

6

Conclusões e Sugestões

6.1. Análise determinística

Para a determinação do *FS*, deve-se ter em conta os diversos mecanismos de ruptura do solo, já que no caso do PLAXIS 2D nem sempre será necessário realizar uma análise de redução dos parâmetros de resistência para determinar a superfície potencial de ruptura, como visto no exemplo de aplicação N°3.

No caso de obras geotécnicas que considerem a construção incremental, deve-se levar em conta na simulação o efeito da modelagem incremental versus a modelagem considerando uma única etapa de construção, devido às diferenças notáveis em relação aos deslocamentos verticais como mostrado por Clough e Woodward (1967), assim como a quantidade de etapas de construção que possam ser consideradas, já que isto pode influenciar nos resultados obtidos (Clough e Woodward, 1967; Duncan, 1992).

Para o caso de simulações geotécnicas considerando a construção incremental (i.e., aterros ou escavações) a redistribuição das tensões em cada etapa de análise parece influenciar os valores do *FS*, que mostram pequenas variações com os obtidos pelo LEM, os quais são incapazes de diferenciar entre um aterro ou escavação, como detalhado nos exemplo de aplicação N°5 e N°6.

De acordo com o desenvolvimento desta dissertação, observaram-se outras diferenças entre a determinação do *FS* considerando o MEF e o MEL correspondente à inclusão de aspectos de resistência e deformabilidade (controlado principalmente pela anisotropia no solo) que o MEL não considera dentro da sua formulação.

Observou-se a sensibilidade do *FS* em relação à quantidade de elementos finitos considerados dentro da malha do modelo, encontrando que o maior refinamento da malha fornece variações consideráveis na determinação do *FS*, como visto no exemplo de aplicação N°5.

É importante considerar dentro da análise de estabilidade o efeito da anisotropia da resistência, por meio da determinação das zonas que se comportam sob os efeitos de extensão e compressão devido à rotação das tensões principais ao longo da superfície de ruptura (anisotropia induzida). Para determinar tal efeito, considera-se a razão de tensões iniciais ou coeficiente de repouso K_0 no solo, como mostrado na seguinte equação.

$$\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} < K_o : \text{Estado de compressão}$$

$$\frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} > K_o : \text{Estado de extensão}$$

O que indica que o solo passa a se comportar em compressão se esta razão de tensões efetivas passa a ser menor do que o K_o , caso contrário ele se comporta em extensão, Hwang *et al.* (2002). Assim para a determinação de tais efeitos foram consideradas as deformações em referência ao eixo x , o qual forneceu valores bastante próximos com a razão de tensões iniciais ou coeficiente de repouso.

Dos exemplos N°1, N°4 e N°6, observou-se que o processo de escavação conduzia a parte da superfície de ruptura para um estado de tensões de extensão no qual os decrementos da tensão vertical são mais significantes do que as tensões efetivas horizontais.

A razão da área de extensão em relação à superfície de ruptura total foi mostrada na Tabela 5.23 para o exemplo de escavação N°4, calculado por uma análise de regressão linear dos resultados, como mostra na seguinte relação:

$$\text{Área em extensão (\%)} = 48,53 - 0,48 (\text{ângulo do talude}^\circ)$$

A relação antes vista pode ser usada na determinação da área em extensão, esta resistência anisotrópica poderia ser incluída nas soluções de equilíbrio limite, o qual resultaria em um valor conservador para o FS que normalmente é baseado na resistência isotrópica. Por exemplo, para análises não drenadas de estabilidade de taludes em argilas saturadas o FS pode ser calculado como $FS = C_{uc} \cdot L_a \cdot r / W \cdot d$, onde C_{uc} é a resistência isotrópica à compressão, L_a é o comprimento da superfície de ruptura, r é o raio da superfície de ruptura, W é o peso da fatia do solo e d é o braço de alavanca do momento. Considerou-se que a superfície de ruptura é a correspondente para uma inclinação do talude de

1V:1H e associada para um dado FS . De acordo com a Tabela 5.23, tem-se que 27,1% da superfície de ruptura se comporta em extensão. A média representativa da resistência pode ser calculada como:

$$C_{ur} = \frac{C_{ue} \cdot L_{ae} + C_{uc} \cdot L_{ac}}{L_{ae} + L_{ac}} = \frac{C_{ue} \cdot 0,271L_a + C_{uc} \cdot 0,729L_a}{L_a}$$

Se for assumido que a resistência à extensão é 60% da resistência à compressão, a média da resistência será $C_{ur} = 0,892C_{uc}$, caso seja usado este valor para o cálculo do FS , este será de $0,892(FS)$ com uma redução de 10,8%.

Do exercício de aplicação N°4 verificou-se a variação insignificante na determinação das zonas em extensão da superfície de ruptura, quando são consideradas diversas sequências de escavação.

Com base nos resultados obtidos do exercício N°6, observa-se que a zona compreendida em extensão é quase nula, isto mostra concordância com os resultados obtidos por Chen (1975) e Al-Karni e Al-Shamrani (2000). Eles apontaram que o efeito da anisotropia é insignificante quando o ângulo de atrito interno do solo excede cerca dos 10 graus.

6.2. Análise probabilística

O número de iterações é um importante fator a ser considerado na escolha de um método probabilístico, já que a saída do processo de simulação é sensível ao número de iterações, como já visto nos exemplos de aplicação, considerando que a quantidade de saídas torna-se mais estável com um maior tempo computacional (e.g., método de Monte Carlo, método do Hipercubo Latino), sendo que o número ótimo de iterações dependerá das variáveis aleatórias de entrada e dos parâmetros de saída a serem estimados.

A metodologia utilizada nesta dissertação foi a de fazer uma série de simulações sempre que as variáveis de entrada sejam maiores do que dois, aumentando o número de iterações até encontrar a estabilização dos resultados, plotando o número de iterações versus a P_f como se mostra na Figura 5.15, observa-se que quando o número de iterações é pequeno a dispersão da P_f é considerável e a sensibilidade da P_f para o número de iterações diminui, gerando um efeito contrário quando o número de iterações aumenta.

Encontra-se assim com respeito aos exemplos de aplicação, que o número de iterações do método de Estimativas Pontuais Alternativas se torna o mais eficiente dentro dos três métodos analisados, devido a sua baixa quantidade de iterações requeridas para a obtenção de resultados adequados, gerando uma quantidade de simulações insignificantes com respeito aos outros dois métodos analisados (i.e., MMC e LHM). Para o MHL se obteve um ótimo desenvolvimento dos resultados quando se considera as iterações iguais a 1/3 das utilizadas no MMC, sendo que a bibliografia recomenda utilizar até 1/5 das iterações utilizadas no MCM.

Por outro lado temos que o MHL devido ao uso da amostragem estratificada se torna o método mais eficiente em relação ao tratamento dos dados correspondentes as variáveis aleatórias de entrada.

Com base aos resultados obtidos dos diferentes exemplos analisados determinou-se que não existe uma diferença significativa entre as probabilidades de ruptura obtidas pelos diferentes métodos probabilísticos considerados (i.e., Monte Carlo, Hipercubo Latino e Estimativas Pontuais Alternativas). Sendo os três amplamente recomendados para prática comum da engenharia geotécnica. Mas, na presente dissertação foi considerado o MEPA como o método mais eficiente devido à relativa simplicidade da sua formulação, fornecendo resultados aceitáveis em comparação aos outros métodos, considerando o menor esforço computacional, além da possibilidade de trabalhar com casos que possuam uma considerável quantidade de variáveis aleatórias de entrada.

6.3. Conclusões gerais

É difícil tentar padronizar o comportamento anisotrópico do solo, já que de acordo com a bibliografia disponível, o comportamento anisotrópico do solo varia de forma drástica de um solo para outro, é por isso que se deverá enfocar um estudo determinado para cada tipo de solo a ser analisado.

Como mencionado por vários autores, trabalhar dentro de uma faixa de valores considerados aceitáveis para a P_f , torna-se difícil devido aos diversos aspectos importantes, tais como a quantidade e qualidade da informação disponível. Por tanto, como mencionado por Flores (2008) o valor máximo de

probabilidade de ruptura aceitável é função do julgamento do engenheiro para o caso específico em consideração.

De acordo com os resultados obtidos, recomenda-se realizar na medida do possível as duas análises (i.e., probabilísticas e determinísticas) para a avaliação de projetos geotécnicos, com a finalidade de obter um maior julgamento e entendimento da estabilidade referente às diferentes alternativas de solução técnica.

6.4. Sugestões

Realizar ensaios de laboratório TC, DSS e TE, para a obtenção dos parâmetros do solo, que serão utilizados em um modelo constitutivo elasto-plástico anisotrópico (i.e., MIT-S1; NGI-ADP; entre outros) para quantificar de forma mais eficiente os efeitos da anisotropia na análise de estabilidade de taludes fazendo o tratamento estatístico dos resultados dos ensaios de laboratório e assim obter os parâmetros necessários para a subsequente execução das análises probabilísticas que possam fornecer uma maior validade aos resultados obtidos.

Quantificar os efeitos anisotrópicos na estabilidade de taludes considerando uma modelagem em 3D, focando o estudo à zona da superfície de ruptura a se comportar sob os efeitos de extensão.