estável, pelo que o passo de cálculo deve ser limitado a fim de garantir a estabilidade numérica. Como contrapartida, tem um bom desempenho em problemas de não-linearidade acentuada, permitindo grandes deslocamentos, atualização da geometria e contatos do sistema, assim como separação completa entre os seus elementos.

3.2.4. Perspectivas de desenvolvimento

O método dos elementos discretos tem-se desenvolvido a partir de formulações e implementações numéricas independentes, seguindo um padrão comum no sentido geral, mas com variações significativas em vários assuntos (Sitharam, 2000; Lemos, 2004). A tendência do desenvolvimento futuro do

método deveria ser para uma unificação conceitual e teórica, incluindo também os aspectos relacionados com a implementação. Alguns pontos importantes a considerar são:

- *Hipóteses do método.* Constituem o fundamento do método, pois a partir delas deriva-se a formulação matemática. Se faz necessário uma clara explicitação das hipóteses assumidas, já que estas irão definir o tipo de comportamento físico-mecânico e influenciar diretamente na resposta.
- *Algoritmo de solução.* No caso da relaxação dinâmica, que é o algoritmo mais utilizado, existem aspectos que podem dar lugar a discrepâncias na solução e que devem ser estudados. Isto inclui o cálculo e controle do passo de tempo e o tipo e manipulação do amortecimento utilizado. Surge a necessidade de entendimento da representatividade do tempo de cálculo, que pela manipulação do amortecimento deixa de se corresponder com o tempo *real* para adquirir um caráter *fictício*.
- *Validação do método.* Esta não deve ser entendida como a validação global do código, mais como uma verificação do seu correto funcionamento algorítmico, uma comprovação do cumprimento cabal das diferentes hipóteses subjacentes ao código.
- *Geração de modelos.* Neste aspecto importa a automatização da geração de modelos discretos, fundamental para modelos de grande porte, assim como a aleatoriedade da mesma. Uma geração inadequada pode, por exemplo, *rigidizar* artificialmente o modelo e dar lugar a soluções inaceptáveis. O objetivo que se persegue é que, sob certos parâmetros de entrada (como ser número total de elementos discretos) possam ser geradas diferentes configurações aleatórias que não influam no resultado final.
- *Mecânica do contato.* Em primeiro lugar importa a *conceituação matemática* do contato, que inclui o modelo mecânico adotado (mola, amortecedor, atrito, etc.) e o modelo constitutivo associado. No tocante à *representação numérica* do contato, assuntos como a possibilidade ou não de superposição de elementos e a tolerância de contato são importantes. O *gerenciamento* dos contatos, que inclui os algoritmos de detecção, atualização e destruição, é crítico no que se refere ao gasto computacional, pois condiciona o desempenho do método.

3.3. Modelos de partículas em geotecnia

A modelagem discreta particulada fez seus primeiros passos na geotécnica a partir do trabalho de Cundall & Strack (1979a, b), quando foram introduzidos os meios granulados representados por discos para a simulação de solos. Isto marcou o início da pesquisa micro-mecânica de solos, onde fenômenos tais como os mecanismos de transferência de tensões, deformações, fluxo, quebra de grãos, geração de bandas de cisalhamento e liquefação passaram a serem estudados.

A seguir são apontadas algumas pesquisas em modelagem discreta de solos e rochas utilizando elementos particulados, que servem de referência para a presente pesquisa. A ênfase é colocada nas formulações desenvolvidas para explicar os fenômenos físicos, nas hipóteses assumidas e nas novas capacidades implementadas nos códigos de elementos discretos.

3.3.1. Modelagem de ensaios laboratoriais

Os modelos de partículas convencionais, tal como introduzidos por Cundall & Strack (1979), vem sendo utilizados para a simulação de solos em ensaios virtuais, a fim de validar formulações e parâmetros com informação de experiências laboratoriais disponíveis.

Sullivan & Cui (2004) levaram a cabo ensaios de cisalhamento direto virtuais 3D para várias densidades e confinamentos, no intuito de validar a formulação discreta e calibrar os parâmetros do modelo. Os resultados mostraram um acordo global no comportamento, mas certas discrepâncias no ângulo de atrito, o que mostrou a necessidade de aperfeiçoamento da modelagem.

Katzenbach & Schmitt (2004) simularam ensaios oedométricos e triaxiais em areias com modelos de partículas 3D, empregando esferas e elementos especiais formados por duas esferas parcialmente superpostas de modo a gerar uma nova geometria. A análise comparativa dos ensaios mostrou um ajuste aceitável do modelo discreto ao comportamento experimental observado.

Iwashita & Oda (2000) analisaram o processo micro-mecânico de formação de bandas de cisalhamento em solos mediante simulações discretas, com resultado satisfatório. A modelagem foi feita utilizando elementos disco 2D, criando corpos de prova submetidos a carregamento vertical confinado. O modelo conseguiu

reproduzir a formação de uma banda de cisalhamento onde se verificou uma dilatação da massa de partículas junto com altos gradientes de rotações destas (formando um arranjo tipo colunar), até atingir a resistência máxima. Após o pico de resistência aconteceu o colapso da estrutura colunar e o conseqüente amolecimento na resistência.

3.3.2. Modelagem de meios rochosos

Os modelos discretos para meios rochosos tradicionalmente apontavam para a simulação de maciços fraturados empregando elementos tipo bloco poligonais, de maneira a explicitar as fraturas. No trabalho de Potyondy & Cundall (2004) os elementos tipo partícula são usados para a modelagem de maciços rochosos sãos, a fim de simular a geração e propagação de fraturas. Para isto define-se uma ligação de contato entre as partículas que modela a resistência rochosa, concebida como uma viga de conexão com capacidade de transmitir esforços normais, tangenciais e de momento. Desta forma são restritos todos os graus de liberdade relativos entre as partículas, levando-as a um comportamento solidário tipo bloco quase-rígido. A resistência das vigas de conexão é definida a partir de critérios de ruptura para rochas, a qual uma vez ultrapassada dá lugar à quebra da ligação e a conseqüente formação de uma fratura.

3.3.3. Modelagem de meios particulados não saturados

Na modelagem discreta de fluxo não saturado em meios particulados cabe mencionar o trabalho de Gili (1988) e Gili & Alonso (2002). O modelo proposto define, além dos elementos discretos que descrevem as partículas, as entidades poro e menisco. Os meniscos são idealizados assumindo sua superfície livre como arcos de circunferência que encontram as superfícies dos grãos em pontos de tangência, enquanto que os poros ficam definidos a partir dos vazios definidos pelo arranjo das partículas.

O modelo descreve os diferentes mecanismos de transferências de massa na fase poro, menisco, e entre elas, além das forças de interação associadas, por meio a equações de equilíbrio e balanço de massa. A rede de fluxo é constituída pela rede de meniscos formados nos contatos entre partículas, e pela distribuição de

poros obtida a partir da configuração geométrica das partículas. A detecção e cálculo do volume dos poros constitui um ponto sensível do modelo, dada a complexidade dos algoritmos envolvidos e os importantes deslocamentos experimentados pelos elementos discretos ao longo do processo de cálculo.

Uma formulação visando a modelagem da resistência mecânica em solo não saturados foi proposta por Jiang et al (2004). O modelo focaliza apenas a mecânica do contato com presença de menisco, incluindo o efeito das forças capilares no modelo mola-amortecedor que define as forças nos contatos.

3.3.4. Modelagem de quebra de grãos

No campo de simulação das deformações plásticas em solos devido à quebra de grãos sob carregamentos, deve ser citado o trabalho de Cheng *et al* (2004) onde são conformados agregados de partículas que se desintegram sob cargas. A idéia básica é a de juntar vários elementos discretos por ligações que estabelecem uma cimentação entre eles, nos termos de resistência normal e cisalhante. Na medida que os agregados de partículas são carregados estas ligações entram gradativamente em colapso ao se esgotar sua capacidade resistente, com o qual as partículas periféricas separam-se do agregado. Assim, acontece uma mudança da composição granulométrica para os finos, o que redundará num rearranjo das partículas que materializa a deformação plástica do solo.

O modelo para as ligações estipula uma rigidez adicional no contato, nas direções normal e cisalhante, com um limite de resistência em termos de forças, ultrapassado o qual a ligação quebra. Quando uma partícula perde todas suas ligações de contato, abandona o agregado e nessa separação provoca uma dilatação localizada da massa particulada, que vem a simular o fenômeno de dilatação associado à quebra, conforme esperado.

Lobo-Guerrero & Vallejo (2005) modelam este mesmo fenômeno introduzindo um elemento discreto susceptível de quebra. Estabelece-se um critério de quebra, e uma vez ultrapassado este, o elemento quebra em vários fragmentos representados por novos elementos discretos de menor tamanho. Esta técnica evita a necessidade de aglomerar elementos, o que gera um macro-elemento cujo tamanho pode resultar consideravelmente maior do que os outros elementos, o que não é desejável para a simulação.

3.4. Biblioteca *DEMlib*

Como fruto da pesquisa de modelos discretos no DEC/PUC-Rio foi desenvolvida a biblioteca *DEMlib* que implementa o MED. Escrita em linguagem C++ e fazendo uso extensivo da programação orientada a objetos (POO), *DEMlib* é um conjunto de classes que definem os objetos básicos do método.

O programa *Sand* é um aplicativo gráfico associado à biblioteca *DEMlib*, que faz uso dela para a simulação de meios granulares (Velloso *et al*, 2003). O mesmo foi desenvolvido usando linguagem de programação C e C++, com auxílio do kit de interface IUP/LED e o sistema gráfico CD (ambos desenvolvidos no laboratório de computação gráfica Tecgraf/PUC-Rio) pelos quais oferece uma saída gráfica que possibilita a visualização a cada passo de cálculo, com informação sobre forças, velocidades, deslocamentos e contatos (ver figura 3.7). A geração dos modelos é resolvida com auxílio da linguagem de programação *Lua* que possibilita, via arquivo de entrada escritos nessa linguagem, a geração de modelos especificando número e tamanho de elementos de acordo com regras definidas pelo usuário.

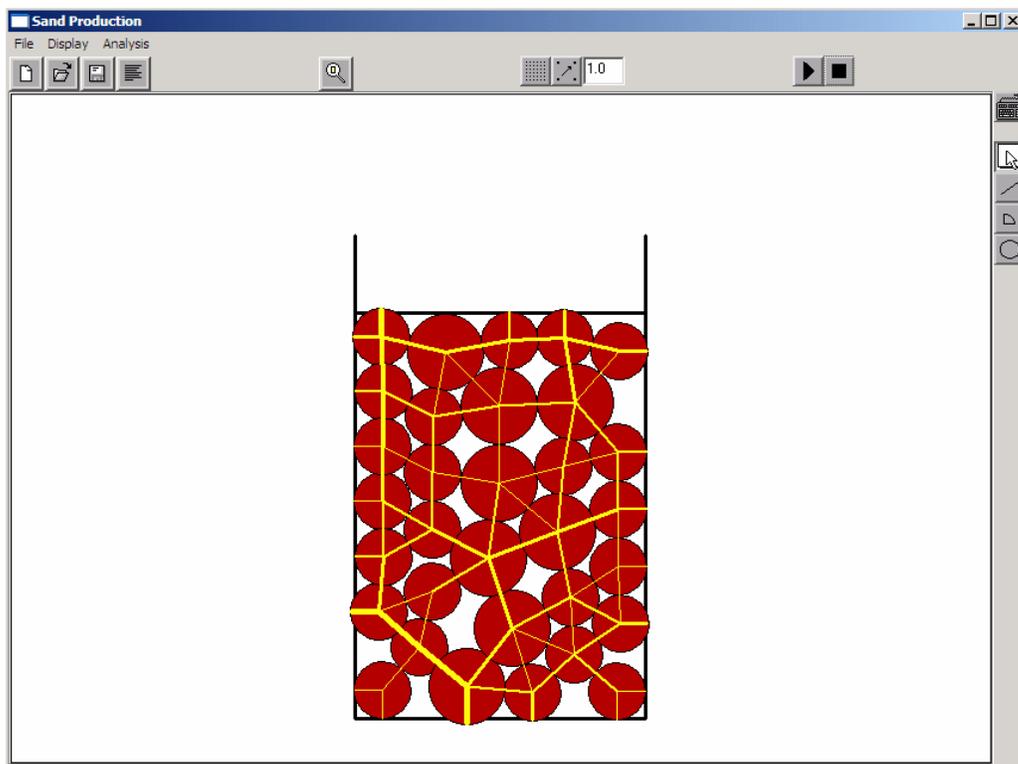


Figura 3.7: Interface gráfica original do código de elementos discretos *Sand*.

3.4.1. Classes e objetos

A biblioteca *DEMLib* é composta por uma série de classes *raiz* e *derivadas* que definem todos os objetos da modelagem discreta. As classes raiz definem os atributos e operações básicas dos objetos, e destas são derivadas classes especializadas que definem atributos e operações dos objetos mais complexos. Estas classes são detalhadas a seguir:

- **Classe Block.** Esta classe raiz define o objeto *elemento discreto* de uma forma genérica, estabelecendo as características geométricas e físicas gerais. A partir de *Block* derivam-se *Polygon* que define elementos de geometria poligonal, e *Disc* que define os elementos tipo disco 2D. A partir de *Disc*, por sua vez, é derivada a classe *Sphere* que define o elemento esfera para simulações 3D (ver figura 3.8).

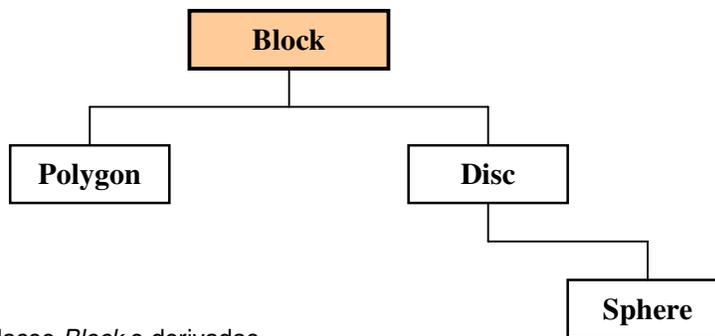


Figura 3.8: Classe *Block* e derivadas.

- **Classe Wall.** Esta classe raiz define o objeto *parede* rígida que serve para delimitar o domínio de modelagem, sua geometria e mobilidade sob carga ou velocidade imposta. Para especificações geométricas especiais são derivadas as classes *LineWall* que define paredes lineares, *ArcWall* que define paredes do tipo arco de círculo, *PlaneWall* que define paredes planas 3D, e *SplineWall*, que define paredes de geometria irregular (figura 3.9).

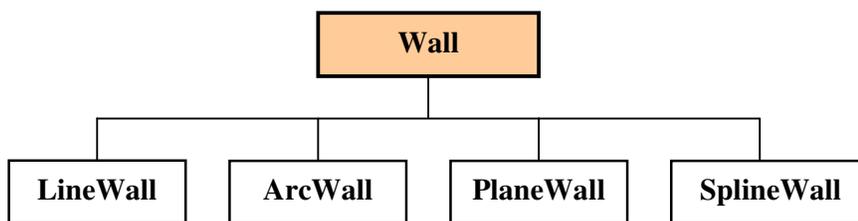


Figura 3.9: Classe *Wall* e derivadas.

- **Classe Link.** Esta classe raiz define o objeto *contato* entre dois elementos quaisquer de uma forma genérica, deixando para as classes derivadas a especificação do tipo de contato, comportamento mecânico e características geométricas. Assim, a classe *DiscLink* especifica o tipo de contato que acontece entre dois discos, *PolygonLink* descreve o contato entre dois elementos poligonais, enquanto que *WallLink* formula o contato entre elemento discreto e parede. A classe *Link3D* é derivada para a definição genérica do contato a três dimensões, e dela deriva-se a classe *SphereLink* para especificar o contato entre elementos tipo esfera (figura 3.10).

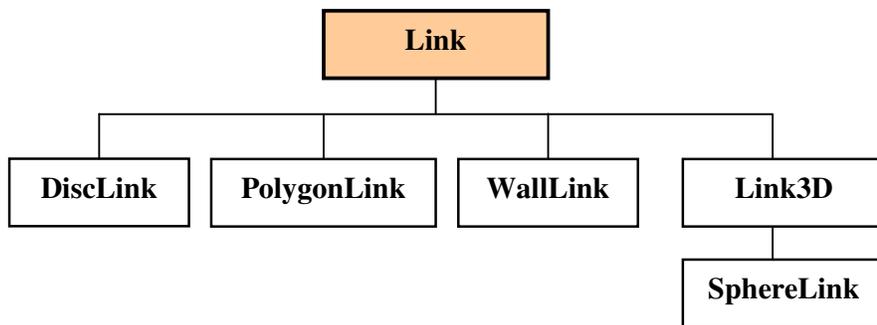


Figura 3.10: Classe *Link* e derivadas.

- **Classe Box.** Esta classe é encarregada de dividir o domínio de modelagem em subdomínios ou celas que encerram os distintos elementos discretos e paredes, e servem para dar eficiência ao algoritmo de detecção e atualização dos contatos. A mesma contempla os casos de duas e três dimensões.
- **Classe Damping.** Esta classe define a formulação geral do amortecimento a ser usado pelo algoritmo de relaxação dinâmica. A especificação dos tipos de amortecimento disponíveis é feita nas classes derivadas *AutoLocal* e *Rayleigh*, da qual se deriva a classe *AutoGlobal* (figura 3.11).

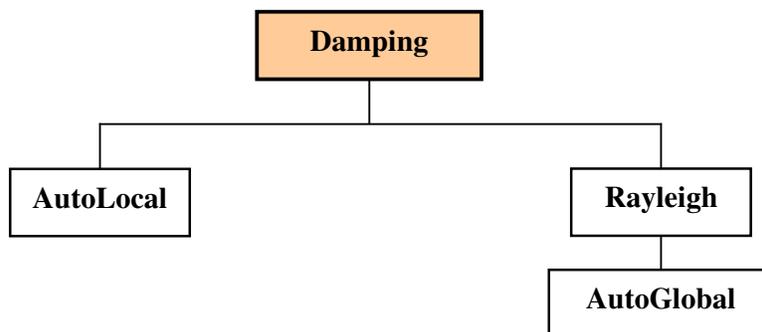


Figura 3.11: Classe *Damping* e derivadas.

3.4.2. Algoritmo de relaxação dinâmica

O cálculo por relaxação dinâmica (RD) se resume basicamente à resolução da segunda lei de Newton (lei do movimento) para cada elemento discreto do sistema. Figueiredo (1991) faz uma descrição detalhada sobre RD, abordando todos os aspectos relacionados com o algoritmo de cálculo, estabilidade, convergência e as diferentes abordagens para sua otimização.

A figura 3.12 apresenta dois elementos discretos genéricos que se acham em contato, onde são explicitadas as diversas forças atuantes neles. Para cada um destes elementos a equação da segunda lei de Newton para cada grau de liberdade pode ser expressa:

$$m(\ddot{x}_i)_N = (F_i)_N \quad i = 1, 2, 3 \quad (3.1a)$$

$$I(\ddot{\theta}_i)_N = (M_i)_N \quad (3.1b)$$

onde m é a massa e I o momento de inércia com respeito ao centro de gravidade dos elementos. As forças F_x , F_y e o momento M atuam no centro de gravidade dos elementos e são resultantes das forças F_n e F_t desenvolvidas nos contatos.

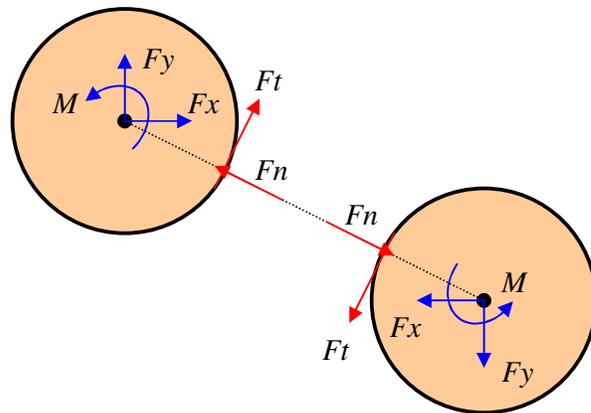


Figura 3.12: Forças e momentos atuantes em dois elementos discretos em contato.

Assumindo aceleração constante do elemento discreto para um dado intervalo de tempo, sua velocidade para cada grau de liberdade pode ser calculada por integração da respectiva aceleração por diferenças finitas centrais:

$$(\dot{x})_{N+1/2} = (\dot{x})_{N-1/2} + \frac{(F_i)_N \Delta t}{m} \quad (3.2a)$$

$$(\dot{\theta})_{N+1/2} = (\dot{\theta})_{N-1/2} + \frac{(M_i)_N \Delta t}{I_i} \quad (3.2b)$$

De forma análoga são obtidos os deslocamentos e rotações do centro de gravidade dos elementos como

$$(x)_{N+1} = (x)_N + (\dot{x})_{N+1/2} \Delta t \quad (3.3a)$$

$$(\theta)_{N+1} = (\theta)_N + (\dot{\theta})_{N+1/2} \Delta t \quad (3.3b)$$

A partir dos deslocamentos de corpo rígido obtidos para os elementos discretos, interessa conhecer os deslocamentos relativos entre elementos que possibilitarão a detecção de contatos e o cálculo das forças associadas. Os deslocamentos normal e tangencial entre elementos são calculados segundo

$$(\Delta n)_{N+1/2} = (\dot{x}_{Bi} - \dot{x}_{Ai})_{N+1/2} n_i^c \Delta t \quad (3.4a)$$

$$(\Delta s)_{N+1/2} = (\dot{x}_{Bi} - \dot{x}_{Ai})_{N+1/2} t_i^c \Delta t - (\dot{\theta}_{Ai} R_A + \dot{\theta}_{Bi} R_B)_{N+1/2} \Delta t \quad (3.4b)$$

onde n_i^c e t_i^c são os vetores unitários na direção normal e tangencial respectivamente, utilizados para projetar os vetores velocidade \dot{x} . Uma vez em conhecimento dos deslocamentos relativos, é possível determinar as forças geradas nos contatos entre elementos.

O cálculo das *forças de contato* baseia-se na hipótese de que pode acontecer superposição de elementos, e que forças são geradas na medida que acontece superposição, cujas magnitudes vêm dadas por uma lei de rigidez adotada. A figura 3.13 mostra como acontece o contato por superposição (dado pelos valores de superposição normal Δn e tangencial Δs). Na biblioteca *DEMlib* assume-se uma lei de rigidez linear para forças normais e cisalhantes, definidas pelos parâmetros k_n e k_s , pelo que estas são dadas por

$$(Fn)_{N+1} = (Fn)_N + k_n (\Delta n)_{N+1/2} \quad (3.5a)$$

$$(Fs)_{N+1} = (Fs)_N + k_s (\Delta s)_{N+1/2} \quad (3.5b)$$

Este tipo de contato baseado na superposição de elementos não admite o desenvolvimento de forças de tração, já que sem superposição não há força de contato. As forças cisalhantes, por sua vez, estão condicionadas pelas forças normais ao assumir a resistência de atrito para os elementos, que estabelece um limite em função do parâmetro ângulo de atrito ϕ :

$$Fs_{\max} = Fn \cdot \tan \phi \quad \text{e} \quad Fs \leq Fs_{\max} \quad (3.6)$$

Desta forma, as forças cisalhantes nos contatos não poderão se desenvolver além do valor máximo dado pelo mecanismo de atrito.

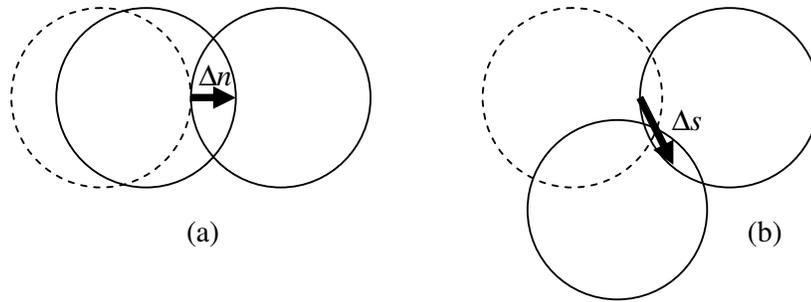


Figura 3.13: Contatos por superposição: a) Δn ; b) Δs .

Assim definido o comportamento dos contatos entre elementos, estes surgirão e desaparecerão entre os diferentes elementos do sistema em função da ocorrência ou não de superposição entre eles para cada passo de cálculo.

Ciclo de cálculo

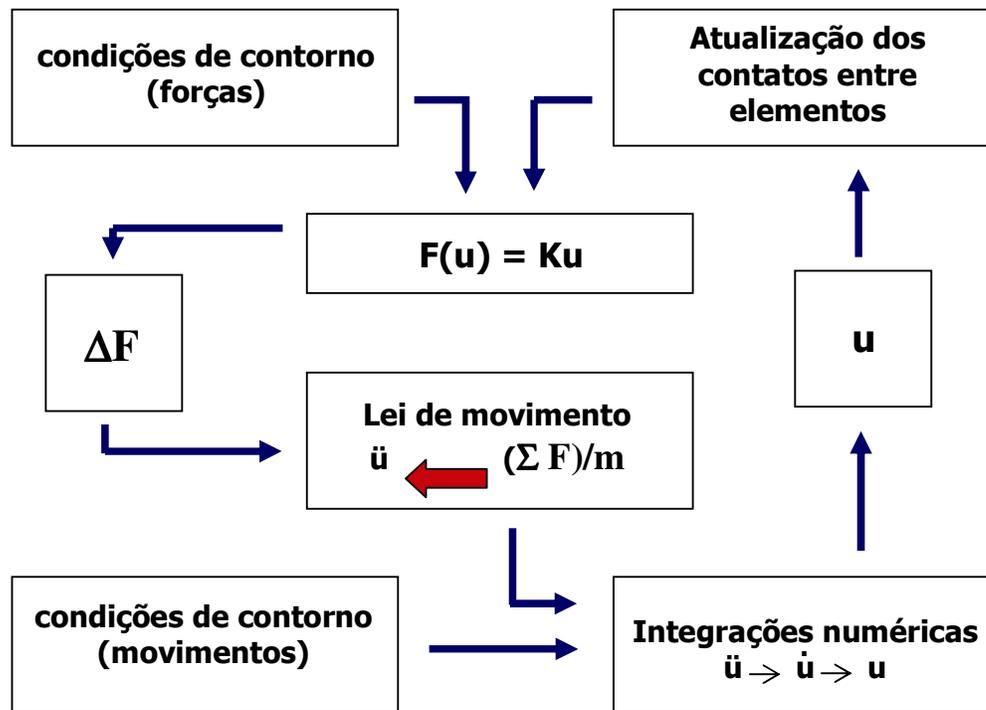


Figura 3.14: Ciclo de cálculo por relaxação dinâmica.

O ciclo de cálculo do algoritmo de RD é mostrado em detalhe na figura 3.14. Num determinado instante, ter-se-á uma configuração onde cada elemento terá forças desequilibradas aplicadas, que darão início a um novo ciclo de movimento. Pela aplicação da lei de movimento, podem ser calculadas as

acelerações correspondentes às forças desequilibradas em cada elemento, e por integração numérica (diferenças finitas centrais) as velocidades e deslocamentos. Em posse dos deslocamentos, são atualizados os contatos entre elementos, e em função da superposição de elementos haverá novas forças de contato, segundo a rigidez mola-amortecedor. Esta nova configuração de forças desequilibradas no modelo dará lugar a um novo ciclo de movimento.

3.4.3. Estabilidade e convergência

Em se tratando de um algoritmo iterativo explícito, o mesmo é *condicionalmente estável*, pelo que certas restrições devem ser impostas sobre o passo de tempo Δt a fim de garantir uma solução válida. Basicamente Δt deve ser tal que assegure que a perturbação (vibração mecânica) de um elemento discreto não se propague a outros. Desta forma garante-se o *desacoplamento* das equações de movimento para cada elemento, o que evita a montagem de uma matriz de rigidez. Esta limitação vem dada pela velocidade de propagação das vibrações mecânicas, a qual é função das propriedades de rigidez e inércia dos elementos.

A otimização do passo de tempo obtém-se resolvendo o problema de autovalores para as equações das forças desequilibradas. No caso de um sistema massa-mola de um grau de liberdade, a condição é dada por

$$\Delta t \leq 2\sqrt{m/k} \quad (3.7)$$

onde m é a massa do sistema e k a rigidez da mola.

A fim de se obter a solução estática ao problema, a equação de movimento deve ser amortecida, de modo a dissipar a energia cinética das oscilações, pois de caso contrário o movimento vibratório continuaria indefinidamente. O amortecimento assumido é viscoso, proporcional à velocidade, com o qual a equação de movimento (eq 3.1) fica

$$m(\ddot{x}_i)_N + c(\dot{x}_i)_N = (F_i)_N \quad (3.8)$$

onde c é o coeficiente de amortecimento, assumido geralmente proporcional á massa, segundo

$$c = \alpha m \quad (3.9)$$

Como o interesse está na solução estática e não na dinâmica (transiente), o tempo, as massas inerciais e o amortecimento introduzido não precisam corresponder a valores reais, pois não interferem no valor da solução estática.

Com isto, os mesmos são manipulados consistentemente com a condição de estabilidade, na procura de diminuir o número de iterações requerido para a convergência para a solução final. O objetivo, pois, se centra em aplicar amortecimentos próximos do valor crítico para minimizar as oscilações, e ponderar as massas inerciais com o intuito de maximizar o incremento temporal.

Esta ponderação de massas, porém, se torna inadequada quando se procura mensurar as forças geradas no sistema discreto, para o qual as massas dos elementos devem ser as correspondentes ao material que representam a fim de obter magnitudes de força com sentido físico.

Tipos de amortecimento

Os dois procedimentos de amortecimento implementados na biblioteca *DEMLib*, *AutoGlobal* e *AutoLocal*, são do tipo *adaptativos*, isto é, ajustam o valor do amortecimento c a cada passo de cálculo, buscando otimizar a convergência para a solução estática.

O método *AutoGlobal* utiliza o amortecimento proporcional a massa descrito na eq. 3.9, mas ajusta a cada passo o fator de proporcionalidade α com o objetivo de alcançar o valor crítico, para o qual a potência amortecedora igualaria-se à taxa de variação da energia cinética. O método, pois, consiste em monitorar a razão entre a energia ΔE_{am} dissipada nos amortecedores e a energia cinética ΔE_{cin} no modelo, e corrigir α conseqüentemente a fim de que esta razão tenda à unidade:

$$\text{Se: } (\Delta E_{am} / \Delta E_{cin}) > 1 \quad \begin{cases} \text{então } \alpha = \alpha / 1.05 \\ \text{senão } \alpha = 1.05\alpha \end{cases} \quad (3.10)$$

Assim que o modelo tende para a solução estática e a energia cinemática tende a zero, o método força que o mesmo aconteça com a energia de amortecimento, com o qual minimiza-se o surgimento de forças espúrias.

Já no método *AutoLocal* o cálculo do amortecimento é feito localmente para cada elemento. Neste caso, a força dos amortecedores f_m são proporcionais às

forças desequilibradas f , com um sentido contrário à velocidade tal que provoque um decremento nas oscilações.

A eq. 3.11 descreve este critério, onde μ é o fator de amortecimento próximo da unidade, tipicamente 0,80. O método tem a vantagem da sua simplicidade, já que o fator é adimensional e independente de qualquer propriedade do meio, mas é sub-amortecido por definição, com o qual sempre haverá oscilações quando as forças desequilibradas não forem nulas.

$$f_{am} = (-\mu) \left[f \frac{\dot{u}}{|\dot{u}|} \right] \quad (3.11)$$

3.5. Modelagem discreta de solos residuais

Para uma adequada modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais, se faz necessário a inclusão na biblioteca *DEMlib* das características e fenômenos apontados como relevantes pela pesquisa experimental de solos residuais. Estes aspectos são detalhados a seguir, e estão relacionados com:

- Dupla Estrutura
- Características granulométricas
- Fatores macro-estruturais
- Fenômenos de fluxo

3.5.1. Modelagem discreta da dupla estrutura

A teoria da dupla estrutura é adotada como marco de referência para o entendimento dos solos residuais. Na abordagem discreta também é possível explicitar os dois níveis de estrutura, onde:

- A *macroestrutura* fica definida pelo arranjo do conjunto dos elementos discretos que simulam os diferentes grãos e grumos que formam o esqueleto e definem uma rede de macro-poros.
- A *microestrutura* é modelada nos elementos discretos que representam os grumos argilosos, nos quais são incorporadas as capacidade de adensamento e troca de água com o exterior, a fim de representar a estrutura e atividade das partículas argilosas, assim como a rede de micro-poros.

Para desenvolver a formulação do comportamento micro-estrutural são resgatadas as hipóteses assumidas pela teoria de dupla estrutura, a fim de servir como ponto de partida. Estas são:

- Processos reversíveis.
- Sem orientação preferencial.
- Deformações volumétricas e elásticas.
- Condição saturada.
- Princípio das tensões efetivas válido.

A partir destas assunções, serão derivadas as formulações correspondentes aos problemas de adensamento sob carga, expansão em descarga, inchamento por umedecimento e contração por secagem.

3.5.2.

Modelagem discreta das características granulométricas

A composição granulométrica dos solos residuais apresenta uma diversidade de tipos e tamanhos de partículas, sendo um fator de ampla influência no comportamento mecânico do mesmo. A partir da limitação imposta pela representação discreta das partículas apenas por meio de discos, serão modelados as seguintes características:

- *Tamanho e forma das partículas.* O tamanho das mesmas pode ser ajustado definindo o raio dos discos segundo o raio equivalente das partículas. Enquanto à forma das partículas, serão criados elementos de geometria especial a partir da junção rígida de dois elementos circulares de igual ou diferente raio.
- *Mineralogia das partículas.* Faz-se uma distinção básica entre minerais primários (quartzo, feldspato e outros) e secundários ou argilominerais. Os primários são rígidos e resistentes e os secundários são mais deformáveis e formam bolsões saturados. Assim, pode-se modelar com discos rígidos os minerais primários e com elementos grumo para os secundários. Enquanto aos minerais em alteração, menos resistentes e quebradiços, estes serão modelados mediante elementos especiais que podem quebrar sob carga.

3.5.3.

Modelagem discreta dos fenômenos macro-estruturais

Os fenômenos da macro-estrutura são os referidos ao esqueleto sólido e influem diretamente no comportamento volumétrico assim como na resistência. Estes são detalhados seguidamente:

- *Compacidade.* Esta característica, expressada pelo índice de vazios, descreve junto com os valores de tensão e sucção o estado do solo (segundo a teoria do estado crítico estendida aos solos não saturados). A compacidade pode ser modelada a partir do ajuste do índice de vazios no modelo discreto, que por sua vez é feito controlando o número de elementos discretos para uma dada área de modelagem.
- *Arranjo.* O arranjo das partículas na massa de solo tem a ver com a disposição geométrica das diversas partículas constituintes. Configurações densas ou soltas, camadas, veios e outras características são típicas em solos residuais, e podem ser modeladas com uma geração ‘inteligente’ do meio discreto, incluindo restrições geométricas que descrevam estes arranjos.
- *Cimentação de grãos.* A cimentação restringe o movimento relativo das partículas, oferecendo à massa de solo uma maior rigidez. Esta característica pode ser modelada operando no comportamento dos contatos entre partículas, a fim de definir ligações que simulem a resistência ao movimento relativo por parte da cimentação.
- *Quebra de grãos de baixa resistência.* Este fenômeno, comum em grãos de feldspato alterado, se dá na massa de solo residual sob carregamento, e altera a distribuição granulométrica pela desintegração dos grãos afetados. Pode ser modelado pela implementação de um elemento discreto susceptível de quebra, o qual se desintegra quando um certo critério de ruptura é ultrapassado, desaparecendo e dando lugar a novos elementos discretos de menor tamanho que o substituem.
- *Blocos rochosos.* A presença de blocos de rocha na massa de solo residual é comum para baixos graus de intemperismo, isto é, nos solos jovens. A simulação discreta destes blocos remanescentes pode ser obtida pela implementação de contatos entre elementos discretos que reproduzam a

ligação rochosa, restringindo os movimentos relativos entre os elementos para os três graus de liberdade.

- *Anisotropia, bandeamentos, laterização e graus de intemperismo.* Todos estes aspectos macro-estruturais podem ser simulados a partir da manipulação adequada das implementações específicas já descritas.

3.5.4.

Modelagem discreta dos fenômenos de fluxo

- *Fluxo não saturado.* A simulação do fluxo não saturado na massa residual será realizada pela implementação discreta das equações de fluxo na condição não saturada, utilizando para isto uma rede de fluxo gerada a partir da informação geométrica do conjunto de elementos discretos.
- *Fluxo entre micro e macro-estrutura.* O fluxo de intercâmbio entre a micro-estrutura, definida pelos grumos, e a macro-estrutura, definida pela rede de meniscos, é controlado pelas condições de tensão e sucção presentes.
- *Fenômenos de colapso e expansão.* A partir da modelagem discreta de micro e macro-estrutura é possível simular o comportamento sob ciclos de umedecimento e secagem, assim como os fenômenos volumétricos de expansão e colapso.

3.6.

Outras aplicações da modelagem discreta usando DEMlib

Além do emprego na presente pesquisa, a biblioteca *DEMlib* tem sido utilizada em outras aplicações geotécnicas e geológicas, como serem:

- Produção de areia em poços de petróleo (Velloso *et al*, 2003);
- Cravação de estacas em meio granular (Campos *et al*, 2005);
- Interação de uma camada de sal com outra camada rochosa superior, na simulação de um domo salino. Esta simulação é do tipo híbrido, onde o sal é modelado discretamente, e a camada superior é modelada por elementos finitos (ver figura 3.15). Para a modelagem do sal se utilizou a implementação, detalhada no seguinte capítulo, da cimentação de contato entre grãos, que se adaptou para simular o comportamento viscoso do sal por meio de um *contato viscoso* entre elementos discretos.

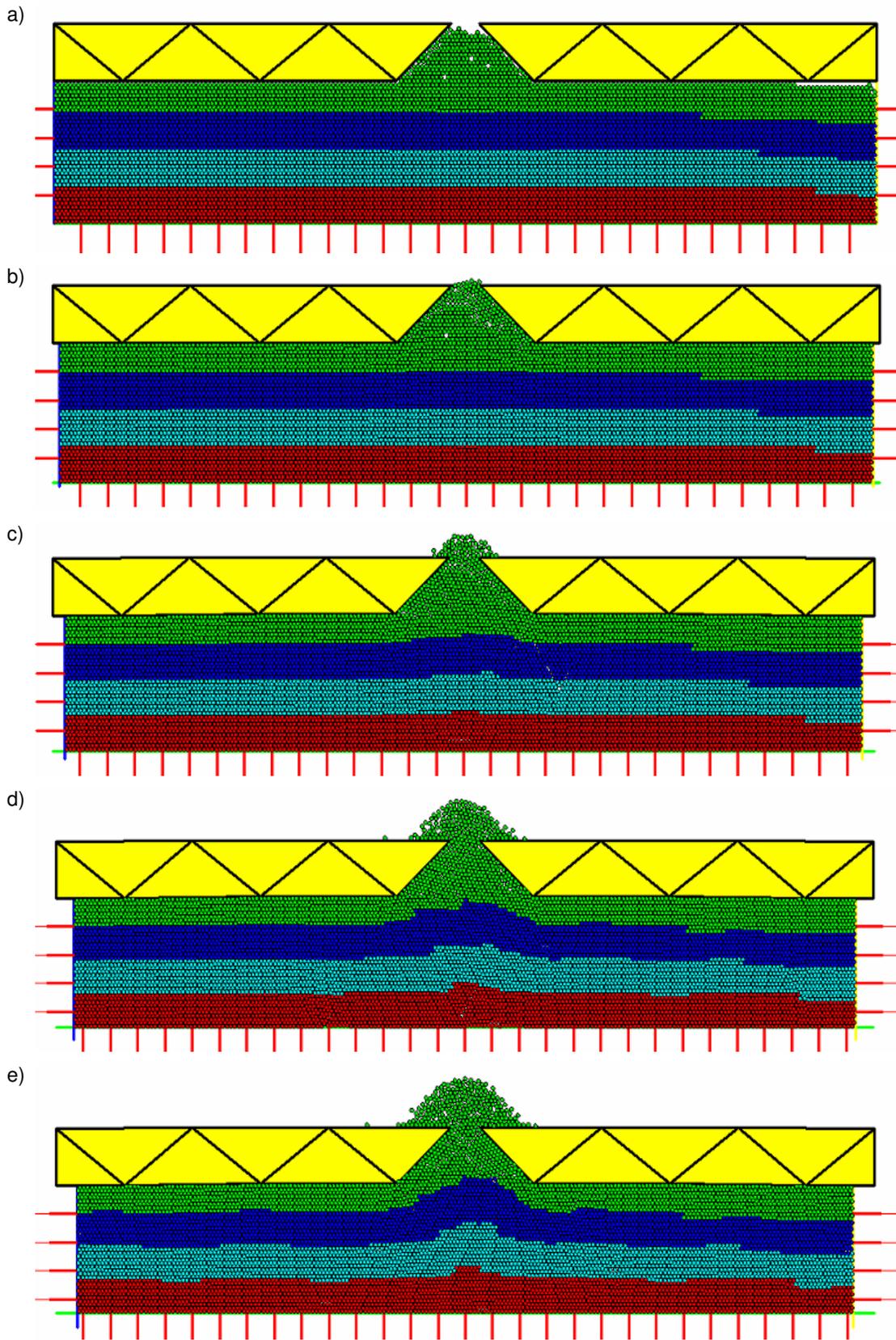


Figura 3.15: Simulação discreta da formação de um domo salino.