# 2 Estudos de tombamento

O tombamento é um modo de fratura em taludes ou encostas rochosas com planos de fraqueza regularmente espaçados. O processo de *toppling* geralmente ocorre baixo a ação da gravidade quando os planos de falha ou descontinuidades encontram-se orientadas com uma inclinação ou mergulho oposto à face do talude, embora podendo ocorrer quando o mergulho das descontinuidades é orientado para a face do talude, se a carrega é transferida desde blocos com tendência ao deslizamento desde mais acima, esse último caso é chamado de *tombamento secundário* [28].

O processo de tombamento é comum em taludes de minas a céu aberto ou taludes naturais que contem xistos, folhelhos, mas também ocorrem em maciços sedimentares onde as camadas apresentam mergulhos com valores elevados, em maciços vulcânicos com falhamento colunar e maciços graníticos com descontinuidades regulares.

Um dos primeiros trabalhos amplamente conhecidos descrevendo o tombamento é o relatado por de Freitas e Watters em [22], posteriormente se criaram definições formais do que vem a ser o processo de Tombamento. Posteriormente definiram o problema como: "Tombamento é um modo de falha de taludes rochosos envolvendo rotação de colunas o blocos interatuantes, tais colunas ou blocos são formadas por camadas regulares, xistosidades ou juntas com uma orientação quase paralela à crista do talude e mergulho em direção do maciço rochoso; isto contrasta com as estruturas deslizantes que são controladas por descontinuidades que mergulham na direção da face do talude" [24],

Em esse mesmo trabalho definiram-se diferentes casos de tombamentos primários (figura 2.1), como:

- (a) Tombamento de blocos;
- (b) Tombamento flexural;
- (c) Tombamento Bloco-Flexural.

Tombamentos por eventos independentes onde o tombamento por se mesmo não é possível de ocorrer são conhecidos como tombamentos secundários, exemplos de isto são:

- (d) *slide-head-topple* ou tombamentos na crista do talude por deslizamentos de blocos inferiores;
- (e) Tombamentos gerados na base produto de solos confinados por rochas suprajacentes com descontinuidades contendo mergulhos íngremes;
- (f) Tombamentos no pé do talude por deslizamentos superiores (*slide-toe-toppling*), ou tombamentos formados pela geração de juntas de tensão nas cristas de taludes ou penhascos, (ver figura 2.2).

Além disso Cruden [17] sugeriu modos de tombamento em formações com descontinuidades cataclinais (ou a favor da orientação da face do talude), porém esses processos precisam energia adicional para se desenvolverem, (fig. 2.3).

Posteriormente [18], definiram os tombamentos gerados na base, chamando eles de "Block spreads", principalmente gerados pela interação de camadas de rocha dura acima de camadas de rocha altamente meteorizada. Variações de "block spreads" foram definidos em [12].



Figura 2.1: Modos primários de Toppling, (a) Tombamento de blocos contendo juntas ortogonais com grande espaçamento, (b) Tombamento flexural, (c) Tombamento bloco-flexural, caracterizado por deslocamentos acumulados em colunas pseudo-continuas a traves de juntas ortogonais [24]

.



Figura 2.2: Modos primarios de Toppling, (a) Tombamentos por deslizamentos inferiores (slide-head-toppling), (b) Tombamentos por deslizamentos na base (slide base toppling), (c) Tombamentos por deslizamentos superiores (slide-toe-toppling, (d) Tombamentos por juntas de tensão (tension crack toppling); [24]



Figura 2.3: Representação do processo de tombamento em formações com descontinuidades cataclinais [17]

Existem diversas abordagens na compreensão do fenômeno de tombamento em maciços rochosos e na definição de fatores ou mecanismos que controlam ele. Na literatura encontra-se 4 tipos principais de análises:

– Análise cinemática.

- Modelos físicos.
- Métodos analíticos.
- Análise numérica.

## 2.1 Análise Cinemática

Uma ferramenta muito útil na determinação da possibilidade de ocorrência do tombamento através de uma analise cinemática é o estereograma, proposto em [24]. Para esta análise são tomadas as seguintes considerações iniciais:



Figura 2.4: Estereograma com a representação dos limites geométricos para à ocorrência do tombamento.

- O mergulho e a direção do mergulho da face do talude tem a mesma direção do que a tensão principal maior.
- Os blocos são considerados rígidos.
- O cisalhamento nas descontinuidades só acontece se o ângulo entre a orientação da tensão principal maior e a normal à descontinuidade é maior do que o ângulo de atrito da descontinuidade.

Como é apresentado na figura 2.4 o polo da descontinuidade principal deve ficar fora do grande circulo que representa a face do talude acrescentado pelo valor do ângulo de atrito da descontinuidade. Goodman and Bray em [24], originalmente sugeriram que o ângulo da direção do mergulho da descontinuidade deveria se manter dentro de  $+/-20^{\circ}$ a respeito da direção do mergulho da face do talude. Mais tarde [23], sugeriu que um ângulo entre  $+/-30^{\circ}$  deveria ser o valor limite mais apropriado, porém estudos numéricos baseados em **3DEC** de *Itasca*, realizados por *Brideau and Stead* [13], conferem os antigos valores de  $+/-20^{\circ}$  como os mais apropriados.

## 2.2 Métodos analíticos

# 2.2.1 Solução analítica para tombamento de bloco

Goodman and Bray [24] desenvolveram o método do equilíbrio limite para tombamento de blocos, este problema foi conceptualizado como uma serie de blocos numa base inclinada em forma de escada, onde as forças atuantes em cada bloco são consideradas paralelas e normais nas faces deles; depois o sistema é resolvido através do equilíbrio dessas forças, tendo como eixos de referencia os contidos no plano basal e o plano entre blocos. O cálculo começa considerando a força rotacional ou deslizante resultante no bloco superior que fica no topo do talude, e diretamente considerada no cálculo do bloco inferior; então a avaliação é repetida até chegar ao ultimo bloco do sistema que fica no pé do talude.

As relações básicas propostas pelos autores para a estabilidade dos blocos são:

Não tomba se: 
$$y/\Delta x < \cot \alpha$$
 (2-1)

Não desliza se: 
$$\phi > \alpha$$
, ou  $1/\mu < \cot \alpha$  (2-2)

Segundo as equações anteriores, considerando um bloco com  $\Delta \boldsymbol{x}$  de espessura, altura  $\boldsymbol{y}$ , peso igual a  $\boldsymbol{W}$ , sobre um plano que tem uma inclinação de  $\alpha$  graus com respeito à horizontal, tem que obedecer que a tangente do mesmo ângulo deve ser menor ou igual ao ângulo de atrito da descontinuidade ( $tan \alpha \leq \mu$ ) para não deslizar. Se o bloco começar a tombar as forças de reação mudam para a esquina inferior dele, devido a isto, o equilíbrio limite é atingido quando o peso atua exatamente através da sua esquina inferior, essa condição faz com que o bloco não tombar se a equação 2-1 fosse atendida.



Figura 2.5: Bloco em posição limite para o tombamento, [24].

Em um talude composto por blocos susceptível ao tombamento, os blocos interagem uns com outros e existem maiores graus de liberdade do que é apresentado no gráfico 2.5. No entanto a condição para o tombamento de blocos em contato pode ser obtido através de uma analise cinemática para o deslizamento entre as faces em contato antes de grandes deslocamentos de massa.

No gráfico 2.6 o estado de tensões atuantes na rocha é uniaxial, com a tensão principal maior na mesma direção da face do talude; se é tomada como referencia a normal ao plano das descontinuidades, verifica-se que o deslizamento entre as faces dos blocos só pode ocorrer se o ângulo da tensão principal é maior ao ângulo de atrito da descontinuidade. Esta condição fornece uma ferramenta muito útil para determinar a possibilidade de ocorrência do mecanismo de tombamento em um sistema de blocos.

No trabalho desenvolvido em [21] são enumeradas as limitações que o método do equilíbrio limite apresenta, tais são:

- Nenhum bloco pode rotar ou deslizar simultaneamente.
- Só as colunas continuas podem ser analisadas. Não é permitido o deslizamento das juntas ou derrubamento dos blocos individuais definidos pelas juntas na coluna de rocha.
- Os blocos de rocha são rígidos.



Figura 2.6: Condições cinemáticas para o deslizamento entre blocos o qual precede o tombamento; representação do talude e a direção da tensão principal, projeção estereográfica para a condição de tombamento [24]

- A ubicação e mergulho do plano basal de ruptura devem ser assumidos previo à análise.
- O método não considera para a tensão não linear de deslocamento, ao longo das juntas.
- A geometria do talude é restrita aos passos da análise e à largura do bloco.

Não obstante, ainda com essas limitações, a solução fornecida pelo cálculo do equilíbrio limite é uma ferramenta com bons resultados na literatura (Willye, 1980; Piteau et al.,1981; Hoek e Bray, 1981; Teme e West, 1983; Scavia et al., 1990 enumerados em [21]).

#### 2.2.2

### Equilíbrio limite para Tombamento Flexural

Aydan e Kawamoto [7], desenvolveram um método analítico para o tombamento flexural que tem lugar em escavações superficiais como subterrâneas; considerando vigas engastadas em um extremo e com carregamento pontual no extremo livre como base da sua formulação, empregaram a teoria da elasticidade para definir as tensões geradas no interior da viga no ponto de pivote onde cada viga é sustentada.

$$\sigma_x = \pm \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \tag{2-3}$$

A equação 2-3 representa a distribuição das tensões nas fibras da viga ou coluna, onde N, A, M, I; são a força normal, área transversal, momento e o modulo de inercia respectivamente. Através dela determina-se a tensão maior que geralmente é desenvolvida na fibra mais externa. Enquanto a tensão maior atingir a resistência à tração da rocha uma trinca é gerada e se a carga não diminuir, a trinca pode se propagar e o falhamento da coluna será inevitável.



Figura 2.7: Modelo para a analise de equilíbrio limite para tombamento flexural em taludes [7].

Duas assunções principais são tomadas; a primeira é o ângulo do plano basal " $\alpha$ " onde a superfície de ruptura acontece com um valor pre estabelecido por observações no campo e em ensaios de laboratório, e a segunda assunção é a posição das forças normais as faces das vigas definida através da resultante de uma distribuição triangular; a posição de esta resultante tem a forma de:

$$x_i = \eta h_i \tag{2-4}$$

Esta relação também foi determinada através de observações em modelos experimentais onde se determinou inicialmente que o valor de  $\eta$  deve ficar

dentro da faixa de 0.75 a 1, porém os mesmos autores apontam que usando o valor de 1 gerará um erro na estimação do fator de segurança.

O gráfico 2.7 mostra o modelo idealizado para a solução do problema representando as forças laterais e as forças na base da viga, para depois serem empregadas no cálculo da tensão na fibra mais externa que atua no ponto de flexão, próximo ao plano basal (equação 2-5).

$$\sigma_x^{y=t_i/2} = \frac{U_i^b - N_i}{A_i} + \frac{t_i}{2} * \left(\frac{P_{i+1}\eta h_i + S_i \frac{\bar{h}_i}{2} - (T_{i+1} + T_{i-1}) \frac{t_i}{2} - P_{i-1}\eta h_{i-1} + u_i^b l_{bi} + U_{i+1}^s l_i - U_{i-1}^s l_{i-1}}{I_i}\right)$$

$$(2-5)$$

Onde:  $N_i = W_i \cos \alpha$   $S_i = W_i \sin \alpha$   $W_i = \frac{\gamma t_i (h_i + h_{i-1})}{2}$   $A_i = t_i s$   $U_{i+1}$ = Força da água no lado i+1.  $U_{i-1}$ = Força da água no lado i-1.  $u_i^b$ = Pressão da água na base.  $h_i$  = Altura da coluna no lado i+1.  $h_{i-1}$  = Altura da coluna no lado i-1.  $l_{bi}$  = excentricidade da pressão de água na base da coluna.  $l_{i+1}$  = altura da força da água atuando no lado i+1.  $l_{i-1}$  = altura da força da água atuando no lado i+1.  $l_{i-1}$  = espessura da coluna.  $\alpha$  = inclinação do plano basal.

# 2.2.3

### Equilíbrio limite para tombamento bloco-flexural

Amini et al. [5], apontou a falta de estudos para o processo de tombamento bloco-flexural em taludes rochosos, propondo assim uma nova abordagem analítica para entender o comportamento destes sistemas.

Devido à grande variação na geomorfologia e as características na distribuição espacial das juntas, falhas ou distintos planos de fraqueza que apresentam os maciços rochosos, é possível sugerir que os falhamentos por tombamento em taludes de escala maior estão governados na maioria das vezes por uma interação entre flexões e o empurre de blocos soltos dentro da estrutura.

No entanto, a complexidade do fenômeno foi simplificada pelos autores através das seguintes assunções:

- Dois blocos próximos tem diferentes comportamentos, um deles tomba flexuralmente e outro em forma de bloco; isto é, dois blocos juntos não podem tombar baixo o mesmo mecanismo.
- Tombamento de blocos e de colunas são tratados baixo as mesmas considerações.
- Todos os blocos no maciço rochoso com potencialidade para o tombamento bloco-flexural, tem o mesmo fator de segurança que todo o talude ao falhamento.
- A superficie de falhamento total do sistema fica na faixa de  $10^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  acima da normal à família principal de falhas.

Devido a esta interação de vigas e blocos no tipo de colapso blocoflexural, alguns blocos falham por concentrações de tensões fletivas e outros blocos tombam como resultado das juntas secundarias transversais e por consequentemente todo o talude falha em conjunto. Apresentados na figura 2.8, os blocos de rocha com juntas secundárias e transversais à família de juntas principais exercem uma força na coluna de rocha que encontra-se inferiormente; esta força é caraterizada a respeito do tipo de deslocamento que eos corpos estão submetidos (deslizamento, tombamento ou tombamento-deslizamento). Subsequentemente a coluna de rocha experimenta um acréscimo na tensão no ponto de pivote; logo, a mesma coluna transfere a força resultante ao bloco inferior. Se a máxima resultante de tensões no ponto de basculamento da última coluna é maior à resistência à tração da rocha, então a coluna pode quebrar e o talude torna-se instável.

O ponto crítico da analise de equilíbrio limite nos três casos apresentados acima é o ponto de aplicação da força do bloco superior ao inferior, e o ângulo de inclinação do plano basal onde acontece a falha, Aydan e Kawamoto consideraram um ângulo igual a cero graus com respeito à normal da descontinuidade principal [7], o trabalho de Adhikary et al. apresenta um ângulo de 10° acima da normal às juntas principais [1], porém posteriormente Aydan e Amini, demonstraram que o ângulo fica na faixa de 0° a 15°, [6].

A analise é feita através da solução para blocos susceptíveis ao tombamento e para colunas de rocha susceptíveis à flexura considerando os seguintes casos:



Figura 2.8: Idealização do tombamento bloco-flexural; Amini et al. [5].

**Caso 1 (bloco suscetível ao tombamento entre duas colunas em flexão).** Esta análise tem três tipos de deslocamentos avaliados:

- Tombamento: onde a esquina inferior do bloco é considerada como ponto de apoio do bloco; o ponto de aplicação da força na coluna avaliada é igual a mesma altura do bloco, e as forças laterais são o produto da interação da viga superior e o peso do bloco, bem como o ângulo de atrito das paredes (equação [2-6]).

$$P_{n-1,t} = \frac{P_n \left[\lambda_2 h_{n+1} - tan\phi_1 * t_b / Fs\right] + 0.5w_n \left[sen\alpha * h_n - cos\alpha * t_b\right]}{h_n}$$
(2-6)

– Deslizamento: o bloco tem o potencial de deslizar porém é estável ao

tombamento, considerando-se a metade da espessura do bloco para o ponto de aplicação da força normal e cortante produzido pelo peso, o ponto de aplicação da força na coluna inferior é igual a metade da altura, e o ponto de aplicação da força produzida pela flexão da coluna superior é expressado por  $x_n = \lambda_2 h_{n+1}$  (equação 2-7).

$$P_{n-1,s} = P_n + \frac{W_n(sen\alpha - \cos\alpha * tan\phi_2/Fs)}{1 - tan\phi_1 * tan\phi_2/Fs}$$
(2-7)

 Tombamento e deslizamento simultâneos: Baseado nos trabalhos Sagaseta [37] e Aydan e Shimizu [8], considerando uma analise pseudo-estática o fenômeno pode ser considerado como mostrado a seguir:

**a.** Transição do deslizamento para a combinação do processo simultâneo (deslizamento e tombamento): dentro desta consideração Aydan e Shimizu [8], estabelece a seguinte equação:

$$P_{n-1,s,t} = \dots$$

$$\frac{P_n \left[ 0.5h_n (1 + tan\phi_1 tan\phi_2/Fs) - t_b tan\phi_1 \right] + 0.5W_n cos\alpha (h_n tan\phi_2/Fs - tb)}{h_{n-1} - 0.5h_n (1 - tan\phi_1 tan\phi_2/Fs)}$$
(2-8)

**b.** Transição do tombamento para a combinação de deslizamento e tombamento simultâneo:

**c.** Finalmente se o bloco for estável com respeito ao Tombamento e deslizamento então o valor de  $P_{n-1}$  sera igual a cero.

Depois de definir os valores fornecidos pelas formulações anteriores, faz-se a escolha do maior valor para a força resultante através de:

$$P_{n-1} = Max(P_{n-1,t}, P_{n-1,s}, P_{n-1,s,t}, P_{n-1,t,s}, 0)$$
(2-10)

**Caso 2 (Coluna suscetível à flexão, entre dois blocos tombando).** Considerando a potencialidade de falha à flexão ou cisalhamento a avaliação é feita através de duas categorias:

 Os valores da força normal na face lateral da coluna e o momento na base, combinados ao valor de tensão máxima de flexão:

$$\sigma_x^{y=t_i/2} = \frac{0.5M.t}{I} - \frac{N}{t}$$
(2-11)

fornecem a seguinte expressão:

$$P_{n-1} = \frac{P_n(x_n - 0.5 * tan\phi_1.t) + W_n sen\alpha.\frac{h_n}{2} - \frac{2I}{t} \left(\frac{\sigma_t}{Fs} + \frac{W_n cos\alpha}{t}\right)}{x_{n-1} + 0.5 * tan\phi_1 * t}$$
(2-12)

O tipo de força na qual esta classificada  $P_{n-1}$  depende do bloco superior (n+1) que exerce a força  $P_n$  no bloco avaliado; da mesma maneira podese considerar baixo quatro grupos:

- Se o bloco superior for apenas suscetível ao tombamento então  $P_{n-1}$  é designado como  $P_{n-1,t}$ .
- Se o bloco superior for apenas suscetível a deslizamento então  $P_{n-1}$  é designado como  $P_{n-1,s}$ .
- Se o bloco superior for suscetível ao deslizamento e ao tombamento simultaneamente então a força  $P_{n-1}$  é designada como  $P_{n-1,s,t}$ .
- Se o bloco n+1 é estável em relação ao deslizamento e tombamento, então  $P_{n-1}$  é igual a zero.

– Se o bloco avaliado tem potencialidade a falhar por cisalhamento então:

$$P_{n-1,sh} = P_n + \frac{W_n(sen\alpha - \cos\alpha * tan\phi_3/Fs)}{1 - tan\phi_1 tan\phi_3/Fs}$$
(2-13)

Da mesma maneira, como no **Caso** 1, o valor final de  $P_{n-1}$  deve ser computado usando a relação:

$$P_{n-1} = Max(P_{n-1}, P_{n-1,s}, P_{n-1,t,s}, P_{n-1,sh}, 0)$$
(2-14)

O cálculo é efetuado progressivamente desde o topo até o bloco ou viga que fica no pé do talude, para determinar a força necessária  $(P_0)$  que equilibrará sistema; se  $P_0$  é maior do que zero então o talude é instável ao tombamento, contrariamente se o valor fosse igual ou menor do que zero.

### 2.3 Modelos físicos

O principio dos modelos físicos foi desenvolvido para reproduzir os efeitos da gravidade em escavações a uma escala reduzida e em dois dimensões. As forças geradas pela gravidade são simuladas através da movimentação de uma faixa em contato com a face inferior paralela à horizontal do modelo em três maneiras:

- Em faixas inclinadas, onde o modelo é construído numa superfície plana e depois é inclinado para incrementar a gravidade além de 1g.
- Em aparelhos centrífugos.
- Em bases friccionais.

Adhikary et al. [2], apontou o uso da técnica da modelagem física por vários trabalhos anteriores ao desenvolvido por ele, porém os trabalhos onde foram estudados processos de tombamento são os presentados por Whyte (1973), Soto (1974), Kawamoto et al. (1983), Aydan e Kawamoto (1987, 1992), Stewart (2005), Adhikary et al. (1997, 2007), Majdi e Amini (2008), e Amini et al. (2008) todos os anteriores referenciados em [32].

No caso de Faixas inclinadas, os testes são difíceis de se controlar pelas vibrações indesejadas durante a mudança de inclinação do modelo, podem eliminar prematuramente os "blocos chave"; e após da inclinação máxima o modelo tende a se autodestruir.

No entanto o modelo de base friccional é um dos métodos experimentais mais eficazes onde o aspecto mais importante é a consideração do campo de gravidade [43]; além disso, este método é bem conhecido e aceitado por diversos trabalhos orientados à estabilidade de taludes (Kutter, 1972; Hammett, 1974; e Easki et al., 1993 todos eles referenciados em [26] e [43]). Este método pode expressar de uma maneira realística a ruptura e o processo de deslocamento do maciço rochoso após fraturado o modelo.

Wong e Chiu [43], usaram a base de fricção para estudar mecanismos de tombamento bloco-flexural muito comuns em uma região de Hong Kong. O material empregado na criação dos modelos foi uma mistura de massa plástica, areia fina e água. Vários modelos foram criados variando-se o espaçamento das juntas e o mergulho das mesmas, para diferentes alturas de um talude com 70° de inclinação. Baseado nos resultados, eles puderam desenvolver uma classificação para o tombamento bloco-flexural. Essa classificação leva em conta o ângulo da junta que mergulha na direção do maciço rochoso, e outra junta com um mergulho menor cortando a primeira, porém se orientando para face do talude. Existiriam três tipos de ruptura listadas dentro do estudo [43].

- Tombamento onde tem-se:  $\theta = 105^{\circ}$  e com  $\alpha \leq 10^{\circ}$  ou  $105^{\circ} < \theta < 125^{\circ}$ ;
- Deslizamento dos blocos onde tem-se:  $\theta \leq 125^\circ;$ e
- Uma combinação de deslizamento com tombamento de blocos, onde temse  $\theta < 105^{\circ}$  ou  $\theta = 105^{\circ}$  e com  $\alpha > 10^{\circ}$ .

Segundo [23] e Jiang et al. em [43], os resultados do ensaio de modelagem baseada na fricção da base, mostram uma boa correlação com os métodos numéricos e os métodos computacionais, assim como, método do equilíbrio limite (LEM) e o método dos elementos distintos (DEM).