5. Exemplo de aplicação

Este capítulo tem como objetivo demonstrar o potencial da ferramenta numérica desenvolvida neste trabalho na geração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos, em escala de bacia de drenagem, mostrando a variação do fator de segurança (FS) ao longo do tempo, durante um evento pluviométrico.

A literatura apresenta diversos métodos para geração desses mapas, entre eles: análises a partir da distribuição de deslizamentos no campo, análises a partir de mapeamentos geomorfológicos, modelos com bases estatísticas e modelos determinísticos (Fernandes et al., 2001).

Os modelos determinísticos utilizam cálculos matemáticos baseados nos processos físicos responsáveis pela estabilidade de encostas (Fernandes et al., 2001 e 2004). Normalmente, esses métodos utilizam soluções simplificadas para os fluxos superficial e subsuperficial, obtendo expressões analíticas fechadas, as quais são acopladas a métodos de avaliação da estabilidade de taludes, sendo o método do talude infinito o mais utilizado, tanto pela sua simplicidade, quanto pelas características dos movimentos analisados (Montgomery e Dietrich, 1994; Wu e Sidle, 1995; Rosso et al., 2006, entre outros).

Baum et al. (2002) utilizam a solução analítica proposta por Iverson (2000) para o fluxo subsuperficial transiente saturado-não saturado, acoplando os resultados à análise de estabilidade através do método do talude infinito. Apesar deste método levar em consideração o fluxo transiente de água no meio não saturado, o mesmo não incorpora o efeito da sucção na variação da resistência do material.

Okimura e Kawatani (1986) utilizam um modelo numérico em diferenças finitas aplicando a equação da continuidade associada à lei de Darcy na previsão do movimento da água na massa de solo. Uma análise de estabilidade através de talude infinito é executada em cada célula do modelo, gerando um mapa de fator de segurança. Os autores não consideram o fluxo não saturado, sendo o modelo em diferenças finitas utilizado apenas na definição no nível freático, para definição das poropressões positivas na análise de estabilidade.

5.1. Área de estudo

A área de estudo escolhida para esta aplicação é formada pelo conjunto das bacias do Quitite e Papagaio, situadas no bairro de Jacarepaguá, Rio de Janeiro, na vertente oeste do Maciço da Tijuca, com 2,13 e 2,22km² de área, respectivamente (Fernandes et al., 2004), Figura 56. No ano de 1996 aconteceram nessa região eventos de instabilização de encostas e corridas de massa ocasionados por chuvas com intensidade de 250mm em 48h, entre os dias 12 e 13 de fevereiro (Guimarães et al., 2003; Gomes, 2006), os quais destruíram 150 residências e causaram a perda de 1 vida (Amaral, 1997). Posteriormente, foram mapeadas em torno de 100 cicatrizes de escorregamentos nesse local, Figura 57.

Em função do ocorrido, a área foi objeto de vários trabalhos com diferentes enfoques, o que resultou numa massa de conhecimento considerável sobre a região. Guimarães (2000) apresenta uma compilação dos principais trabalhos realizados até então, abrangendo os aspectos relativos à caracterização física, climatológica, geológica, geomorfológica, de ocupação e uso do solo, entre outros.

A espessura de solo varia de 1 a 3m (Guimarães et al., 2003), podendo ser adotada espessura média de 2m (Guimarães, 2000).

Em torno de 90 medições de condutividade hidráulica saturada foram executadas nas áreas próximas às cicatrizes, utilizando-se o permeâmetro de Guelph. Essas medidas descrevem a variação da condutividade hidráulica saturada com a profundidade, em todo o perfil de alteração, dentro do qual a mesma variou de 0,0001 a 0,009cm/s (Fernandes et al. 2004). A tendência observada é de alta condutividade próximo à superfície, tendendo a decrescer com a profundidade, atingindo um mínimo entre 0,8 e 2,0m, tornando-se novamente mais elevada em maiores profundidades. Variações de duas ordens de grandeza em apenas 30cm foram observadas, apontando para possíveis efeitos dessa descontinuidade de propriedade sobre a saturação do perfil durante o processo de infiltração da água das chuvas (Fernandes et al., 2001).



Figura 56 – Área de estudo. (Fonte: Fernades et al., 2001)



Figura 57 – Mapa de cicatrizes dos escorregamentos. (Fonte: Gomes, 2006)

5.2. Propriedades dos materiais e parâmetros de análise

Como não se dispunha de curvas características representativas dos solos da região, adotou-se os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980), abaixo apresentados, para um solo coluvionar da região da Vista Chinesa, no Rio de Janeiro, utilizados por Soares (1999) na retro-análise de um escorregamento ocorrido em fevereiro de 1988.

 $\theta_s = 0.53$ $\theta_r = 0.20$ $\alpha = 7.0m^{-1}$ n = 1.68

Para a condutividade hidráulica saturada adotou-se o valor de 0,001cm/s.

As Figuras 58 e 59 apresentam a curva característica e a função de condutividade hidráulica para os parâmetros apresentados.







Figura 59 – Curva de condutividade hidráulica adotada.

Da mesma forma, como não se têm os registros da chuva nas bacias do Quitite e Papagaio durante o evento em questão, para efeito de aplicação, adotouse os dados de chuva utilizados por Soares (1999), medidos na estação Capela Mayrinc (elevação 460m), localizada no parque nacional da Tijuca, para os 22 primeiros dias do mês de fevereiro de 1988, ver Tabela 5 e Figura 60.

Tabela 5 – Precipitação diária para os 22 dias de simulação.

dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
prec. (mm)	3	18	90	10	70	50	7	10	5	35	40
dia	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
prec. (mm)	75	40	10	5	0	5	0	75	170	90	90



Figura 60 - Precipitação diária para os 22 dias de simulação.

Guimarães (2000), utilizando o programa SHALSTAB (Montgomery e Dietrich, 1994), testou 125 combinações de parâmetros que incluíam o ângulo de atrito, a razão entre coesão e espessura do perfil de solo e a massa específica do solo, concluindo que o conjunto que melhor aproximou a configuração dos escorregamentos ocorridos na área de estudo foi o seguinte:

 $\phi' = 45^{\circ}$ c' / z = 2kPa $\rho = 1.5g / cm^{3}$

Como a espessura de solo (z) considerada foi de 2m, a coesão ficou definida em 4kPa. Não se encontraram dados relativos a parâmetros de resistência não saturada.

Para o material coluvionar da Vista Chinesa os parâmetros são os seguintes:

 $\phi' = 26^{\circ}$ c' = 5,5kPa $\phi_b = 19,5^{\circ}$ G = 2,76

Onde G [-] é a densidade do material.

Nas análises de estabilidade foram utilizados os dois conjuntos de parâmetros a fim de comparar os resultados, adotando-se para ϕ_b o valor de 20°, semelhante ao determinado para o colúvio da Vista Chinesa, em ambas as análises.

A configuração de malha utilizada para esta simulação englobou as duas bacias, sendo formada por 171018 nós (281790 elementos), Figura 61. A razão de aspecto máxima foi de 79 e as áreas dos elementos de superfície variaram de 10,01 a 276,20m².

A geração da malha foi feita a partir de um *grid* de pontos espaçados de 10m, representativo do relevo da região de estudo. Através do programa computacional GOCAD foi gerada malha superficial de triângulos composta 56358 elementos. Estes elementos serviram de entrada para o gerador de malha desenvolvido nesse trabalho, o qual adotando uma espessura de solo constante igual a 2m, discretizada com cinco elementos, construiu a malha tridimensional de elementos finitos, através da primeira opção descrita no item 3.1.11.

A condição inicial em todos os nós foi de carga de pressão de -0,5m, equivalente a uma saturação de 63%. Como já citado anteriormente, a distribuição inicial de carga de pressão é importante na modelagem de problemas de fluxo não saturado. Sendo este um exemplo ilustrativo e não se possuindo dados para uma melhor definição dessas condições, considerou-se que o tempo de simulação (22 dias) seria suficiente para estabelecer condições factíveis, em instantes próximos aos eventos de chuva mais intensos, nos 4 últimos dias de simulação.

Foi aplicada condição de contorno atmosférica, similar a utilizada no exemplo 4.2.3. As taxas de infiltração impostas foram iguais às precipitações apresentadas na Tabela 5, variáveis no tempo. A mudança de condição, para carga de pressão imposta, é executada quando ao final do processo iterativo, a carga de pressão atuante em determinado nó for positiva, indicando formação de nível de água sobre o mesmo. Nessa situação, ela é alterada para carga de pressão nula, ou seja, considera-se que a água é totalmente removida da superfície. O retorno para a condição de vazão imposta ocorre se, ao final do processo iterativo, a vazão calculada no nó for superior àquela associada à taxa de infiltração atuante no passo de tempo em questão. Os demais nós de fronteira foram considerados como condição de contorno natural (fluxo nulo).



Figura 61 – Malha utilizada na análise.

Adotou-se armazenamento específico de 0,001m⁻¹. Esse valor foi definido através de tentativas, como forma de facilitar o processo de convergência

numérica do modelo, já que sem a consideração dessa grandeza aquele se mostrava muito lento.

Utilizou-se o passo de tempo dinâmico e o "*backstep*" com as seguintes configurações: tamanho inicial de 0,01h, mínimo de 1×10^{-9} h e máximo de 1h. Os parâmetros de variação foram: aumento de 25% caso o número de iterações fosse inferior ou igual a 3, manutenção do valor entre 3 e 7 iterações, redução de 25% até 10 iterações. Caso o número de 10 iterações fosse atingido, o processo iterativo era encerrado e o passo de tempo corrente reiniciado, com tamanho reduzido para 50% do valor anterior. O critério de convergência foi de um erro absoluto máximo de 0,1m, semelhante ao adotado por Paniconi (1993) em suas simulações.

A fim de reduzir o tempo de processamento, aproveitou-se o potencial do método BFGS, fazendo-se que a matriz de rigidez global fosse calculada apenas uma vez a cada cinco passos de tempo. Exceção foi feita às etapas de cálculo onde houvesse variação de condição de contorno ou *"backstep"*; nestas situações a matriz era obrigatoriamente recalculada no passo de tempo subseqüente.

5.3. Resultados

A análise necessitou de cerca de 27h de processamento, 1282 passos de tempo ($\Delta t_{médio}$ =0,41h), apresentando erro máximo no balanço de massa de 3,21% e 301 "*backsteps*".

Os resultados de estabilidade associados ao conjunto de parâmetros do material coluvionar da Vista Chinesa (Soares, 1999) foram descartados, pois conduziram a fatores de segurança muito baixos, fazendo com que a maior parte da região de estudo fosse considerada instável. Mesmo assim, a tendência de variação do FS demonstrada nesta simulação foi semelhante à apresentada pelo outro conjunto de parâmetros (Guimarães, 2000), mostrando compatibilidade no cálculo de estabilidade.

Apresentam-se nas Figuras 62, 64, 66 e 68 os mapas de fator de segurança gerados para os tempos de 0, 180, 288 e 480h (0, 7,5, 12 e 20 dias, respectivamente). Estes tempos foram escolhidos de maneira a representar a condição inicial e os instantes críticos, associados aos períodos de chuva

apresentados na tabela 5. Simultaneamente, apresentam-se os respectivos mapas de máxima carga de pressão, Figuras 63, 65, 67 e 69. Estes últimos apresentam a máxima carga de pressão atuante em cada linha de nós que discretizam a espessura de solo, de maneira similar ao mapa de fator de segurança.

Nos mapas de distribuição do fator de segurança, a área cinza é considerada estável (FS>1), as áreas em outras cores apresentam FS inferior ou igual a unidade, sendo consideradas instáveis.

Por inspeção visual entre a Figura 57 e o mapa referente ao tempo 480h (20dias), apresentado na Figura 70, observa-se concordâncias entre a localização das cicatrizes e as áreas consideradas instáveis pelo modelo. É, porém visível o fato de que o modelo previu uma área instável muito superior àquela mostrada pelo mapa de cicatrizes. Acredita-se que isso esteja ligado às simplificações referentes às propriedades dos materiais e à espessura do manto de solo, os quais foram considerados constantes para toda a região em estudo, quando na verdade a variabilidade espacial dessas grandezas deve ser considerável, em se tratando de uma área tão extensa.

Observando-se os mapas de distribuição de fator de segurança, nota-se que existem áreas instáveis desde o tempo inicial. Como argumentado por Guimarães (2000), essas regiões devem ser representativas de afloramentos de rocha, onde as condições de declividade não permitem a formação de coberturas de material residual ou coluvionar. Em uma análise mais refinada essas regiões poderiam ser eliminadas da malha de elementos finitos.

Os gráficos mostrados nas Figuras 71, 72 e 73 apresentam outro fato de interesse. Estes gráficos mostram a variação do fator de segurança, da carga de pressão máxima na linha de nós, da carga de pressão na base da linha de nós e da posição da superfície com fator de segurança mínimo, para três nós de superfície, em diferentes posições da malha, ao longo do tempo, durante o evento pluviométrico considerado.

Os três pontos apresentam o mesmo comportamento: até 144h (6dias), as linhas representativas da carga de pressão máxima e da carga de pressão na base da linha não coincidem, indicando o avanço da frente de infiltração; aproximadamente a partir de 144h elas tornam-se coincidentes, mantendo-se superpostas até o fim da simulação, indicando que a carga de pressão máxima encontra-se na interface com o topo rochoso.



Figura 62 – Mapa de distribuição de fator de segurança para o instante inicial.



Figura 63 - Mapa de cargas de pressão para o instante inicial.



Figura 64 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=180h (7,5 dias).



Figura 65 - Mapa de cargas de pressão para T=180h (7,5 dias).



Figura 66 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=288h (12dias).



Figura 67 - Mapa de cargas de pressão para T=288h (12dias).



Figura 68 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=480h (20dias).



Figura 69 - Mapa de cargas de pressão para T=480h (20dias).



Figura 70 - Mapa de distribuição de fator de segurança para T=480h (20dias) - planta.

No momento em que a carga de pressão máxima posiciona-se na base da linha de nós, fato que ocorre muito próximo, ou logo após a saturação de todos os nós do perfil, o fator de segurança começa a apresentar uma queda mais flagrante, até posicionar-se em patamar aproximadamente constante, associado à máxima carga de pressão na base.

Observa-se que o fator de segurança apresenta oscilações conforme a carga de pressão no nó da base oscila, diminuindo na medida em que esta aumenta e vice-versa. Este fato associado à posição da superfície crítica, que se mantém constantemente na interface solo-rocha, indica que a diminuição da sucção, com conseqüente redução de resistência não saturada, não se apresenta como fator instabilizante para as superfícies intermediárias analisadas. Nesta análise, a carga de pressão inicial de -0,5m corresponde a uma parcela de coesão associada ao estado de não saturação de 1,82kPa.

Através da observação dos mapas e outros gráficos gerados pela simulação executada nesse exemplo, observa-se que o comportamento descrito anteriormente parece se repetir para a maior parte da região em estudo.



Figura 71 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 16160. Carga inicial de -0,5m.



Figura 72 - Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 10277. Carga inicial de -0,5m.



Figura 73 - Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 13257. Carga inicial de -0,5m.

A fim de se verificar a influência de um maior valor de sucção inicial, procedeu-se nova análise com carga de pressão inicial de -5,0m, correspondente a uma parcela de coesão associada ao estado de não saturação de 18,2kPa. Os resultados, referentes aos mesmos pontos observados na simulação anterior, estão apresentados nas Figuras 74, 75 e 76.

Na simulação com carga de pressão inicial de -5,0m o comportamento é diferente. O valor mais elevado de coesão associada à sucção tem papel mais pronunciado na estabilidade das camadas intermediárias. Observa-se que após um período inicial de infiltração, a perda de coesão aparente, inicialmente alta, leva a superfície crítica (com fator de segurança mínimo) para camadas intermediárias. Essa superfície crítica retorna à base impermeável no instante em que a frente de infiltração alcança essa mesma posição. O fator de segurança só atinge patamar abaixo da unidade, indicação de ruptura, nos tempos finais de simulação.



Figura 74 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 16160. Carga inicial de -5m.



Figura 75 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 10277. Carga inicial de -5m.



Figura 76 – Variação do FS, da carga de pressão e profundidade crítica, ao longo do tempo, para o nó de superfície 13257. Carga inicial de -5m.

De maneira geral, considera-se que a metodologia apresentada gerou resultados satisfatórios mediante as hipóteses simplificadoras adotadas.

Ressalta-se que este exemplo não trata de uma retro-análise, já que muitos dos dados relativos à pluviometria e às propriedades hidráulicas e de resistência do solo foram inferidos de outras regiões que não a de estudo. Além desse fato, o efeito da variabilidade espacial dos parâmetros e outros fatores intervenientes nos processos físicos da estabilidade de encostas, como a ação da vegetação local, por exemplo, foram desconsiderados.