

8

Considerações finais

O presente trabalho abordou a questão da modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais, constituindo uma nova linha de pesquisa na área da modelagem numérica aplicada a geotecnia. Esta linha de pesquisa é o ponto de encontro de outras três linhas de pesquisa de grande interesse no meio geotécnico, a saber:

- A pesquisa experimental dos solos não saturados em geral, e dos solos residuais em particular, que atingiu um importante nível de desenvolvimento teórico e experimental.
- A pesquisa sobre os modelos discretos e sua aplicabilidade aos meios geológicos e geotécnicos, de aparição mais recente e em plena etapa de desenvolvimento no meio acadêmico.
- A pesquisa sobre a análise micro-mecânica de solos, ainda em estado incipiente mais com um grande potencial de desenvolvimento.

Destas três, a pesquisa sobre solos não saturados e residuais foi tomada como alicerce conceitual, marco de referência teórico-metodológico e alvo. A pesquisa sobre modelagem discreta foi tomada como ferramenta e meio para atingir esse alvo. A pesquisa sobre análise micro-mecânica foi adotada como filosofia e estratégia para a junção das outras duas linhas de pesquisa.

Esta linha de pesquisa nasceu como resposta à busca por alternativas na hora de abordar o grande desafio de *modelar para compreender*, em vez de *modelar para ajustar*, o comportamento observado em solos não saturados e residuais. Após um tempo de consultas e procuras nos âmbitos da mecânica do contínuo e até no domínio da termodinâmica, as três peças – solos residuais, modelos discretos e análise micro-mecânica - se encaixaram, e deu-se início à pesquisa sobre a modelagem micro-mecânica discreta de solos residuais.

As conclusões deste trabalho são as respostas achadas para certas perguntas que foram norteando o desenvolvimento da pesquisa e marcando as etapas de avanço na investigação deste assunto. Estas perguntas e suas respostas são apresentadas seguidamente.

Pergunta 1: Quais as características que controlam a resposta mecânica dos solos residuais ?

O objetivo de partida da pesquisa foi o de compreender e modelar de forma numérica o comportamento mecânico dos solos residuais, levando em conta suas particularidades para incluí-las devidamente no modelo, isto é, sem obviá-las, nem simplificá-las, e sem incorporá-las via ajustes de curvas experimentais que carecessem de generalidade.

Tratava-se, em fim, de incluir as características através dos fenômenos físicos que as produzem, e não através dos seus efeitos medidos em certos ensaios laboratoriais. Para isto se fazia necessário responder a pergunta: Quais as características? Quais os fenômenos?

A revisão bibliográfica dos trabalhos e publicações da linha de pesquisa sobre solos não saturados e residuais apontou claramente que as características de resistência, compressibilidade e deformabilidade dos solos residuais associam-se a diversos aspectos de *constituição* e *estado* presentes na sua massa, cujas influências se vinculam para dar uma resposta global. A gênese e os diversos processos formativos destes solos são os que moldam estes aspectos.

Entre os aspectos constitutivos se incluem:

- A *estrutura residual*, em termos de fábrica, cimentação de grãos e matriz argilosa, materializando estes uma macro e uma micro-estrutura para o solo.
- A *anisotropia* da massa de solo, em virtude da sua estrutura reliquiar.
- A *resistência dos grãos* constituintes, especialmente dos grãos fracos, produto dos processos de alteração em andamento no solo.

Os aspectos de estado incluem:

- a *compacidade* do solo, em virtude da perda de massa derivada da ação de certos processos intempéricos.
- *grau de saturação* existente na massa de solo.
- *grau de alteração* do solo, que indica o estágio em que se acha o solo dentro da dinâmica do intemperismo.

Estas foram as principais características levantadas, a partir das quais se originou a pergunta seguinte.

Pergunta 2: Qual o método de modelagem mais adequado para modelar o solo residual incluindo estas características ?

Uma vez em posse do conhecimento teórico-experimental dos fenômenos envolvidos no comportamento mecânico dos solos residuais, o objetivo centrou-se em adotar um método de modelagem numérica a partir do qual desenvolver uma ferramenta de simulação que incluí-se estes fenômenos. Para isso se fez necessário responder às questões: Qual método? Quais hipóteses? Qual abordagem?

A revisão bibliográfica sobre o assunto mostrou a existência de dois caminhos bem diferenciados para a modelagem de problemas geotécnicos:

- *A modelagem do contínuo*, baseada na concepção do solo como meio contínuo e no alicerce teórico da mecânica do contínuo;
- *A modelagem discreta*, baseada na concepção do solo como meio particulado e no fundamento da mecânica clássica.

Os modelos baseados na mecânica do contínuo, importados da mecânica aplicada aos metais, constituem as principais ferramentas hoje disponíveis para a modelagem de solos. A inclusão de alguns aspectos comportamentais próprios dos solos nestes modelos é feita basicamente por ajuste de curvas de resultados experimentais. Tratam-se de modelos que tentam ajustar os efeitos, mas não modelam os fenômenos que os produzem.

A decisão desta pesquisa em modelar os fenômenos, e não os efeitos, levou a questionar a escala de modelagem, já que os fenômenos característicos dos solos residuais acontecem no nível das partículas. Neste ponto, a análise micro-mecânica aparece, em oposição à análise mecânica (ou macro-mecânica), como a alternativa a utilizar a fim de modelar os fenômenos na escala em que eles acontecem.

Com este cenário os métodos discretos cobram especial interesse. Pois os modelos micro-mecânicos contínuos precisam de funções de homogeneização impostas para levar a formulação desenvolvida da escala micro para a macro. Já os modelos discretos não tem qualquer necessidade de troca de escalas, pois eles naturalmente são modelos da micro-escala, desde que modelam o solo na escala das partículas através dos elementos discretos. Por tal motivo, a análise micro-mecânica via elementos discretos foi o método escolhido para a modelagem.

Pergunta 3: Quais as formulações para descrever estas características e de que maneira estas podem ser incluídas num programa de modelagem discreta ?

A inclusão dos fenômenos presentes em solos residuais no modelo de elementos discretos pressupõe a formulação matemática dos fenômenos levando em conta sua adaptação às condições geométricas do meio discreto. Assim, se julgou necessário a formulação e implementação de:

- Um elemento discreto que comporte um grumo argiloso;
- Um elemento discreto que comporte um grão fraco e quebradiço;
- Um contato que comporte uma cimentação de grãos;
- Um contato que comporte uma ligação rochosa;
- Uma rede de fluxo que comporte a condição não saturada.

O *elemento grumo* foi idealizado a partir da geometria de disco 2D imposta pelo elemento discreto, segundo a teoria de adensamento de Terzaghi aplicada à geometria do elemento, assumindo a hipóteses de saturação e comportamento elástico. O desenvolvimento da formulação do adensamento radial do grumo forneceu umas expressões para a variação de volume do grumo e o volume de água trocado com o meio. A condição de contorno do grumo também foi tratada, propondo uma formulação para a obtenção de um carregamento equivalente a partir das forças e sucções atuantes no seu entorno.

O *elemento fraco* foi idealizado a partir da análise experimental de quebra de grãos, que apontou o mecanismo de quebra utilizado no ensaio brasileiro de tração por compressão diametral como o mais adequado para a modelagem da quebra. Para isto foi proposta uma formulação para a obtenção das forças resultantes atuantes nos elementos fracos, com as quais poder calcular as trações induzidas nestes elementos e checar se o critério de quebra foi ou não ultrapassado. A quebra em duas partes foi simulada pela inclusão de dois novos elementos no lugar do antigo, os quais conservam a massa deste.

O *contato cimentado* foi idealizado a partir das características pontual e fraca da cimentação que acontece entre grãos de solo pela ação de diversos tipos de agentes. Este fenômeno de atração entre grãos foi formulado por uma ligação que se

opõe aos deslocamentos relativos entre elementos discretos, nas direções normal (resistência à tração) e tangencial (resistência ao cisalhamento). Por ser uma ligação pontual e fraca, a mesma não resiste rotações relativas entre elementos. Esta ligação pode ser destruída caso as forças atuantes ultrapassem a resistência dada ao cimento.

O *contato rochoso* foi idealizado como uma ligação forte entre elementos, tal que se opõe aos movimentos relativos nos três graus de liberdade. O modelo de viga rígida de conexão foi adotado para formular os esforços resistentes da ligação (normal, cisalhante e momento), que são comparados com os esforços limite dados pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb para rochas. Quando os esforços ultrapassam a resistência máxima acontece a ruptura da ligação.

A *rede de fluxo não saturado* foi idealizada a partir de uma rede geométrica obtida do modelo discreto e composta dos elementos discretos e suas conectividades (contatos) com outros elementos. Todo contato entre elementos é o espaço geométrico em torno do qual se idealiza a entidade menisco, à qual associa-se um volume de água formando uma geometria específica de menisco, da qual se pode calcular a correspondente sucção. Esta sucção se equilibra com uma força capilar em cada contato, que atrai os elementos em questão. Já a rede de conectividade permite estipular uma taxa de fluxo entre meniscos, controlada pela geometria dos meniscos e pelo gradiente de sucção entre eles. Esta rede de fluxo interage também com os elementos grumos, constituindo para estes a condição de contorno em termos de sucção e trocando água em função do gradiente de sucção entre o grumo e os meniscos. Cabe destacar que se trata de uma rede dinâmica, em constante mudança e adaptação em resposta às mudanças na disposição geométrica dos elementos, o que trai atrelada destruição e criação de meniscos.

Todas estas implementações foram incluídas no passo de cálculo do programa de elementos discretos, que assumiu a característica de acoplado ao vincular o cálculo mecânico com o cálculo de fluxo. O acoplamento se dá nas duas direções: o cálculo mecânico modifica a geometria do modelo e assim a rede de fluxo, e o cálculo de fluxo modifica as forças capilares que afetam o equilíbrio mecânico.

Pergunta 4: Qual a capacidade do programa de modelagem discreta para representar a resposta mecânica de solos ?

Antes de começar com a pesquisa sobre a influência destes fenômenos estudados e implementados na resposta mecânica dos solos residuais, se fez necessário enfrentar uma questão fundamental: Podem efetivamente os modelos discretos modelar solos? Quais suas limitações?

O primeiro passo foi a calibração do modelo, isto é, dos seus parâmetros. Para isto adotou-se o ensaio de cisalhamento direto como referencial para a calibração dos parâmetros de rigidez e amortecimento do modelo constitutivo dinâmico do contato (tipo mola-amortecedor). Também foi necessária a calibração das massas dos elementos parede que materializam a caixa de cisalhamento.

Outras questões relacionadas com o ensaio foram analisadas, dado a sua influência sobre a resposta do modelo: A distribuição de tamanhos da amostra discreta e a relação de tamanhos grão/caixa, a compactação das amostras, a separação das partes da caixa, e a parte da caixa que desloca.

Após a calibração foi feita a validação do modelo discreto, cujo objetivo foi testar a capacidade do modelo de reproduzir o comportamento básico de solos granulares: o mecanismo de atrito, a influência do confinamento na resistência, a evolução da resistência com o deslocamento, com valores pico e residual, a influência da compactação da amostra na resistência, o comportamento volumétrico e os efeitos de contração e dilatação.

Os resultados obtidos na validação mostraram coerência e harmonia, o que deixa de manifesto que o modelo está simulando corretamente o comportamento de solos granulares. Não entanto, a limitação geométrica de representar os grãos de solo apenas por discos e a pouca variedade de tamanhos induziram a uma discrepância no valor do ângulo de atrito obtido. Estas mesmas limitações, junto com as características do cálculo dinâmico, induziram a formação de amostras mais densas e dilatantes do desejável.

Portanto, o modelo discreto se mostrou potente para a simulação do comportamento mecânico de solos, ainda que melhorias podem ser incluídas na representação dos grãos de solo para diminuir as discrepâncias observadas.

Pergunta 5: Qual o efeito isolado de cada uma destas características na resposta mecânica de solos a partir da modelagem discreta ?

Uma vez em posse do modelo calibrado e validado, a pesquisa se centrou na análise de cada fenômeno formulado e implementado no modelo discreto de forma separada. A pergunta a ser respondida era: Qual o efeito destes fenômenos no solo? Como afetam sua compressibilidade, rigidez, resistência ao cisalhamento e comportamento volumétrico?

Para este estudo foram feitas simulações de ensaios de compressão edométrica e cisalhamento direto em amostras densas, muito densas, fofas e muito fofas, onde cada fenômeno implementado foi testado isoladamente.

- O estudo da *quebra de grãos* mostrou que:
 - A quebra de grãos induziu um aumento na compressibilidade e uma queda na tensão de virtual pré-adensamento do solo;
 - A intensidade de quebra sob cisalhamento acontece em função da magnitude da tensão vertical aplicada;
 - Estruturas abertas, onde os grãos têm um menor número de contatos, favorecem a quebra;
 - Em amostras fofas a quebra induz um colapso da estrutura e portanto leva a uma contração volumétrica adicional. Já em amostras densas a quebra está associada ao rearranjo das partículas, o que provoca uma dilatância adicional;
 - A quebra induz a uma envoltória de resistência não linear. A curvatura torna-se maior quanto menor seja a resistência dos grãos fracos, ou seja, quanto maior seja o número de quebras na amostra;
 - A taxa de quebras cresce exponencial com a tensão vertical aplicada, por isso para baixas tensões verticais há um ganho na resistência, mas para tensões elevadas há uma perda de resistência;
- O estudo da *cimentação de grãos* mostrou que:
 - A cimentação induz um acréscimo na tensão virtual de pré-adensamento que cresce de forma linear com a porcentagem de contatos cimentados;
 - A tensão virtual de pré-adensamento cresce com a resistência do cimento, mas não de forma linear e sim hiperbólica;

- O índice de compressão cresce linearmente com a porcentagem de contatos cimentados, pois a quebra maciça das ligações provoca um amolecimento abrupto no solo;
- As quebras de contatos cimentados sob cisalhamento ocorrem principalmente nos primeiros estágios do cisalhamento;
- A cimentação de grãos fornece ao solo uma maior rigidez inicial ao cisalhamento, cuja magnitude está associada à resistência do cimento;
- A cimentação de grãos induz um comportamento elástico até um pico definido de resistência;
- A quebra da cimentação ao atingir o pico é do tipo frágil, ao que segue uma queda abrupta na resistência ao cisalhamento;
- A cimentação de grãos provoca um maior comportamento dilatante em amostras densas. Em amostras fofas provoca dilatação ou contração em função da tensão vertical aplicada;
- A envoltória de pico dos solos cimentados é do tipo coesiva;
- A envoltórias tendem para a linha de estado crítico para elevados confinamentos, quando a cimentação é maciçamente destruída;
- O estudo da *forma dos grãos* mostrou que:
 - O fator de forma (afastamento da forma circular) induz um leve aumento na tensão virtual de pré-adensamento e o índice de compressão do solo;
 - O fator de forma induz um enrijecimento leve do solo;
 - O fator de forma provoca em um acréscimo da resistência de pico ao cisalhamento e uma maior tendência dilatante no solo. O efeito é mais marcante nas amostras densas;
- O estudo da *matriz argilosa* mostrou que:
 - A compressibilidade do solo cresce com a presença de uma matriz argilosa;
 - O aumento da compressibilidade depende da rigidez dos grumos argilosos;
 - A tensão de pré-adensamento cresce com a rigidez dos grumos argilosos;
 - A expansão de solos argilosos ativos sob umedecimento é do tipo hiperbólico no tempo, e sua magnitude é inversamente proporcional à tensão vertical aplicada;

- A matriz argilosa induz uma perda na rigidez inicial sob cisalhamento assim como uma perda de resistência máxima, a qual é alcançada para grandes deslocamentos;
- As deformações volumétricas do solo argiloso variam de francamente contrativas para dilatantes em função da rigidez da matriz argilosa;
- A deformabilidade da matriz argilosa impede o acúmulo de tensões em pontos rígidos, o que inibe a formação de um pico de resistência;
- O estudo da *condição não saturada* mostrou que:
 - A condição não saturada diminui a compressibilidade do solo com a sucção, pela resistência que exercem os meniscos ao movimento relativo dos grãos;
 - A condição não saturada induz um acréscimo na tensão virtual de pré-adensamento com a sucção motivado pela rigidez adicional fornecida pelos meniscos de água;
 - A sucção produz uma maior rigidez no solo contra o cisalhamento;
 - A resistência ao cisalhamento cresce com a sucção seguindo uma lei hiperbólica;
 - A sucção produz uma maior tendência dilatante no solo, especialmente em amostras densas;
 - Os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb c' e ϕ' crescem hiperbolicamente com a sucção, e o ângulo ϕ_b decresce abruptamente com a sucção até valores próximos de zero;
 - A envoltória do solo não saturado é não linear;
- O estudo da *condição não saturada* junto com a *matriz argilosa* mostrou que:
 - A compressibilidade do solo argiloso não saturado é governada pela não saturação para baixas tensões, e a matriz argilosa passa a controlá-la na medida que as tensões aumentam;
 - A matriz argilosa suaviza os ganhos na resistência e rigidez provocados pela sucção aplicada;
 - A matriz argilosa suaviza os a tendência dilatante provocada pela sucção aplicada;

Pergunta 6: Qual o efeito da combinação destas características na resposta mecânica de solos residuais a partir da modelagem discreta ?

Para completar a pesquisa foram estudados estes fenômenos de forma combinada, a fim de responder as perguntas: Qual o efeito combinado destes fenômenos? Qual a influência de um efeito sobre os outros? A combinação destes efeitos reproduz a resposta dos solos residuais?

Para encarar esta última etapa da pesquisa foi feito o levantamento do comportamento laboratorial observado em solos residuais, os quais se classificaram em dois grandes grupos: os solos residuais jovens e os maduros.

A simulação destes comportamentos observados se deu a partir da montagem de amostras segundo a combinação criteriosa dos diferentes fenômenos antes estudados.

- Sobre os *solos residuais jovens* a pesquisa mostrou:
 - Dadas as características porosas destes solos, a elevada rigidez inicial, a tendência dilatante e o comportamento de pico na resistência, quando existente, deve-se a presença de cimentação de grãos. A intensidade deste efeito depende da intensidade da cimentação e da resistência do cimento;
 - A cimentação de grãos induz uma maior quebra de grãos;
 - A matriz argilosa tende a inibir a quebra da cimentação e dos grãos fracos;
 - A matriz argilosa torna o solo mais compressível;
 - A presença de grãos muito fracos fomenta a desestruturação do solo e a quebra maciça da cimentação. Isto induz um pico de resistência seguido de amolecimento devido a desestruturação. A presença de uma matriz argilosa neste solo poroso faz com que este comportamento se dê combinado com uma contração volumétrica, fato característico de alguns solos residuais.
- Sobre os *solos residuais maduros* a pesquisa mostrou:
 - A condição não saturada conjuntamente com a matriz argilosa controlam o comportamento do solo.
 - A elevada porosidade e a matriz argilosa pouco rija conferem ao solo comportamento contrátil;
 - A resistência é baixa e não há pico de resistência.

Pergunta 7: Quais os caminhos para dar continuidade a esta nova linha de pesquisa ?

O presente trabalho tem aberto uma nova trilha para a pesquisa do comportamento de solos empregando a análise micro-mecânica discreta. Sem dúvidas os assuntos abordados não foram esgotados, mas brevemente analisados, existindo ainda um vasto campo para o aprofundamento e extensão da investigação. A seguir apontam-se alguns tópicos que surgem como destacados para serem abordados em pesquisas posteriores sobre o tema.

- *Representação dos grãos.* A limitação da representação feita apenas por discos tem sido apontada como principal causal das discrepâncias entre modelo e realidade no que se refere ao valor do ângulo de atrito. A inclusão de elementos com novas geometrias é um passo vital para melhorar este aspecto. Isto, porém, não deveria atentar conta a eficiência computacional do programa.

- *Algoritmo de cálculo numérico.* O algoritmo de relaxação dinâmica deve ser analisado e otimizado, especialmente no cálculo do amortecimento a fim de minimizar o sub-amortecimento.

- *Eficiência do programa.* As rotinas de gerenciamento dos contatos e o acesso aos dados devem ser otimizados, a fim de tornar o cálculo mais rápido.

- *Geração dos domínios.* A geração dos domínios para análise deve ser otimizada mediante a inclusão de métodos de população de domínios mais eficientes.

- *Campanha de ensaios.* A campanha de ensaios pode ser aprofundada, inclusive incluindo outros ensaios como o triaxial, para o qual seria necessário implementar um elemento parede especial para a simulação da membrana flexível;

- *Modelagem 3D.* O programa pode ser estendido para a modelagem 3D, o que acrescentaria sua capacidade de modelagem. Todos os fenômenos implementados para o caso 2D podem ser estendidos para o caso 3D sem maiores dificuldades. O ponto mais trabalhoso seria a troca de sistema gráfico do programa aplicativo, a fim de conseguir a visualização 3D dos modelos discretos.

- *Simulação de problemas geotécnicos.* As mais variadas aplicações podem ser feitas para o estudo de problemas geotécnicos. A limitação está relacionada com os tempos envolvidos nas análises.