

6

Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

6.1

Conclusões

O objetivo do trabalho foi a modelagem do tombamento bloco-flexural em taludes rochosos através do PFC2D, para a examinação e compreensão do problema. Passando progressivamente pela modelagem numérica da sequência de processos que governam o problema mecânico referido e a sua comparação com métodos analíticos e semi-analíticos presentes na literatura.

Expondo metodicamente os fenômenos envolvidos, e os fatores que controlam o processo de tombamento de bloco e do tombamento flexural separadamente, examinou-se progressivamente a resposta do PFC2D na simulação de cada item sinalado. Visto que o tombamento bloco-flexural é uma combinação dos processos de tombamento acima mencionados, os fatores avaliados serviram para a conceptualização ulterior do mecanismo de ruptura escopo deste trabalho.

Algumas conclusões são:

1. Devido às deformações flexurais induzidas nas colunas de rocha presentes no talude submetido ao mecanismo de tombamento bloco flexural, viu-se necessário testar o comportamento da rocha modelada em condições de flexão. Dois materiais disponíveis no PFC2D foram avaliados: o material constituído por partículas interligadas pelo parallel bond (parallel BPM) e posteriormente o material constituído pelo flat-joint contact model (flat-jointed BPM). O comportamento das vigas engastadas em um extremo e carregadas pontualmente no extremo livre, foi contrastado com a formulação analítica desenvolvida por Timoshenko (1951) para este caso. Os resultados de 5 vigas com diferentes módulos de deformabilidade apontam que as vigas compostas pelo flat-jointed BPM apresentam menor erro a respeito dos valores analíticos como pode ser visto no gráfico de barras 4.5. Este foi o ponto de partida para a escolha do flat-jointed BPM como o material a se usar nas simulações já que o

material mencionado parece apresentar melhor resposta na simulação de deformações por flexão na rocha.

2. Seguidamente, sendo a resistência à tração o fator governante na resistência a processos de flexão em vigas [27], e na sua vez sendo definido por vários autores como o comportamento que define a estabilidade do talude em processos de tombamentos flexurais ([4, 7, 3, 1]), conferiu-se a resistência das vigas de rocha submetidos a processos de flexão através de ensaios de flexão em três e quatro pontos.

Sendo definida a resistência à tração da rocha como a tensão tratória no momento da ruptura em condições de tensões uniaxiais puras, a literatura sugere uma melhor correlação entre a resistência obtida pelo ensaio de flexão de quatro pontos do que a obtida pelo ensaio de três pontos em flexão [16, 27]; todavia, a resistência de quatro corpos de prova virtuais ensaiados ficaram muito próximos entre elas, como também aos resultados dos ensaiados mediante tração direta.

No entanto a simplicidade de realizar ensaios brasileiros para o cálculo da resistência à tração, motivou a avaliação da sua correlação com os ensaios supracitados, fornecendo também valores com uma boa concordância. Isto indica que a resistência à tração calculada através de ensaios indiretos forneceria uma boa representação da resistência a tração da rocha.

Não obstante, para obter uma correlação satisfatória são necessários um maior número de ensaios.

3. Os deslocamentos diferenciais entre as faces das discontinuidades é uma condição que permite a deformação das colunas ou vigas de rocha por flexão, como também é uma circunstância avaliada para o estado de equilíbrio limite na estabilidade de taludes propensos a tombamentos de bloco [24]. Portanto a simulação dos deslocamento de discontinuidades na rocha sintética foi outro fator avaliado fazendo uso de um ensaio de corte direto desenvolvido no PFC.

Inicialmente, devido à geometria da fratura estar definida no corpo de prova através de um conjunto de contatos do tipo smooth-joint, o deslocamento diferencial entre as partículas que ficam em lados opostos da descontinuidade e que constituem as faces dela, podem criar novos contactos com outras partículas uma vez que o deslocamento total seja igual ou maior ao raio médio da partícula usada no modelo. Neste ponto, o novo contacto será considerado do tipo smooth-joint, somente se os

centros das partículas ficassem em lados opostos das coordenadas iniciais da geometria da falha que fica imóvel durante o processo todo. Devido à dinâmica do processo, e ao raio das partículas empregadas no modelo, esta condição eventualmente não é cumprida (ver figura 4.16).

Um código implementado no Fish, é aplicado para uma nova condição de criação de contactos entre partículas que pertencem a cada face da descontinuidade modelada. Este código permitiu modelar coerentemente o comportamento da fratura a diferentes níveis de confinamento normal (ver fig. 4.17). Concludentemente, o comportamento das falhas simuladas através do contacto smooth-joint, devem ser revisadas para uma representatividade coerente.

4. O equilíbrio limite do tombamento de apenas um bloco rígido modelado no PFC2D, foi estudado através da comparação entre as condições limites da formulação estática e da formulação pseudo-estática [37, 24]. Concluiu-se que as condições reproduzidas pela análise numérica corresponde as condições de equilíbrio limite propostas por Sagasetta (1986), dentro da análise pseudo-estática.

Esta condição explica a diferencia entre os valores de fator de segurança relatados pela análise numérica e analítica desenvolvida para o problema de tombamento de blocos em uma base inclinada, proposta por Hoek e Bray (1981). Apesar disso os valores ficam muito próximos de uma maneira perfeitamente coerente.

5. No caso do tombamento flexural, avaliado inicialmente fazendo a comparação entre a formulação analítica versus a análise numérica, mantendo as propriedades e características geométricas constantes exceto o ângulo do talude, este último é avaliado como condição de estabilidade ou não [7]. Aqui, o comportamento do PFC2D definiu a relação entre as rigidezes k_n e k_s das fraturas, como fator predominante para se cumprir as condições de equilíbrio limite estabelecidas por Aydan e Kawamoto (1992) ao invés do ângulo do talude (ver figura 5.9).

No caso da simulação numérica do tombamento flexural para um modelo físico ensaiado em uma máquina centrífuga, as deformações e a resistência do talude relatadas pelo trabalho do Adhikary et al. (1997) como também a inclinação da superfície de ruptura foram melhor reproduzidas no PFC2D, através do teste de diversas simulações com diferentes valores de K_n e K_s das descontinuidades.

Os fatos prévios confirmaram que, as propriedades mecânicas das fraturas controlam a deformabilidade do talude, condicionando a força da gravidade onde ele falha. Os deslocamentos diferenciam as descontinuidades submersas no talude levam às colunas de rocha a deformações por flexão que fraturam a rocha intacta quando a resistência dela é atingida. Em conclusão, a rigidez cortante estabelece a força necessária para o deslocamento entre colunas acontecer, que na sua vez está relacionada à força normal controlada pela rigidez normal da fratura.

6. O tombamento bloco-flexural, escopo deste trabalho, simulou-se inicialmente com as condições ideais da formulação analítica propostas pelo trabalho de Amini et al. (2010). Duas condições de tombamentos bloco flexurais foram avaliadas, contrastando elas com os resultados da formulação mencionada:

- Talude **A**: com uma descontinuidade secundária mergulhando 18° e semi-transversal à família de descontinuidades principal.
- Talude **B**: com uma descontinuidade secundária mergulhando 32° e semi-transversal à família de descontinuidades principal.

Embora os resultados tenham fornecido boa aproximação entre a análise numérica e analítica para o talude **A**, existe uma sobrestimação enquanto à resistência às gravidades induzidas no talude **B** pelo cálculo analítico. Esta condição existe pela mudança da “coluna chave” que acontece no resultado final dentro da simulação numérica que não é prevista pela formulação analítica.

Este fato pode ser resultado da mudança do ponto de aplicação da força na “coluna” no pé do talude, a respeito do ponto de basculação do “bloco” que age nela; isso, devido a que a distância entre esses dois pontos é diminuída enquanto a falha secundária fica mais íngreme (ver fig 5.17).

Posteriormente, examinando o comportamento do talude com a interação das falhas secundárias supracitadas simultaneamente, a resistência em novas simulações dos taludes avaliados (**B** e **C**), ficam concorde à resistência menor relatada pela ação da fratura com menor valor de mergulho no talude **A**. Isso confere que a coluna chave é um fator fundamental na estabilidade do talude submetido ao mecanismo de ruptura por tombamento bloco flexural.

Por outro lado, na simulação de um processo de tombamento bloco flexural no mesmo talude (isto é, a mesma geometria e propriedades), pela interação de duas famílias de falhas: uma persistente e com espaçamento

definido, e outra com características não persistente contínuas e de espaçamento aleatório; o resultado de resistência é diminuída um 25% dos taludes mencionados anteriormente. Isto sugere que, a resistência do talude está controlada pela distribuição das fraturas presentes dentro do talude; porém, o processo além de ter apresentado flexão de colunas e tombamento de blocos também apresentou empurre de blocos por processos de deslizamento.

O uso da formulação de Amini et al. (2009) na estimação da resistência ao tombamento bloco flexural em taludes rochosos, deve ser feita considerando a descontinuidade basal com menor valor no ângulo de mergulho. No entanto, o cálculo deve ser feito tendo em conta a mudança do ponto de aplicação da força de acordo à zona avaliada.

Para taludes com sistemas de tombamento bloco-flexural mais complexos, o cálculo poderia ser avaliado considerando zonas de tombamento de bloco e de flexão, fazendo o mapeamento nas famílias de descontinuidades e sinalando o mecanismo ao que está submetida cada região, podendo aplicar cada cálculo analítico que representa cada processo; porém a representatividade do resultado dependeria muito da qualidade do mapeamento e da experiência do avaliador.

7. O PFC2D parece ser uma ferramenta de capacidades muito boas para a representação deste tipo de problemas, porém o tempo de cálculo computacional fica muito alongado pelas características do novo modelo de contacto avaliado. Portanto, o PFC2D ainda está restrito à velocidade dos ordenadores para se empregar em problemas práticos.

6.2

Sugestões para estudos futuros

- É necessário remarcar a necessidade de avaliar com maior profundidade os mecanismos envolvidos em processos de tombamento bloco-flexural com distribuições de falhas complexas, para estabelecer a representatividade dos métodos analíticos em esse tipo de fenômenos.
- No capítulo quarto, foi mencionado um dos problemas do modelo de contato do tipo smooth-joint, na modelagem de fraturas em rocha; este problema está relacionado à imobilidade da geometria da fratura durante o processo de cálculo no PFC2D. Da mesma maneira, a orientação dos contatos do tipo smooth-joint não acompanha a rotação relativa que as partículas efetuam quando elas ficarem submetidas a grandes deslocamentos. Esta característica limita a possibilidade na simulação

de processos onde são necessários deslocamentos maiores; E.g. Queda ou rotação de blocos. Portanto, novas condições devem ser adotadas para o deslocamento dos contatos compostos por Smooth-joint.