

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1. Conclusões

Neste trabalho foi realizado o desenvolvimento e a implementação de algoritmos em conjunto com o programa GEOLIMA (Carrión, 2004) para realizar a Análise Limite de problemas de grande porte. Otimizadores comerciais como LINGO, MINOS foram também utilizadas na pesquisa para efeitos de comparação com os resultados obtidos com o otimizador desenvolvido.

Da pesquisa e dos testes realizados com os otimizadores comerciais, conclui-se que o otimizador LINGO pode ser usado somente para resolver problemas da Análise Limite de pequena escala e o otimizador MINOS pode ser usado para resolver problemas de até média escala.

O resultados de testes realizados com os programas LINGO e MINOS indicam que o tempo de otimização aumenta exponencialmente com o incremento de número de elementos da malha, tornando inviável seu uso para a solução de problemas de grande escala.

Dos testes realizados conclui-se que o fator de colapso diminui com o refinamento da malha (Figuras 3.29). Esta diminuição é não linear e bastante pronunciada até malhas com 150 elementos (aproximadamente) e logo a diminuição tem uma tendência quase linear suave. Pelo fato que a formulação implementada no presente trabalho é a formulação mista fraca, onde o campo de tensões não é estaticamente admissível (a não ser de forma aproximada) e a condição de equilíbrio é garantida pelo principio dos trabalhos virtuais, é de se esperar que o fator de colapso se aproxime pelo limite superior ao fator de colapso real com o refinamento da malha.

Pelo fato de os otimizadores comerciais pesquisados não apresentarem bom desempenho para resolver problemas da Análise Limite de grande escala, neste trabalho foi implementado um otimizador específico para problemas da Análise Limite, baseado no método de pontos interiores. O método de pontos interiores

pode ser aplicado para resolver problemas de otimização em geral, mas o otimizador implementado neste trabalho é específico para resolver problemas da Análise Limite.

Com o objetivo de melhorar a eficiência do otimizador implementado, foram implementadas e testadas diferentes alternativas ou técnicas descritas na literatura pesquisada e algumas alternativas são propostas neste trabalho para a melhora da eficiência do otimizador implementado.

Na literatura pesquisada, foram encontrados dois algoritmos de pontos interiores, o primeiro baseado em cálculo de ângulo de deflexão, e que precisa resolver duas vezes o sistema de equações lineares para cada iteração e o segundo, baseado no cálculo de fatores de relaxação e contração. Este segundo algoritmo precisa resolver uma só vez o sistema de equações lineares mas se torna ineficiente por que a convergência é alcançada em maior número de iterações. Neste trabalho foi proposto e implementado um terceiro algoritmo, onde o sistema de equações lineares é resolvido uma só vez e a direção de busca viável é calculada por álgebra vetorial. Testes realizados com os três algoritmos mostram que o algoritmo proposto fornece valores de fator de colapso ligeiramente menores, mas que tem um ganho em desempenho (tempo de otimização).

Um ponto crítico encontrado na implementação do otimizador foi a solução de sistemas lineares em cada iteração. Na literatura pesquisada foram encontradas duas formas de manipular e resolver o sistema de equações resultantes. A primeira é uma manipulação matricial global e a segunda uma manipulação matricial por elementos. Neste trabalho propõe-se a solução direta sem manipulação de sistema de equações lineares. Dos testes realizados (Tabela 3.8 e Figuras 3.18 e 3.19) conclui-se que a solução direta com tratamento da matriz esparsa proposta neste trabalho é muito mais eficiente tanto em uso de memória quanto em desempenho em termos de tempo.

Para a solução de sistemas lineares foram implementados diferentes métodos diretos e indiretos. Dentre os métodos testados, o dos gradientes conjugados (CG) com tratamento da matriz esparsa e uso de pré-condicionador misto (DS+SS) foi o mais eficiente.

Para melhorar a eficiência na solução de sistemas lineares, foram implementados e testados os seguintes pré-condicionadores encontrados na literatura, escala diagonal (DS), escala simétrica (SS) e fatoração incompleta de

Cholesky (ICF). Neste trabalho propõe-se também o uso de pré-condicionadores mistos DS+SS e DS+FIC. Dos testes realizados conclui-se que o pré-condicionador misto proposto DS+SS teve melhor desempenho.

Da comparação dos testes realizados em problema 2D, onde o problema é resolvido usando otimizadores Lingo, Minos e Geolima com otimizador próprio, conclui-se que o otimizador implementado faz melhor uso da memória como também tem melhor desempenho em termos de tempo e o mais importante e que o diferencia dos outros otimizadores é que o desempenho de GEOLIMA cresce quase linearmente com o refinamento da malha.

Com o objetivo de validar e comparar a eficiência do otimizador implementado, um problema 3D de frente de escavação de túneis é analisado. Este problema tem seu comportamento conhecido a partir de uma simulação com um modelo físico 3D em escala reduzida feito no Laboratório da Mitsubishi em Japão e também da análise com o otimizador Minos apresentado em Carrión (2004). O fator de colapso obtido com o otimizador Mino foi  $\alpha = 25.012$  e com o otimizador implementado foi  $\alpha = 24.6685$ . O tempo empregado por Minos foi de 16 horas 43 min. e com o otimizador implementado foi de 17 min 49 seg. O mecanismo de colapso obtido foi semelhante aquele obtido com Minos e muito similar aquele obtido no modelo físico.

Propriedades de solo são obtidas mediante ensaios de campo ou de laboratório, incertezas de diferente origem estão presentes nas propriedades dos materiais assim obtidas. Assim, torna-se relevante a incorporação de estudos de confiabilidade na análise de estruturas geotécnicas.

Existem vários métodos para avaliar a confiabilidade, mas a grande maioria é desenvolvida para funções de falha lineares e considerando simplesmente uma distribuição normal para as variáveis aleatórias. Neste trabalho, tentou-se aplicar o método FORM (First Order Reliability Method) cuja formulação considera uma função de falha qualquer e distribuições quaisquer das variáveis aleatórias, mas resultados obtidos indicam que o método alcança a convergência em um número muito alto de iterações (maior que 200), o qual resulta em custo computacional maior ainda que o método de Monte Carlo, inviabilizando o uso deste método para o cálculo de confiabilidade com a Análise Limite.

Dos resultados da primeira aplicação (talude infinito homogêneo), conclui-se que o fator de colapso, o número de iterações e o tempo empregado pelo programa em resolver o problema variam com o tipo de material da estrutura. Além disso, zonas de plastificação, a localização e forma da superfície de ruptura e o mecanismo de colapso variam com tipo de material.

Dos resultados da segunda aplicação (talude infinito heterogêneo), conclui-se que o fator de colapso, número de iterações e o tempo requerido para a análise variam com o refinamento da malha. Sendo o refinamento da malha importante para identificar as zonas de plastificação e a superfície de ruptura.

Dos resultados da terceira análise (talude com percolação), pode-se concluir que a presença de percolação de água no talude influencia na redução de fator de colapso em um 23%, assim como o programa precisou de maior número de iterações para resolver o problema e por conseguinte maior tempo de análise também. E quanto às zonas de plastificação e superfície de falha, pode-se observar das figuras 5.12(a,b) e 5.13(a,b) que a presença da percolação faz que tanto as zonas de plastificação como a superfície de falha sejam mais superficiais.

Dos resultados da Análise Limite da barragem de terra(quarta aplicação), conclui-se que, no caso da análise 1, a estrutura entraria em colapso somente no caso em que o carregamento ( gravitacional ) fosse 2.46 vezes maior. No caso da análise 2, a estrutura entraria em colapso se a pressão da água for maior em 5.24 vezes, o que indica que a barragem projetada é bastante conservadora em relação à segurança.

Da quinta aplicação (talude confinado 3D) se pode concluir que, com o programa implementado pode-se resolver problemas com malhas suficientemente refinadas que geram problemas de otimização de grande escala, o qual já possibilita a aplicabilidade da Análise Limite na solução de problemas reais.

A sexta aplicação se refere à análise de um depósito de rejeito em 3D. Sendo o fator de colapso obtido para esta estrutura próximo a 1, não se pode afirmar que a estabilidade do depósito está garantida, porque, efeito de algum outro fenômeno como movimento sísmico na direção WE poderia desestabilizar o depósito de rejeito. Assim, é recomendável diminuir a inclinação de talude com a finalidade de garantir sua estabilidade para fins de abandono definitivo.

## 6.2. Sugestões para Futuras Pesquisas

A implementação da Análise Limite Numérica mediante processamento paralelo devem de ser considerados nas futuras pesquisas, para a análise de problemas de maior porte.

Refinamento da malha implica em custos computacionais na Análise Limite, nas futuras pesquisas devem-se implementar o refinamento automático da malha (autoadaptativo) nas zonas de maior plastificação.

Para garantir a estabilidade de estruturas geotécnicas são usadas reforços (como geosintéticos e ancoragens). Em trabalhos futuros deve-se considerar estes reforços na formulação de Análise Limite, assim como o uso de elementos de contato para a representação de meios fraturados.

Para modelar problemas com geometria complexa, em trabalhos futuros devem-se incorporar outros tipos de elementos finitos como triangulares em 2D e tetraédricos em 3D, assim como elementos de interface.

Exemplos de aplicação da Análise de Confiabilidade associada à Análise Limite mostram que o algoritmo de otimização HL-RF (Hasofer and Lind – Rackwitz and Fiessler) usado pelo método FORM, tem uma convergência pobre. Assim, devem-se considerar a implementação de algoritmos mais efetivos para a Análise de Confiabilidade pelo método FORM.

Um dos fatores para a uma convergência pobre do algoritmo HL-LR pode ser o cálculo aproximado da gradiente da função de falha por diferenças finitas, portanto, em pesquisas futuras devem-se considerar o uso de superfícies de resposta, geradas das soluções do problema pela Análise Limite. Outras técnicas como o uso de ponto de partida diferente das médias das variáveis devem de ser pesquisado, como o objetivo de acelerar a convergência.