

8 Conclusões e sugestões

Como fruto do trabalho realizado na pesquisa bibliográfica, análise teórico-comparativa e implementação prática de modelos constitutivos para solos, são apresentadas neste capítulo, ordenadamente, as conclusões gerais e particulares obtidas. Para facilitar a compreensão do leitor e possibilitar o estabelecimento de comparações, as conclusões gerais foram agrupadas por tipo de formulação e apresentadas sob forma de tabela. Visto que alguns destes modelos foram analisados com maior detalhe nesta dissertação, conclusões particulares também foram acrescentadas sempre que possível ou desejável.

Finalmente, são sugeridas algumas linhas de ação para aprofundar e estender o presente trabalho sobre modelagem constitutiva para solos, com ênfase em solos não saturados.

8.1 Conclusões sobre os modelos para solos saturados ou secos

Conclusões gerais. As tabelas 8.1, 8.2 e 8.3 listam as principais características e as principais vantagens e desvantagens de cada um destes modelos quando utilizados para representar o comportamento mecânico de solos saturados ou secos.

Tabela 8.1: Conclusões gerais sobre os modelos constitutivos elásticos, hipoeásticos e quase-lineares.

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESvantagens
<i>Elástico Linear</i>	Lei de Hooke generalizada.	Matriz constitutiva constante. Utiliza dois parâmetros (solos isotrópicos). Conservativo. Comportamento não acoplado em isotropia. Independente da trajetória de tensões.	Amplamente conhecido e utilizado. Facilidade de implementação com baixo esforço computacional. Útil para representar solos sob descarregamento.	Representa limitadamente o comportamento de solos, pois não considera deformações permanentes e a dependência da trajetória de tensões.
<i>Elástico Não Linear</i>	Formulação de Cauchy.	Definido para diferentes graus de não linearidade (seis parâmetros para modelo do segundo grau). Comportamento acoplado. Apresenta anisotropia induzida pelo estado de tensão.	Pode representar adequadamente o solo durante carregamento monotônico ou proporcional. Capacidade de prever o fenômeno da dilatância.	Independente da trajetória de tensão. Não considera deformações permanentes. Matriz não simétrica. Parâmetros sem sentido físico.

<i>Hiperelástico</i>	Formulação de Green.	Derivado de considerações energéticas. Constitui um caso particular do modelo elástico não linear de Cauchy, sendo conservativo por definição.	As mesmas do modelo elástico não linear de Cauchy. Matriz simétrica, com menos parâmetros do que os modelos de Cauchy de mesma ordem.	Similares às do modelo elástico não linear de Cauchy.
<i>Hipoelástico</i>	Incrementalmente elástico globalmente plástico.	Definido para diferentes graus (sete parâmetros para o modelo de primeiro grau). Relação constitutiva incremental dependente do estado de tensão. Anisotropia induzida na formulação não linear. Comportamento acoplado.	Pode reproduzir carregamentos com endurecimento / amolecimento e descarregamento elástico. Leva em conta o nível de tensão na resposta do solo e prevê comportamento dilatante.	Sem critério claro para distinção entre estados de carregamento e descarregamento. Elevado número de parâmetros para ajustar, sem sentido físico. Matriz constitutiva não simétrica. Grande esforço computacional.
<i>Bi-Linear</i>	Elástico linear com limite de escoamento.	Inclui critério de escoamento. Módulo K crescente com a tensão de confinamento. Módulo G decai para valor quase nulo no escoamento de materiais perfeitamente plásticos. Utiliza 4 parâmetros.	Consegue simular rigidez dependente da tensão de confinamento. Parâmetros de rápida obtenção. Fácil de implementar, resolução numérica simples.	Prevê uma descontinuidade abrupta na curva de resposta do solo entre as fases elástica e plástica. Considera a mesma rigidez para casos de carregamento e de descarregamento.
<i>K-G</i>	Incrementalmente elástico, globalmente não linear com limite de escoamento.	Lei de Hooke incremental. Inclui o efeito não linear através da atualização dos parâmetros K e G . Comportamento acoplado. Inclui critério de escoamento e necessita de 7 parâmetros do material.	Simula o comportamento não linear do solo, com rigidez dependente da tensão de confinamento e da trajetória de tensão. Parâmetros de fácil obtenção, com sentido físico.	O modelo não simula amolecimento plástico. Pode violar a condição de continuidade para carregamentos neutros.
<i>Hiperbólico</i>	Incrementalmente elástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb.	Relação tensão de desvio-deformação axial hiperbólica. Inclui o efeito não linear na definição dos parâmetros. Assume critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Permite variação de f com a tensão de confinamento. Utiliza nove parâmetros (modelo completo).	Representa adequadamente o comportamento sob trajetórias de ensaios CTC. Modela rigidez dependente da tensão de confinamento, com diferentes valores para carregamento e descarregamento. Parâmetros fáceis de ajustar, com sentido físico.	Modelo baseado na trajetória do ensaio CTC, sendo aplicável a problemas onde predominem tais trajetórias de tensão. Não consegue simular o fenômeno de amolecimento na fase pós-pico, nem o efeito de dilatância em solos.
<i>EC-K₀</i>	Incrementalmente linear, globalmente não linear.	Baseado no ensaio de compressão confinada (oedométrico). Assume relação tensão-deformação axial parabólica e coeficiente K_0 variável. Utiliza quatro parâmetros.	Representação do solo sob compressão confinada. Indicado para modelar carregamentos sob restrição de deformação lateral. Parâmetros fáceis de ajustar.	Modelo baseado na trajetória de tensão do ensaio oedométrico. Não aconselhável para descrever trajetórias que se afastam da compressão confinada.

Tabela 8.2: Conclusões gerais sobre modelos constitutivos elasto-plásticos básicos.

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<i>Mohr-Coulomb</i>	Elasto-perfeitamente plástico.	Critério de escoamento incorpora dependência da tensão esférica, com diferentes respostas para compressão e extensão. Modelo básico (4 parâmetros) pode ser ampliado para controlar a dilatância (fluxo não associado) e simular endurecimento-amolecimento plásticos.	Critério de escoamento formulado com base no comportamento experimental de materiais com atrito interno. Parâmetros de fácil obtenção e com pleno sentido físico. O modelo completo consegue controlar a dilatância, assim como simular comportamento de pico e residual.	Dilatância excessiva sob fluxo associado. Critério de ruptura não contempla o efeito da tensão intermediária e apresenta pontos angulosos no plano octaédrico, o que pode dificultar sua implementação computacional.
<i>Drucker-Prager</i>	Elasto-perfeitamente plástico.	Critério de escoamento incorpora dependência da tensão esférica, mas prevê a mesma resposta para compressão e extensão. Modelo básico (4 parâmetros) pode ser ampliado para controlar a dilatância (fluxo não associado) e simular endurecimento-amolecimento plásticos.	Parâmetros de fácil obtenção e com sentido físico. Critério de escoamento contínuo. Fácil implementação computacional. Modelo completo consegue controlar a dilatância, assim como simular comportamento de pico e residual.	Dilatância excessiva sob fluxo associado. Critério de ruptura não contempla a resposta diferenciada do solo em compressão e extensão.
<i>Generalizado</i>	Elasto-perfeitamente plástico ou com endurecimento-amolecimento plásticos.	Formulação generalizada de critérios de ruptura. Inclui efeito da tensão intermediária, simula endurecimento e amolecimento plásticos.	Formulação atraente por permitir implementar vários critérios de ruptura num só modelo: von Mises, Drucker-Prager e Mohr-Coulomb. Critério de escoamento contínuo.	Maior esforço de implementação, compensado com a possibilidade de contar com vários critérios no programa computacional. Desvantagens próprias dos critérios de ruptura incorporados.
<i>HSM</i>	Elasto-plástico com 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, desacopladas, controle de dilatância.	Formulação simples, baseada em modelo amplamente conhecido e utilizado (modelo hiperbólico) incluindo aperfeiçoamentos teóricos. Inclui controle de dilatância e superfície <i>cap</i> de endurecimento. Parâmetros (8 a 10) de fácil obtenção com sentido físico.	Limitações próprias do modelo hiperbólico. Comportamento baseado na trajetória do ensaio CTC. Não inclui amolecimento plástico. Definição pouco clara dos parâmetros da superfície <i>cap</i> .

<i>Cam Clay Modificado</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento.	Baseado na teoria do estado crítico. Formulação para o plano triaxial e estendida para o espaço das tensões principais. Assume superfície de escoamento elípticas com lei de fluxo associada. Linha de estado crítico define resistência dos solos.	Inclui os principais aspectos de comportamento de argilas pré-adensadas (amolecimento e dilatância) e normalmente adensadas (endurecimento e contração) e conceitos de estado crítico. Parâmetros (5) de fácil obtenção e com sentido físico.	Superestima resistência de solos pré-adensados, assim como a dilatância, necessitando da introdução de correções. Não representa adequadamente solos adensados na condição K_0 .
<i>Modelo Cap</i>	Elasto-plástico com endurecimento.	Modelo de estado crítico, formulado para estados tridimensionais de tensões. Incorpora uma superfície <i>cap</i> móvel e outra de ruptura fixa. Fluxo plástico associado. Utiliza 8 parâmetros.	Superfície de ruptura pode ser combinação dos critérios clássicos como von Mises, Drucker-Prager ou Mohr-Coulomb, buscando a melhor representação do comportamento do solo sob baixos e altos níveis de tensão.	Limitações próprias dos critérios de ruptura adotados. Não consegue reproduzir amolecimento plástico. Representa adequadamente apenas algumas trajetórias de tensão.

Tabela 8.3: Conclusões gerais sobre modelos constitutivos elasto-plásticos avançados.

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<i>Lade-Kim</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento isotrópicos.	Formulação tridimensional, desenvolvida para materiais com atrito interno. Adota uma 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. Utiliza 12 parâmetros.	Formulado a partir de resultados experimentais em areias e estendido para materiais coesivos, rochas, concreto, etc. Critério de ruptura diferencia resistência do solo sob compressão e extensão, sem pontos singulares. Assume potencial plástico para representar de forma ajustada o fluxo plástico.	Modelo altamente não linear, de implementação relativamente difícil. Elevado número de parâmetros, sem sentido físico. Formulação simples na representação do amolecimento, com passagem brusca sem transição, prevendo queda assintótica da resistência para valor nulo.
<i>Hierárquico</i>	Elasto-plástico com 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. Usa de 8 a 9 parâmetros.	Formulação versátil para a representação dos diferentes tipos de solos em várias versões do modelo.	Parâmetros de difícil ajuste. Requer experiência para escolha da função de endurecimento apropriada. Formulação pouco clara da modelagem do amolecimento plástico.

<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 e utiliza 8 parâmetros.	Formulado para casos 2D e 3D a partir de conceitos básicos da mecânica dos solos. Consegue uma boa representação para solos granulares. Critério de ruptura diferencia resistência do solo sob compressão e extensão, sem pontos singulares.	Não reproduz amolecimento plástico e não contempla resistência coesiva de solos. Não inclui superfície <i>cap</i> para estimativa das deformações plásticas causadas por carregamentos isotrópicos.
<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. Pode apresentar anisotropia induzida pelo estado de tensões.	Reproduz deformações plásticas geradas durante carregamentos cíclicos. Formulações para os casos drenado (fluxo não associado) e não drenado (fluxo associado). Incorpora anisotropia do material.	Formulação de difícil implementação computacional (define n superfícies). Não reproduz amolecimento plástico. Parâmetros sem sentido físico, difícil ajuste do modelo.
<i>Superfície limite</i>	Elasto-plástico com 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. Pode incluir elasticidade histerética, e amolecimento plástico. Utiliza quinze parâmetros.	Formulação mais simplificada do que o modelo de superfícies aninhadas. Simula carregamentos cíclicos e permite anisotropia do solo. Critério de ruptura anisotrópico. Modela o comportamento elástico histerético de argilas pré-adensadas, assim como amolecimento plástico.	Formulação complexa e de difícil implementação computacional. Altamente não-linear. Assume descarregamento elástico, restringindo acoplamento entre deformações esféricas e de desvio. Utiliza 15 parâmetros de difícil ajuste, sem sentido físico.
<i>Tipo 'Bolha'</i>	Elasto-plástico com 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> .	Apresenta as vantagens do modelo Cam Clay Modificado, simulando também carregamentos cíclicos com descarregamento elastoplástico. Utiliza sete parâmetros de fácil obtenção, com sentido físico.	Formulação para estados triaxiais, com as limitações próprias do critério assumido para a sua generalização no caso 3D. Limitações próprias do modelo Cam Clay Modificado.
<i>Teoria DSC</i>	Teoria do Estado Perturbado.	Representa o solo como composto por duas fases ou estados de referência (inicial ou intacto e final ou crítico) que influem no comportamento do solo, ponderados por uma função de perturbação D para a descrição do estado atual	Cada estado pode ser definido por um modelo constitutivo diferente. Permite a simulação de vários fenômenos: endurecimento, amolecimento, influência da tensão de confinamento. Função D pode ser imposta e ajustada sem restrições.	Difícil implementação numérica, pois necessita de duas matrizes constitutivas (podem ser reduzidas a uma só, porém com perda no alcance da modelagem). Grande trabalho para o ajuste dos parâmetros do material. Escassa experiência na sua utilização.

<i>Hipoplástico</i>	Teoria da hipoplasticidade.	Formulação simples, baseada na teoria da hipoplasticidade. Utiliza uma única equação válida para situações de carregamento e de descarregamento (a mesma equação é capaz de efetuar a distinção entre ambas as condições).	Simples, pois não necessita das definições e conceitos da teoria da plasticidade. Boa capacidade de previsão dos aspectos básicos da resposta mecânica de solos. Emprega apenas 4 parâmetros de fácil obtenção. Previsão da dilatância de solos.	Não consegue simular ciclos de carregamento e comportamento de solos altamente pré-adensados. Parâmetros determinados com base em ensaios CTC. Formulação mais complexa para representar amolecimento plástico.
---------------------	-----------------------------	--	--	---

Conclusões particulares. Dos modelos para solos saturados ou secos acima apresentados, foram implementados e utilizados na retroanálise de resultados de ensaios de laboratório os seguintes modelos: hiperbólico, Mohr-Coulomb com amolecimento, HSM – *Hard Soil Modeling*, Lade-Kim e hierárquico (HiSS). Em relação aos mesmos, as seguintes conclusões particulares podem ser apresentadas:

- **Modelo Hiperbólico**

- a) Orientado para modelagem de areias fofas e argilas moles que não apresentam comportamento dilatante ou tendência de amolecimento plástico, pois o modelo hiperbólico não consegue representar o fenômeno de perda de resistência pós-pico ou deformações volumétricas negativas (expansão).
- b) Tanto melhor a simulação de relações tensão x deformação quanto mais próxima estiverem as trajetórias de tensão da gerada pelo ensaio triaxial convencional CTC.

- **Modelo Mohr-Coulomb com amolecimento plástico**

A modificação dos parâmetros do critério de ruptura em função da trajetória das deformações de desvio, assim como a adoção de uma lei de fluxo não associada que permite melhor controlar a previsão de dilatância do material, tornam o tradicional modelo gotécnico bastante mais atraente, poderoso e competitivo para aplicações avançadas de geomecânica.

- **Modelo HSM.**

Representa de forma adequada a resistência e a rigidez do solo, incorporando em sua formulação matemática o critério de ruptura de Mohr-Coulomb e a dependência dos módulos de deformabilidade em relação às tensões de

confinamento. O modelo, entretanto, não simula situações de amolecimento plástico.

- **Modelo Lade-Kim.**

a) O modelo de Lade-Kim oferece uma boa representação do comportamento de solos granulares e coesivos, bem como de outros materiais com atrito interno (rocha, concreto, etc), incorporando em seu desenvolvimento o escoamento plástico contínuo, amolecimento pós-pico, dilatância decrescente com a tensão de confinamento, lei de fluxo não associada, etc. No estado de arte atual, trata-se do modelo mais completo e versátil para aplicações em problemas de geomecânica.

b) O fenômeno de amolecimento plástico é introduzido de uma maneira simples, fornecendo uma descrição do fenômeno apenas aceitável.

- **Modelo hierárquico (HiSS)**

a) O modelo HiSS consegue representar de forma satisfatória o comportamento mecânico de solos, incluindo a dependência dos módulos de deformabilidade em relação às tensões de confinamento. Possui várias versões com fluxo associado, fluxo não associado, etc. selecionada pelo engenheiro em função das características do problema a analisar e do conhecimento dos parâmetros do modelo, que crescem em número e dificuldade de obtenção à medida que as versões se tornam mais avançadas.

b) O modelo HiSS- δ_1 apresentou algumas dificuldades na definição dos parâmetros, em especial naqueles relacionados com a função de endurecimento α , devido à dispersão verificada nos resultados dos ensaios disponíveis, como também pela grande sensibilidade do desempenho do modelo em relação a pequenas variações nos valores desses parâmetros.

8.2

Conclusões sobre os modelos para solos não saturados e estruturados

Conclusões gerais. A tabelas 8.4 lista as principais características e as principais vantagens e desvantagens de cada um dos modelos analisados nesta dissertação para representar o comportamento mecânico de solos não saturados e estruturados.

Tabela 8.4: Conclusões gerais sobre modelos para solos não saturados e estruturados.

MODELO	TIPO	CARACTERÍSTICAS	VANTAGENS	DESVANTAGENS
<i>HSM modificado</i>	Elasto-plástico com endurecimento	Considera os efeitos da sucção diretamente nos parâmetros do solo, definidos como dependentes do nível de sucção. Utiliza de 8 a 10 parâmetros.	Modelo HSM disponível no programa comercial Plaxis. Análises aproximadas de casos que não apresentam colapso ou expansão.	Não se trata de um modelo para solos não saturados. Não reproduz deformações devidas a variações na sucção (colapso ou expansão).
<i>Barcelona</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento	Baseado no modelo Cam clay Modificado (coincide no caso saturado), incluindo a sucção como uma segunda variável de tensão do modelo. Superfície de escoamento adicional para variações de sucção. Utiliza 10 parâmetros, de fácil obtenção.	Formulação desenvolvida para solos não saturados. Simula deformações por variações na sucção, colapso, expansão e o aumento de resistência com a sucção. Dilatância.	Não reproduz fenômenos de colapso em grande escala (solos metaestáveis) ou a variação de volume de solos altamente expansivos. Limitações próprias do modelo Cam Clay Modificado.
<i>Modelo HiSS-DSC</i>	Aplicação da teoria do estado perturbado associada ao modelo hierárquico	Teoria DSC é usada para modelar a influência da sucção, através da função de perturbação D . O modelo HiSS modela os estados RI (alta sucção) e FA (saturado).	Os estados de referência são bem reproduzidos pelo modelo HiSS. Modelagem ajustada da influência da sucção.	Útil para análises com sucção constante. Não simula deformações devidas a variações de sucção (colapso ou expansão).
<i>Hierárquico modificado</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento	Modelo HiSS que considera os efeitos da sucção diretamente nos valores dos parâmetros do solo, definidos como dependentes do nível de sucção. Utiliza de 8 a 10 parâmetros.	Implementação computacional mais simples do que no modelo HiSS-DSC.	Útil para análises com sucção constante. Não simula deformações devidas a variações na sucção (colapso ou expansão). Dificuldades no ajuste dos parâmetros.
<i>Cam Clay Estruturado</i>	Elasto-plástico com endurecimento e amolecimento	Baseado no modelo Cam Clay modificado, incluindo colapso dos solos estruturados. Simula amolecimento com deformação volumétrica de contração. Utiliza 8 parâmetros.	Modela efeito da cimentação e da estrutura do solo. Consegue reproduzir o processo de desestruturação (colapso) sob carregamento. Parâmetros de fácil obtenção.	Comportamento elástico assumido independente da estrutura. Não considera anisotropia do solo remoldado nem da estrutura. Limitações próprias do modelo Cam Clay Modificado.

<i>Teoria DSC para solos estruturados</i>	Aplicação da teoria do estado perturbado	Define o solo estruturado como RI, o solo remoldado como FA, modelando a desestruturação pela função de perturbação D .	A função de perturbação consegue reproduzir de forma ajustada o processo. Distintos modelos podem ser usados para representar o solo estruturado inicial e o remoldado final.	Dificuldades próprias da implementação da teoria DSC. Sem experiência suficiente na aplicação da teoria até a presente data.
---	--	---	---	--

Conclusões particulares. Dos modelos para solos não saturados e estruturados acima apresentados, foram implementados e utilizados na retroanálise de resultados de ensaios de laboratório os seguintes modelos: HSM Modificado, Barcelona, Modelo HiSS-DSC e Hierárquico δ_1 Modificado. Em relação aos mesmos, as seguintes conclusões particulares podem ser apresentadas:

- **Modelo HSM modificado.**

- a) O modelo HSM Modificado consegue simular de maneira apenas aceitável a resposta dos solos não saturados, com maior precisão na previsão do aumento da resistência com a sucção do que nas deformações volumétricas (somente o sinal e a ordem de magnitude destas deformações foram computados).
- b) O modelo HSM Modificado é uma opção para abordagem preliminar de problemas geotécnicos envolvendo solos não saturados e residuais quando programas computacionais que incorporem modelos específicos para solos não saturados não forem disponíveis ou muito difíceis de serem implementados.

- **Modelo Barcelona.**

- a) Consegue reproduzir com precisão satisfatória o comportamento de solos não saturados, nos aspectos tensão x deformação x resistência.
- b) O crescimento na resistência mecânica com a sucção do solo é simulado sem dificuldades. Também a tendência à expansão do solo (deformações volumétricas negativas) sob baixas tensões de confinamento foi corretamente captada pelo modelo.
- c) A falta de precisão observada em algumas simulações do comportamento volumétrico nos exemplos examinados nesta dissertação sugere a necessidade de redefinição do parâmetro de não associatividade e do módulo de cisalhamento,

assumidos constantes, mas que deveriam ser considerados dependentes da sucção e do estado de tensão.

d) Os parâmetros do modelo foram determinados sem dificuldades a partir dos resultados dos ensaios convencionais de laboratório disponíveis.

e) O modelo Barcelona contempla o comportamento hídrico do solo, i.e., simula a resposta de deformações do solo para variações de sucção (parâmetros I_s e k_s), o que não acontece nas demais formulações.

- **Modelo HiSS-DSC**

a) O modelo HiSS utilizado em conjunto com a teoria DSC consegue representar satisfatoriamente o comportamento de solos não saturados. Em todos os casos estudados, as respostas previstas pelo modelo se aproximaram satisfatoriamente daquelas obtidas experimentalmente em ensaios de laboratório.

b) O modelo HiSS e suas diferentes versões constituem-se em ferramenta versátil e bastante completa para modelagem dos solos, oferecendo alternativas para simulação do endurecimento plástico, leis de fluxo, etc.

c) A obtenção dos parâmetros do modelo HiSS requer apenas a execução de ensaios convencionais de laboratório. No entanto, tais parâmetros podem não ser constantes, mas dependentes do estado de tensão, o que dificulta a definição do modelo. Em especial, os parâmetros de endurecimento nos exemplos analisados apresentaram grande variabilidade e dificuldade na sua determinação. O modelo, adicionalmente, mostrou-se sensível a pequenas variações na função de endurecimento a .

d) A teoria DSC, através da introdução da função de perturbação D , conseguiu representar os fenômenos de aumento de resistência e do comportamento dilatante dos solos com a sucção, bem como a ocorrência de amolecimento plástico dependente das tensões de confinamento. A escolha da função D oferece a possibilidade das previsões de comportamento serem obtidas com boa precisão, mas o trabalho envolvido neste processo pode ser muito grande.

e) Em aplicações numéricas, a teoria DSC introduz a necessidade de resolução de duas matrizes constitutivas, correspondentes aos estados RI e FA, para cada incremento de carregamento, o que significa uma duplicação do esforço computacional exigido nos demais modelos. Para reduzir o sistema a uma única

matriz, podem ser assumidas hipóteses de comportamento mecânico que vinculem ambos os estados, bem como considerar o estado FA representado por um modelo do estado crítico (cisalhamento sem deformações volumétricas).

- **Modelo Hierárquico d_1 Modificado.**

- a) O modelo HiSS- δ_1 Modificado produziu simulações precisas, com o mesmo nível de precisão que o modelo BBM, tanto nos aspectos de resistência quanto nas deformações volumétricas.
- b) Considerar a influência da sucção na definição de cada parâmetro é uma possibilidade mais rápida e flexível do que procurar definir uma função de perturbação de caráter geral.

8.3

Sugestões para pesquisas futuras

A presente pesquisa sobre modelagem constitutiva para solos procurou ser o mais abrangente e profunda possível, tanto na análise comparativa das formulações para solos saturados, quanto na avaliação das alternativas disponíveis para representação do comportamento mecânico de solos não saturados.

Vários aspectos vinculados ao tema desta dissertação não puderam ser convenientemente abordados, ficando aqui com sugestões para pesquisas futuras na área de modelagem constitutiva de solos:

- **Teoria do Estado Perturbado DSC** - Esta nova e interessante teoria foi apresentada de forma resumida e implementada de forma básica na modelagem do comportamento de dois solos residuais não saturados. Os bons resultados obtidos são, no entanto, insuficientes para avaliar a capacidade e potencial de aplicação dos conceitos DSC como modelo alternativo, necessitando de pesquisas mais aprofundadas que incluam implementações numéricas pelo método dos elementos finitos para análise de problema geomecânicos, bem como a adoção de diferentes modelos para representação dos estados RI e FA e outras formulações para definição da função de perturbação D.

- **Modelo Hierárquico** - Este poderoso e versátil modelo foi analisado e utilizado com sucesso na modelagem do comportamento de solos nas condições saturada e parcialmente saturada. Um estudo mais detalhado da sua implementação numérica para utilização na resolução de problemas de valor no contorno pelo método dos elementos finitos é sugerido e recomendado.
- **Solos estruturados** - Na revisão bibliográfica efetuada nesta pesquisa alguns modelos recentes para solos estruturados não foram suficientemente estudados, como as propostas de Gens & Nova (1993), Kavvadas & Amorosi (2000) e Rouainia & Muir Wood (2000), dentre outros. Sugere-se uma investigação mais detalhada do potencial de cada um destes modelos, incluindo a retroanálise de ensaios de laboratório de solos residuais e estruturados, se disponíveis.