

3. Análise dos Mecanismos de Ruptura por Tombamento

3.1 Generalidades

Rupturas em taludes foram inicialmente estudadas para fins de obras civis, mais, nas últimas décadas, taludes que se apresentam em mineração a céu aberto com alturas que superam 600 m (Sjöberg, 2000; Call et al., 2000) têm provocado maior interesse em estudo dos mecanismos de ruptura que geram a instabilidade dos taludes. O mecanismo de ruptura refere-se à descrição do processo físico que acontece em diferentes pontos do maciço rochoso, tal como o começo e a propagação da ruptura através da rocha e que, eventualmente, a conduz ao colapso.

Segundo Sjöberg (2000), “infelizmente, mecanismos de ruptura em taludes altos, especialmente em rochas duras e em rochas fraturadas, são geralmente pouco entendidos e/ou conhecidos. Poucos taludes de mineração entre 300 m e 500 m de altura romperam”. Segundo aquele autor, os assuntos mais urgentes a serem resolvidos são (a) conhecer as condições para ocorrência de diferentes rupturas, (b) conhecer as condições para a deflagração da ruptura e (c) conhecer a forma e a localização da superfície de ruptura.

Na literatura, existem três tipos de ruptura por tombamento descrito por Goodman e Bray (1976), tombamento flexural, tombamento de blocos e tombamento bloco – flexural, conforme a figura 3.1, cada um deles têm diferentes tipos de abordagens. Pelo que nesta tese pretende-se estudar, o caso de mecanismo de ruptura de tombamento bloco - flexural que acontece na mina Tintaya, já que o tombamento é um tipo distinto de deformação do talude, caracterizado através de rotação e flexão dos blocos sob: forças da gravidade, forças exercidas por unidades adjacentes ou fluidos dentro das descontinuidades. Este tipo de

movimento pode acontecer a quaisquer escala e em tudo tipo de rocha (Benko, 1997).

Com base, nos estudos de modelos físicos e de modelagem numérica, é muito provável que a superfície de ruptura se inicie no pé do talude, tanto em rupturas por tombamento como para as rupturas complexas. Os mecanismos de rupturas foram estudados através de análises numéricas, onde pesquisou o comportamento dos taludes. Vários exemplos de aplicação da modelagem numérica a estudo de taludes podem ser encontrados na literatura. O comum destes casos é que o comportamento do talude seja construído através da modelagem numérica. Para isto os diferentes parâmetros de entrada podem ser variados, em coerência com os observados em campo, até conseguir uma boa representatividade da geometria da ruptura observada.

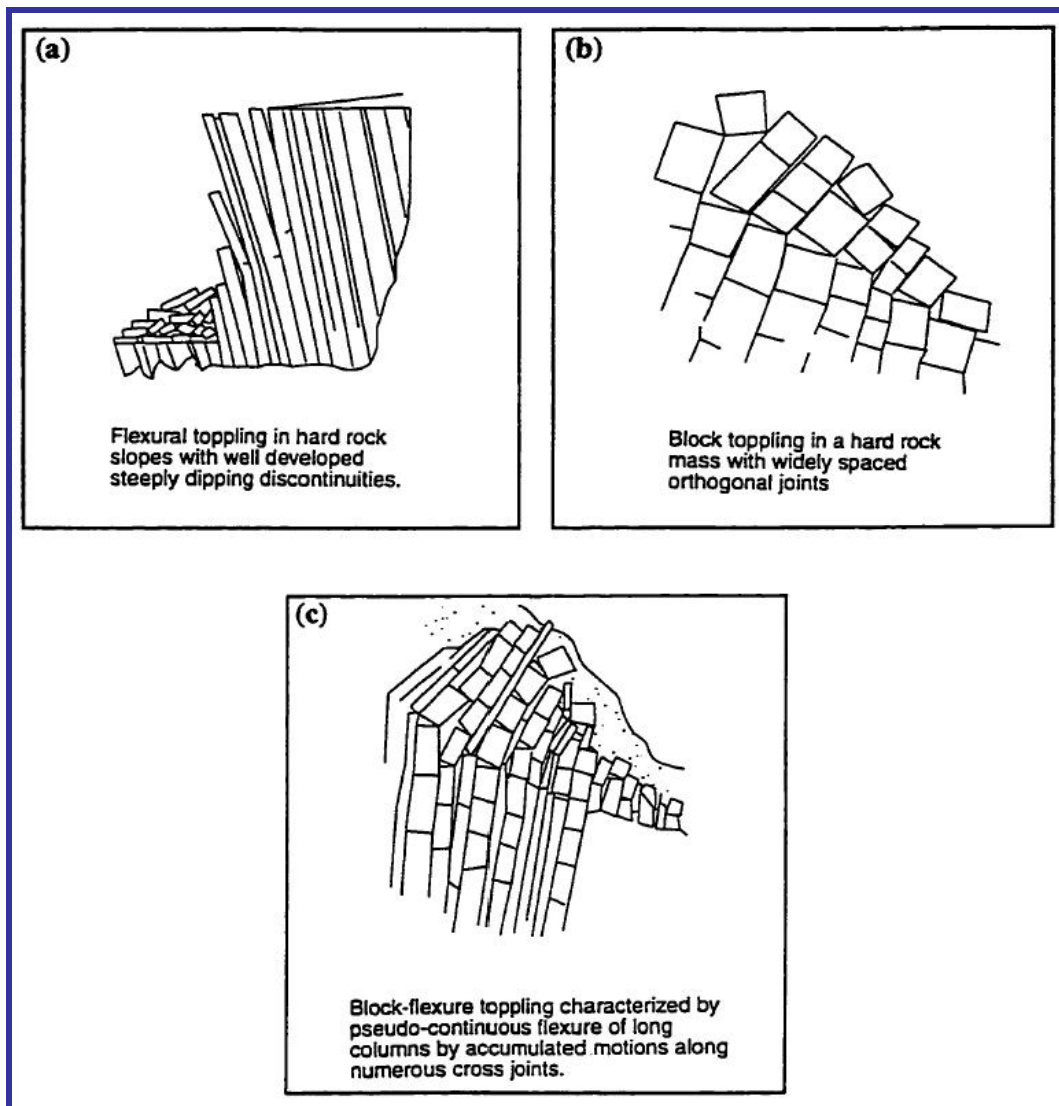


Figura 3.1. Tipos de ruptura por Tombamento (Goodman & Bray, 1976)

3.2 Tombamento Flexural

Geologicamente, o tombamento flexural ocorre com mais frequência em taludes escavados em rochas sedimentares estratificadas ou metamórficas foliadas, cujas direções da foliação ou estratificação são praticamente paralelas à direção do talude e mergulham em sentido inverso ao do mesmo. Podem ocorrer também em outros litotipos, contendo pelo menos uma família de descontinuidade que obedeça a mesma geometria descrita acima (Dilascio, 2004).

Devido à ação do peso próprio, uma série de lâminas rochosas delimitadas pelas descontinuidades pode, a depender do atrito entre elas, deslizar umas sobre as outras e fletir, levando a uma ruptura por tração na base da lâmina e, finalmente, ao tombamento das mesmas (Figura 3.1a).

Para Sjöberg (2000), a ocorrência de ruptura por tombamento em taludes de grande altura é governada principalmente por três fatores:

- Resistência e orientação das juntas;
- Resistência da rocha intacta e
- Deformabilidade (ou rigidez) do maciço rochoso.

Consequentemente se o tombamento ocorrer, primeiramente deve haver deslizamento ao longo das descontinuidades, o que irá depender da orientação e da magnitude da tensão cisalhante existente antes da ruptura.

3.3 Tombamento de Blocos

Este tipo de ruptura pelo tombamento é possível quando as colunas de rocha são divididas por juntas ortogonais amplamente espaçadas, individualizando os blocos através das descontinuidades ubíquas na inclinação no talude (Piteau e Martín, 1982), as pequenas colunas formadas no pé do talude fletem produto do derrubo das longas colunas da acima do talude, isto vai permitir a maior tombamento dos blocos. Além disso, a base do talude perturbado (superfície de ruptura) é melhor definido em comparação a tombamento flexural, que tem uma forma da escadaria (stairway) geralmente crescendo em forma de camadas unas a outras (Figura 3.1b). Esta forma da escadaria é formada por as juntas ortogonais que ocupam a posição primaria das trincas do tombamento flexural (Benko,

1997). O método mais recomendável da análise, é o equilíbrio limite sempre que é determinada a superfície de ruptura e os blocos não deformem.

3.4 Tombamento Bloco-Flexural

O tombamento bloco-flexural é um tipo de ruptura um pouco mais complexo do que os outros tipos de tombamento, porque é uma combinação de tombamento e deslizamento dos blocos (Wong *et al*, 2005). Em vez da ruptura flexural de colunas contínuas, neste caso o tombamento é resultado de deslocamentos acumulados das juntas transversais. (Figura 3.1c). Todavia, os deslocamentos sobre cada uma das juntas individualmente são de menor monta que no caso de tombamento de blocos. Resulta um meio termo entre os campos de deslocamentos, contínuo, do tombamento flexural e descontínuo, do tombamento de blocos (Hoek & Bray, 1977).

No entanto, nenhum critério claro foi proposto para tombamento bloco-flexural, especialmente para o ângulo das descontinuidades semi-horizontais (cross joints) menor que θ ($\alpha < \theta$). Os fatores que afetam a este tipo do mecanismo de ruptura são a interação entre as descontinuidades semi-horizontais e colunares, e a altura do talude no mecanismo de ruptura.

Finalmente, existem outros tipos de ruptura por tombamento, Hoek e Bray (1981) definiram o tombamento secundário (Figura 3.2) e descrito no tabela 3.1. Este tipo de ruptura é iniciado pela ruptura na parte baixa do pé do talude, pela ação de eventos naturais, erosão ou a atividade humana. A ruptura inicial envolve a deslizamento ou ruptura física da rocha o solo, e o tombamento é induzido como consequência do movimento principal.

Tabela 3.1. Mecanismos tombamento secundário (Hoek e Bray, 1981).

Tombamento e deslizamento na crista	Os blocos são delimitados pelas descontinuidades que tombam nos vazios gerados pela ruptura
Tombamento e deslizamento na base	Gerado pelo movimento do deslizamento acima dos maciços rochosos verticais. A força de cisalha do deslizamento age ao longo
Tombamento e deslizamento no pé	Consiste dois tipos de movimento: deslizamento na parte superior o qual induz ao tombamento no pé do talude.
Tombamento gerado por trincas (fendas)	Trincas desenvolvidas acima dos taludes escarpados o qual induzem ao tombamento dos blocos.
Tombamento e Queda	Acontece quando um material solo/rocha branda descansa num maciço rochoso fraturado que induz ao tombamento dos blocos.

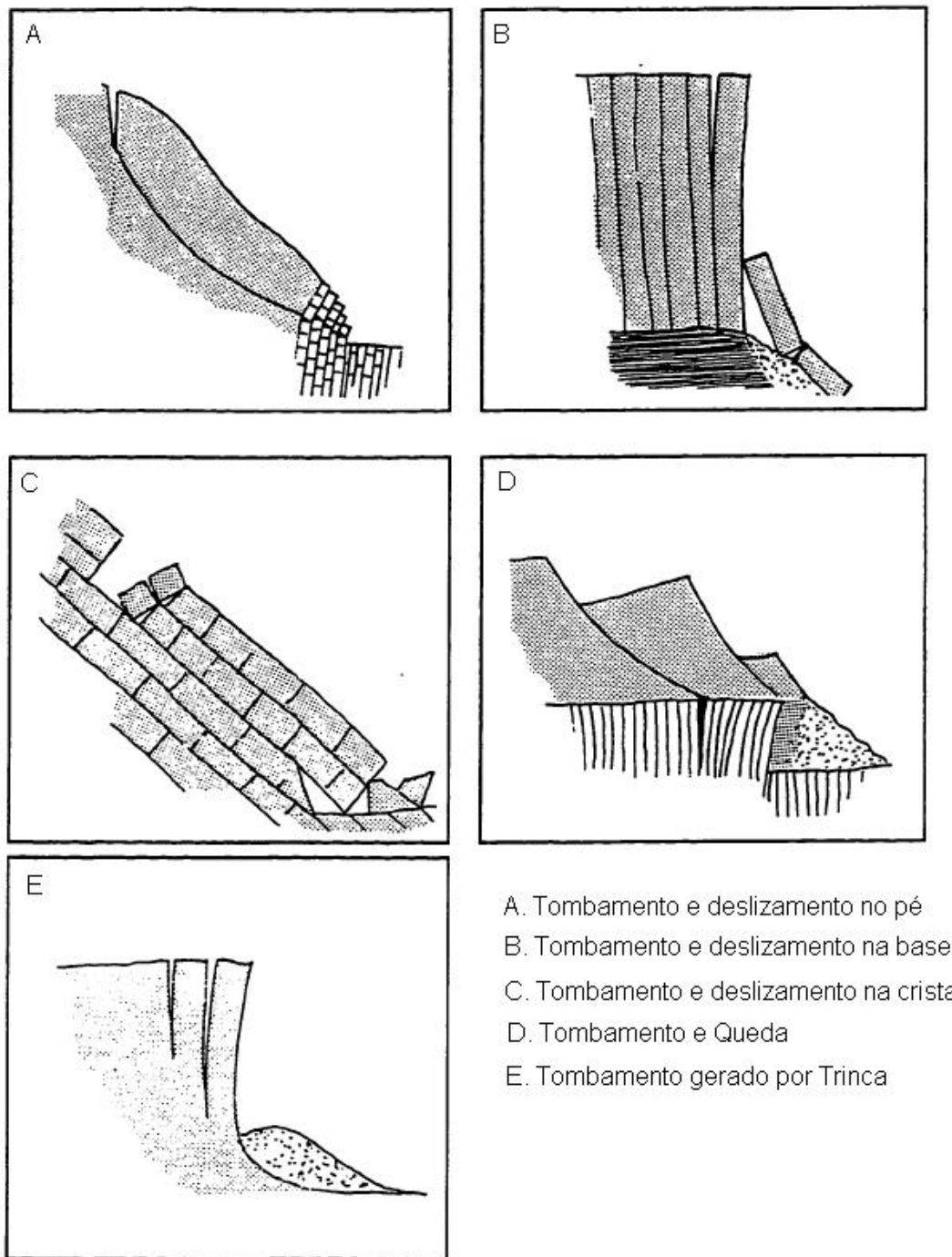


Figura 3.2. Mecanismos de ruptura e tombamento secundário (Hoek e Bray, 1981).

3.5 Revisão da Literatura

Possivelmente a mais significativa e importante paper do tombamento, como um distinto tipo de movimento, foi apresentado por De Freitas e Watters (1973), onde descrevem em detalhe três exemplos de tombamento, cada um deles em

diferentes tipos de estruturas geológicas que envolvem diferentes escalas de movimento. Eles concluíram que o tombamento não requer das condições da geologia, já que o tombamento pode acontecer amplamente em diferentes escalas e em diferentes tipos de rochas.

Existem vários trabalhos que analisam a ruptura por tombamento de grandes dimensões e seus respectivos mecanismos, tanto em observações de campo, como na modelagem numérica, vários autores descreveram o tombamento a escalas maiores, onde a deformação gravitacional a escala maior é um aspecto importante sem a formação de superfícies de ruptura.

Um deles é de Sjöberg (2000), este que simulou a ruptura por tombamento flexural através do método dos elementos finitos (UDEC) e por diferenças finitas (FLAC). Para aquele autor, além das condições geométricas básicas para a ocorrência da ruptura por tombamento, o maciço rochoso deve ter capacidade de deformação compatível com aquele mecanismo. Ele também deve possuir baixa resistência a tração para facilitar o dobramento e à consequente ruptura na base das colunas formadas. O tombamento ocorre em etapas como é mostrado na figura 3.3. Esta ruptura estaria governada inicialmente por mecanismos de cisalhamento ao longo das descontinuidades de ângulo elevado; o cisalhamento começaria no pé do talude, e este seria seguido por uma ruptura de tração na base de coluna. Finalmente, a ruptura se propagaria até a crista e a superfície de ruptura se desenvolveria.

Pritchard e Savigny (1990), descrevem que na ruptura por tombamento, a superfície de ruptura, em alguns casos, desenvolveu-se quase paralela à face do talude; em outros casos, pode ser curva, dependendo basicamente da distribuição espacial das descontinuidades no talude global. No em tanto, observações similares foram feitas por Orr et al. (1991), relatando que as rupturas por tombamento originam uma forma final amplamente circular, tanto em planta como em perfil. Assim, descrevem estas rupturas como pseudocirculares.

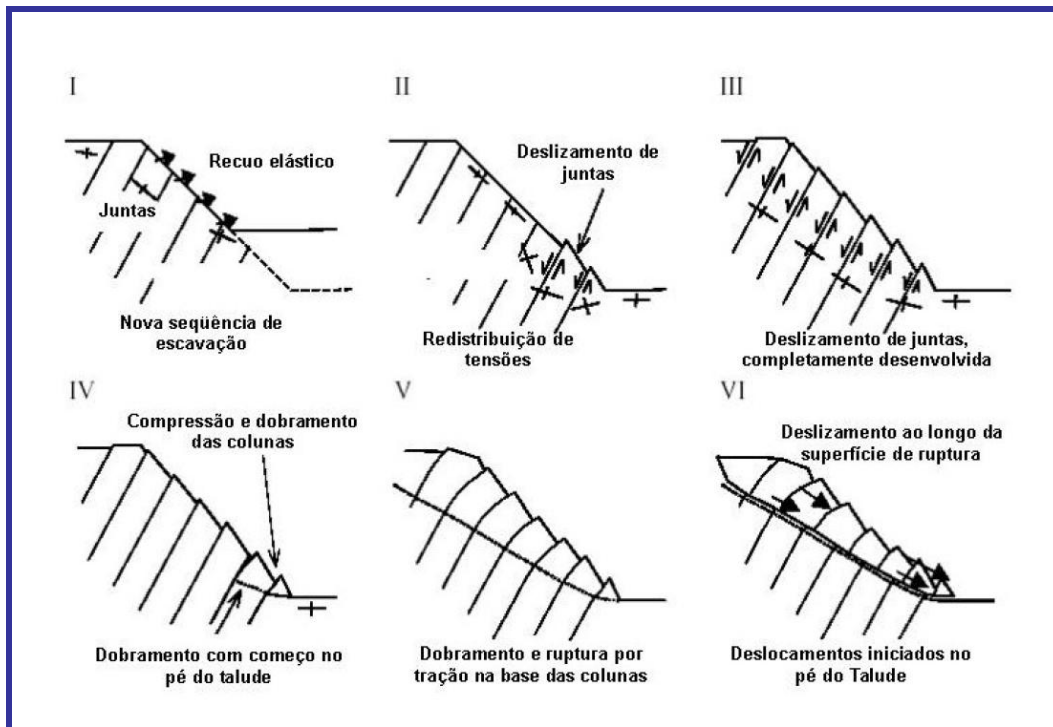


Figura 3.3: mecanismo de ruptura por tombamento flexural (Sjöberg, 2000).

3.6 Métodos de Análise

Existem diversas abordagens da análise para o fenômeno de ruptura pelo tombamento, para assim tentar modelar os mecanismos causadores da ruptura dos mesmos. Por tanto, pode-se estudar esses mecanismos de ruptura através de quatro recursos principais:

- Modelos Físicos
- Análise Cinemática
- Análise do equilíbrio Limite
- Análise Numérica

3.6.1 Modelos Físicos

O modelamento físico foi uma ferramenta analítica popular nos anos setenta e os inícios dos oitenta. Segundo os trabalhos de: Aydan e Kawamoto (1992) Wang et al. (1996), Adhikary et al. (1997) e kutter (1972). Existem três tipos de ensaios do modelamento físico para à ruptura pelo tombamento: ensaio de modelagem de inclinação, ensaio de modelagem centrífuga e ensaio de modelagem baseada na fricção da base (base friction modelling).

A vantagem em se utilizar modelos físicos é a possibilidade de simular várias situações e geometrias que não poderiam ser vistas em campo e observar o comportamento do maciço em diferentes fases da ruptura.

A grande questão dos modelos físicos é a simulação da força gravitacional. Segundo Bray y Goodman (1981) existem pelo menos três maneiras de se representar a força da gravidade:

- O modelo pode ser construído enquanto repousa em um plano horizontal ou inclinado e então tombado;
- O modelo pode ser girado em uma centrífuga e
- O modelo pode ser submetido a um equipamento chamado base friction.

No primeiro caso, os testes são difíceis de se controlar. Vibrações indesejadas, durante a Inclinação do modelo, podem, prematuramente, fazer com que “blocos chaves” sejam perdidos e, após o pico da inclinação, o modelo tende a se autodestruir.

No segundo caso o princípio da base friction é usado extensivamente para reproduzir os efeitos da gravidade em modelos físicos bidimensionais de escavações em rocha (Bray & Goodman, 1981). A força gravitacional atuando em um corpo é simulada pelo arraste de uma correia movendo-se sob o modelo.

Este tipo de modelagem é um dos métodos experimentais mais eficazes de modelo bidimensional, onde o aspecto mais importante considera o campo de gravidade (Wong et al. 2005), além disso, este método é bem conhecido e aceitado por diversos trabalhos aplicados à estabilidade de taludes (Kutter, 1972, Hammett, 1974 e Easki et al., 1993). Este tipo de método pode expressar realisticamente a ruptura, e o processo de movimento do maciço rochoso fraturado no modelo.

A maneira de se representar a gravidade no modelo pode ser vista na Figura 3.4. Suponha que uma correia seja arrastada ao longo da base de um modelo que é retido por uma barreira fixa. O arraste ao longo da base do modelo é, então, resistido por uma força F_b , atuando no plano do modelo e com sentido oposto à força de arraste.

Wong & Chiu (2001) usaram a base friction 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. Como um dos resultados eles puderam desenvolver um regime de classificação de tombamento bloco-flexural. Essa classificação leva em conta o ângulo da junta que mergulha para dentro do talude (θ) e o ângulo de uma junta de baixo ângulo (α) que cortaria a primeira, mergulhando para fora do talude. Existiriam três tipos de ruptura: tombamento, deslizamento dos blocos e uma combinação de deslizamento com tombamento.

Para $\theta \geq 125^\circ$ o deslizamento é dominante; para $\theta = 105^\circ$ e com $\alpha \leq 10^\circ$ ou $105^\circ < \theta < 125^\circ$ o tombamento é que prevalece; para $\theta < 105^\circ$ ou $\theta = 105$ e com $\alpha > 10^\circ$ ocorre uma combinação de tombamento de blocos com deslizamento dos mesmos.

Segundo Goodman (1976) e Jiang et al, (1995), 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) é método dos elementos distintos (DEM).

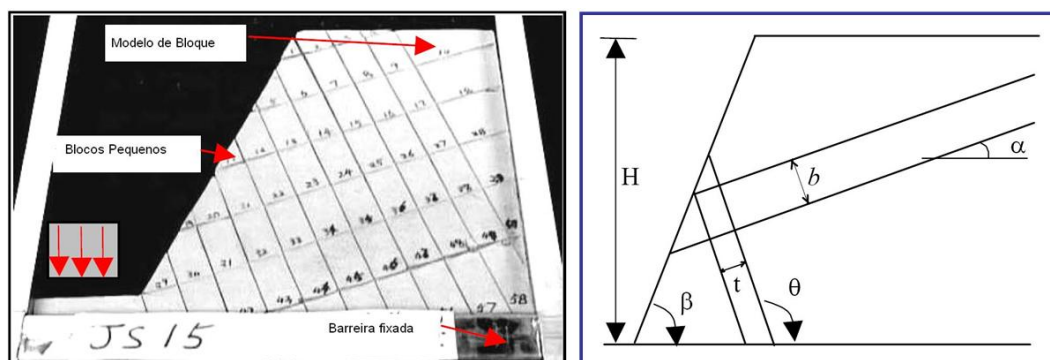


Figura 3.4: Modelo esquemático da base friction mostrando a barreira, o modelo simulado e a correia de lixa (Wong & Chiu, 2001).

3.6.2 Análise Cinemático

O análise cinemático foi proposto por Goodman e Bray (1976), como uma ferramenta para determinar rapidamente se o tombamento é possível, utilizando a stereonet plot. Para que a rotura por tombamento possa ocorrer o azimuth da recta de maior declive das discontinuidades, mergulhando no sentido oposto ao do pendor da face do talude, não deve divergir mais que cerca de 20° do azimuth da recta de maior declive do plano da face. Só nestas circunstâncias se podem formar séries de blocos de forma paralelepédica (placas) cujas faces de maior

desenvolvimento possuam azimute paralelo, ou próximo, do azimute do plano da face.

Também, o pendor dos planos das discontinuidades deve ser suficientemente elevado para que o escorregamento entre placas possa ocorrer. Se as faces das camadas tiverem um ângulo de atrito ϕ_j , então o escorregamento só ocorrerá se a direcção das tensões de compressão aplicadas fizer com a normal às discontinuidades um ângulo superior a ϕ_j . Como a direcção da tensão principal máxima numa escavação é paralela à face do corte (pendor ψ_f), então o escorregamento entre camadas e a rotura por tombamento ocorrerá em planos de discontinuidades com pendor ψ_p (normal com pendor $\psi_{np} = 90^\circ - \psi_p$) quando for verificada a condição: $(90^\circ - \psi_f) + \phi < \psi_p$, ou seja, $\psi_{np} < \psi_f - \phi$. Estas condições relativas à orientação dos planos das discontinuidade que podem determinar roturas por tombamento são mostradas na figura 3.5. Além disso, Goodman (1989), sugere que o tombamento pode acontecer só se a direcção das discontinuidades estão relativamente paralelas a direcção da superfície do talude dentro de 30° (10° mais que a figura 3.5). Porém, Cruden (1989), sugere que o tombamento flexural pode acontecer, quando as discontinuidades mergulham na mesma direcção do talude, senão mais que o talude e o ângulo do atrito das discontinuidades.

Assim, tal como se mostra na Figura 3.6, um talude será potencialmente instável quando, na área de projecção, o ponto que representa a recta de intersecção dos dois planos cai dentro da zona crítica delimitada pela circunferência definida pelo ângulo de atrito ϕ (círculo de atrito) e é exterior ao “círculo maior” que representa a face do talude. Hoek e Bray (1981) definiu as condições básicas para o deslizamento de tombamento de um bloco simples em um plano inclinado (figura 3.6). A figura está dividida em 4 regiões delineadas pela linha onde o mergulho da discontinuidade é igual ao ângulo do atrito ($\beta = \phi$). A curva pontilhada que separa as regiões, no lado esquerdo da curva, o tombamento não é possível. No lado direito o tombamento é possível. Os termos t e h representam respectivamente a espessura e a altura do bloco; o razão t/h é conhecido como a razão de esbeltez (slenderness). As 4 regiões são definidas enquanto segue:

- Região 1: $\psi < \phi$ y $t/h > \tan \psi$; o bloco é estável e não deslizará nem tombara.
- Região 2: $\psi > \phi$ y $t/h > \tan \psi$; o bloco deslizará, mas não tombara.
- Região 3: $\psi < \phi$ y $t/h < \tan \psi$; o bloco tombara, mas não deslizará.
- Região 4: $\psi > \phi$ y $t/h < \tan \psi$; o bloco pode deslizar e tombar simultaneamente.

3.6.3

Análise de equilíbrio limite

A análise de equilíbrio limite foi desenvolvida por Goodman e Bray (1976), seu uso é amplamente conhecida na pratica da engenharia. Os princípios básicos de este método são mostrados na figura 3.7. O talude é dividido como uma serie de blocos em uma base de forma da escadaria que é formado por as juntas ortogonais que ocupam a posição primaria das trincas do tombamento. As forças que atuam na parte mais alta do bloco são resolvidos dentro de forças paralela e normal a seu base.

As roturas por tombamento podem dar-se quando as discontinuidades mergulham para o interior do talude e originam um bloco único, ou uma série blocos paralelepédicos (e/ou tabulares) formando “placas”, tal que o centro de massa do bloco caia fora da base (Figura 3.7). Estas condições para o tombamento verificam-se quando o plano da face do talude e os planos das discontinuidades mergulham em sentidos opostos com pendores elevados, tendo as respectivas linhas de nível azimutes idênticos.

A experiência têm demonstrado que movimentos significativos podem ter lugar quando as “placas” se deslocam horizontalmente, mas a rotura global do talude não ocorrerá antes de se verificar a rotura dos blocos do pé do talude, actuando estes como elementos chave que se opõem à instabilização do talude. Como o deslocamento total que antecede a rotura global do talude pode rapidamente exceder o valor limite admissível do deslocamento para a maioria das superestruturas, torna-se importante identificar as estruturas geológicas que podem desencadear o tombamento.

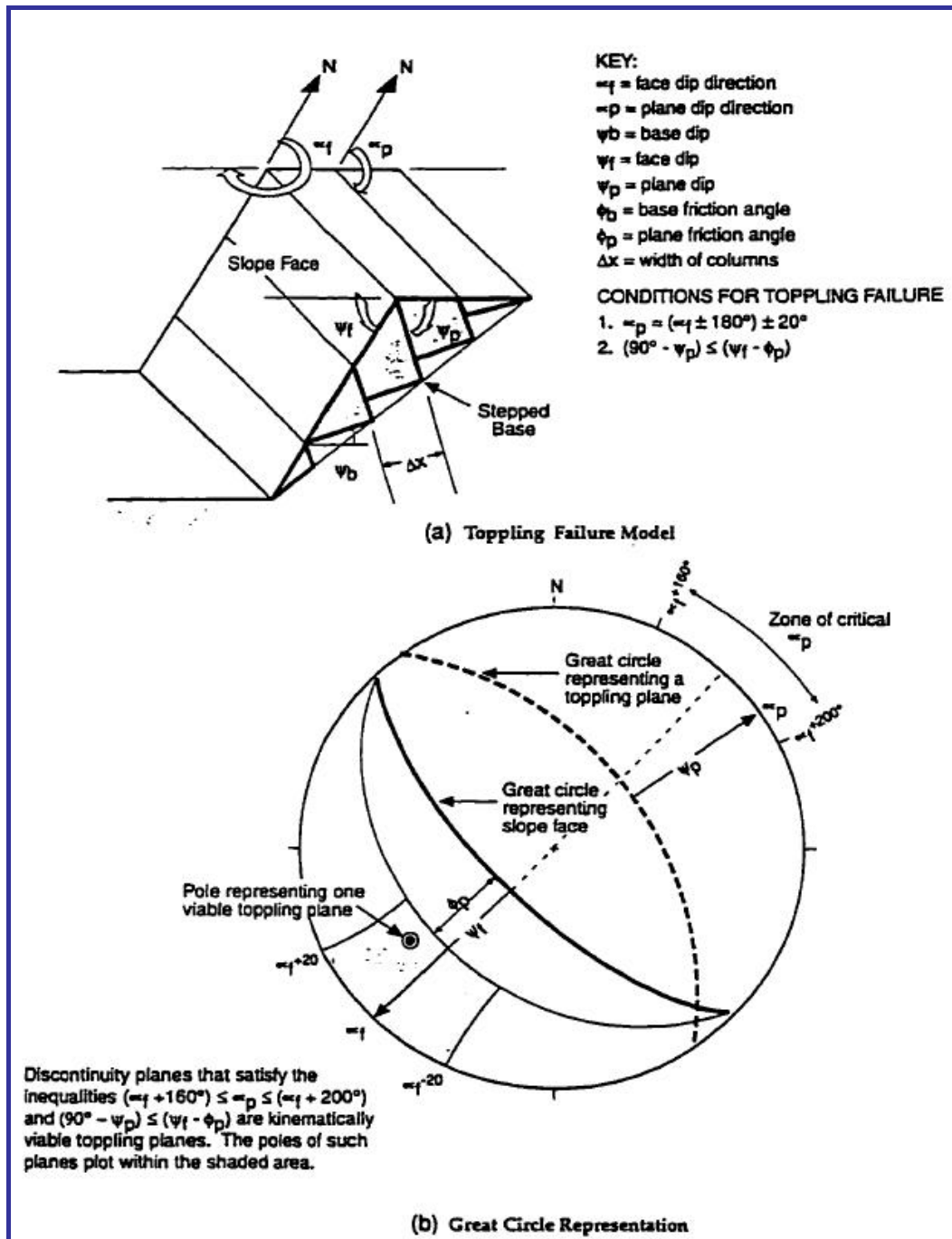


Figura 3.5: Análise cinemática para a ruptura pelo tombamento (Norris & Wyllie, 1996)

A análise de estabilidade envolvendo blocos susceptíveis de tombamento, consiste no exame das condições de estabilidade de cada bloco a partir da parte superior do talude. O bloco pode encontrarse numa de três situações possíveis: estável, instável em relação ao deslizamento pela base e instável em relação ao movimento de derrube.

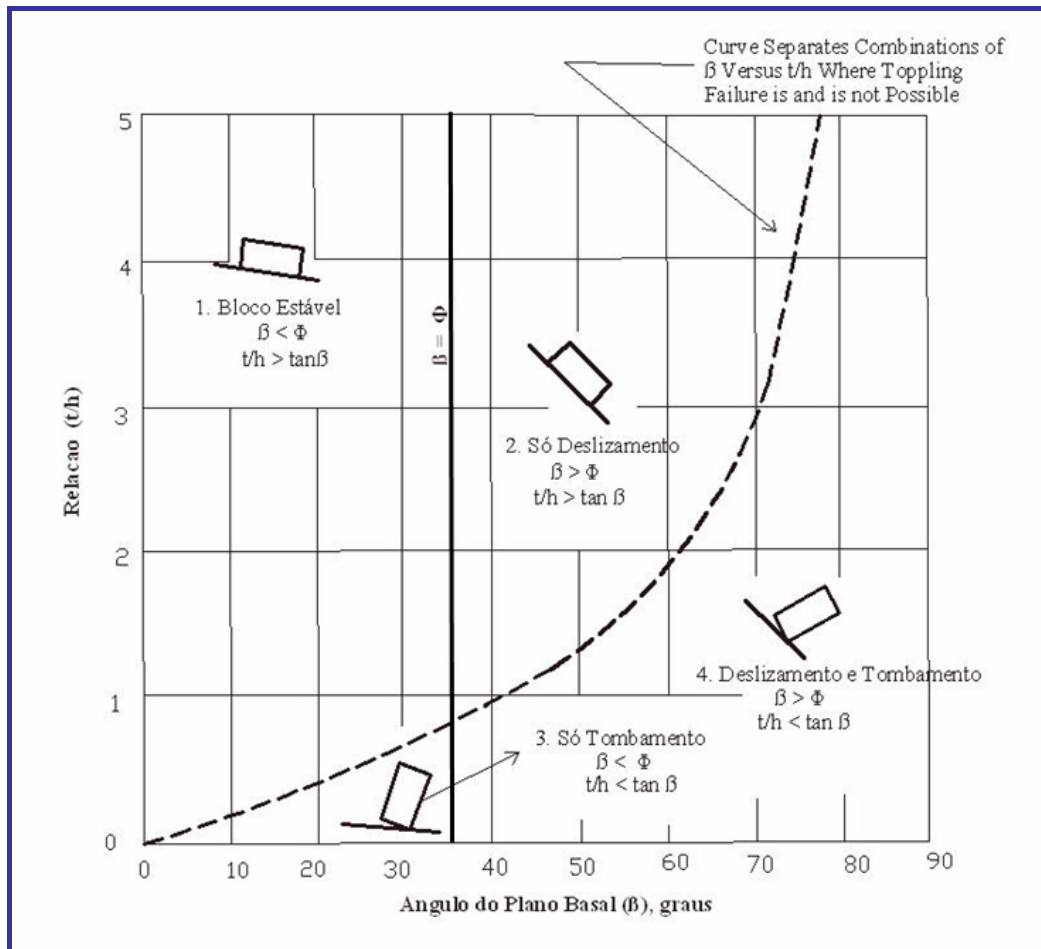


Figura 3.6: Condições de estabilidade em função da geometria dum bloco paralelepipedico sob acção do peso próprio (Hoek e Bray, 1981).

Cada uma destas situações depende das dimensões do bloco, dos parâmetros de resistência ao deslizamento das respectivas faces e das forças externas nele actuando. Por exemplo, os blocos baixos da crista do talude representado na Figura 3.7 para os quais o centro de massa cai dentro da base serão estáveis, desde que o ângulo de atrito da base seja superior ao pendor do plano base. Contudo, blocos esbeltos para os quais o centro de massa caia fora da base podem tombar, dependendo tal das restrições impostas pelas forças aplicadas em ambas as faces do bloco. Se o bloco não tomba, gera um impulso sobre o bloco contíguo inferior. Se o bloco seguinte é também esbelto pode tombar como resultado daquele impulso, mesmo considerando que o seu centro de massa possa situar-se no plano da base. Na proximidade da base do talude, onde os blocos são baixos e não tombam o impulso produzido pelos blocos superiores pode ser suficientemente elevado para causar o deslizamento destes blocos, resultando daí que todo o talude seja instável. Contudo, se os blocos do pé do talude não

deslizarem nem tombarem, os blocos acima podem sofrer deslocamentos significativos, mas daí não resultando uma rotura global.

O primeiro passo na análise de estabilidade consiste na determinação das dimensões de todos os blocos, definindo a respectiva largura Δx e altura y_n (Figura 3.7). Então, partindo do topo na direcção do pé do talude, são calculadas as forças actuando em cada bloco. Estas forças compreendem:

- O peso W_n do bloco n
- A força P_n produzida como resultado do tombamento do bloco $(n+1)$ imediatamente acima
- A reacção P_{n-1} proveniente do bloco $(n-1)$ imediatamente abaixo
- Forças de atrito desenvolvidas nas faces laterais dos blocos
- Forças normais R_n e tangenciais S_n actuando na base do bloco
- Pressões da água actuando nas faces e base dos blocos, com magnitudes determinadas pelas grandezas Y_w e Z_w .

Para a análise de estabilidade, deve adoptar-se uma marcha de cálculo em que, em primeiro lugar, por decomposição do conjunto de forças actuantes no bloco nas componentes perpendicular e paralela à base, são determinadas as resultantes das forças normal (R_n) e tangencial (S_n) que actuam na base.

Note-se que se os blocos do pé do talude deslizam, então o talude será instável. Contudo mesmo que o bloco (ou blocos) do pé do talude seja estável impedindo a rotura global do talude, poderão registar-se deslocamentos significativos dos blocos mais altos que têm tendência para bascular.

Tendo calculado as forças actuando em cada bloco, é possível determinar o factor de segurança do talude através dum processo iterativo como a seguir se explica. Os ângulos de atrito são progressivamente feitos variar até serem encontradas as condições de equilíbrio limite (eminência do escorregamento) do bloco inferior. O ângulo de atrito necessário ao equilíbrio limite é ϕ_r e se o ângulo de atrito na base dos blocos for ϕ_b , então o factor de segurança será dado por:

$$FS = \frac{\tan \phi_b}{\tan \phi_r} \quad 3.1$$

Porém, Pritchard (1989), resumiu as limitações da análise pelo equilíbrio limite que são:

- Nenhum bloco pode rotar ou deslizar simultaneamente.
- Só as colunas contínuas 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 (não deformável).
- A localização e mergulho do plano basal de ruptura devem ser assumidos prévio 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.

Pritchard e Savigny (1990), referem que todas estas limitações faladas acima estão restritas ao método de análise dos pequenos blocos, onde o processo é limitado a superfície planar de ruptura com deformação por cisalhamento das juntas é a separação deles. Não obstante das limitações, o método de equilíbrio limite, com ou sem modificações, tem sido provado que é útil em analisar o tombamento dos taludes em uma boa quantidade de projetos da engenharia (Willye, 1980; Piteau et al., 1981; Hoek e Bray, 1981; Teme e West, 1983; Scavia et al., 1990).

Existe outro método de análise de estabilidade para taludes rochosos sujeitos a tombamento flexural, desenvolvido por Aydan & Kawamoto em 1987, considera as fatias lâminas rochosas como placas engastadas a uma certa profundidade e submetidas à força de gravidade e forças laterais. e que a ruptura irá ocorrer em sobre um plano inclinado definido pelos engastes das várias lâminas (plano basal), para cima, normal ao mergulho das descontinuidades (Figura 3.8).

Assume-se também que:

- a força lateral atua no ponto χh_i da coluna, onde, h_i é a altura do lado correspondente da coluna considerada, i é o número da coluna e $\chi \in (0,1)$ é um parâmetro definindo o ponto de aplicação relacionamento da distribuição de forças entre colunas, comum a todas colunas;
- um estado de equilíbrio-limite existe simultaneamente em todas as colunas ao longo do futuro plano basal de ruptura, ao menos imediatamente antes da ruptura ocorrer;

- no estado limite, a tensão de tração máxima atuando em cada coluna ao longo do futuro plano de ruptura é igual à resistência à tração do material;
- as forças laterais, normais e paralelas à cada coluna, são relacionadas por meio do critério de resistência de Mohr-Coulomb, admitindo-se a coesão nula.

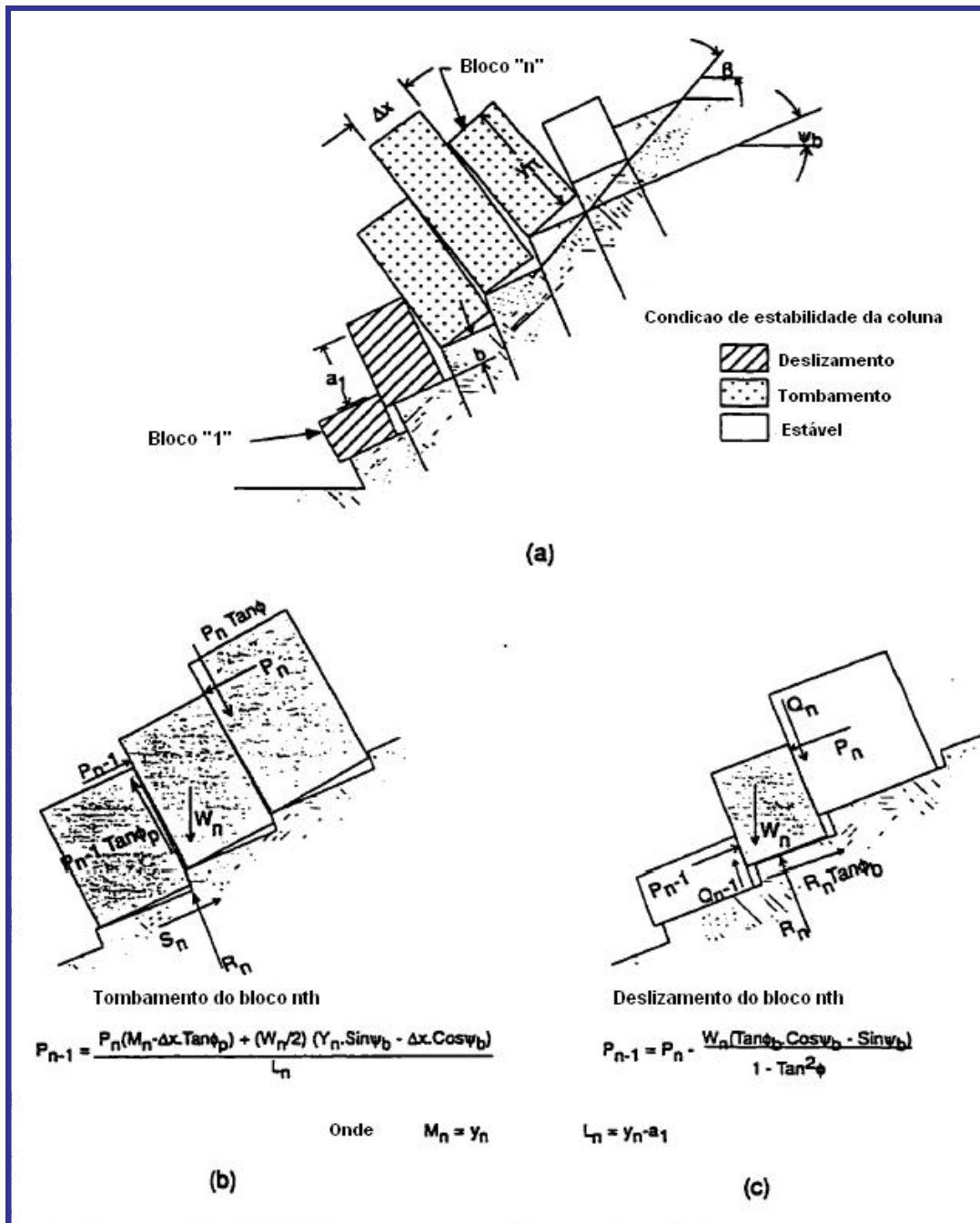


Figura 3.7: Princípios do equilíbrio limite para a análise de tombamento (Hoek e Bray, 1981)

A partir dessas suposições, cada fatia lâmina pode ser sendo tratada como uma coluna onde atuam a força da gravidade, forças laterais, pressões de água e momentos (Figura 3.8) chega-se a:

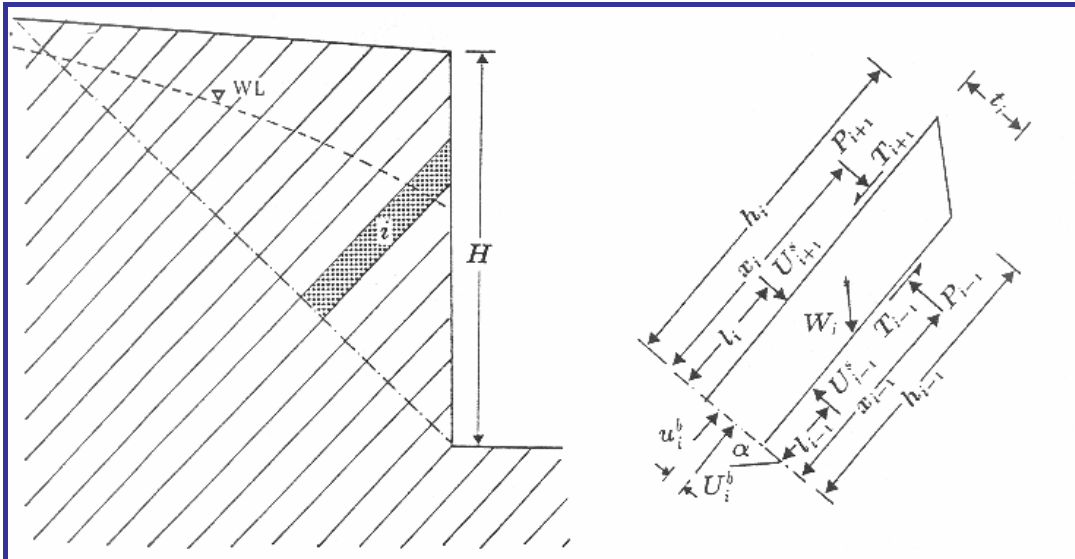


Figura 3.8: Modelo para análise de equilíbrio-limite do tombamento flexural (Aydan & Kawamoto,1992)

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1}(\chi h_i - \mu t_i/2) + S_i h_i/2 + \{u_i^b l_{bi} + U_{i+1}^s l_i - U_{i-1}^s l_{i-1}\} - 2l_i/t_i(\sigma_i/FS + (N_i - U_i^b)/A_i)}{(\chi h_{i-1} + \mu t_i/2)}$$

Onde:

$$N_i = W_i \cos \alpha$$

$$S_i = W_i \sin \alpha$$

$$W_i = \gamma t_i (h_i + h_{i-1})/2$$

$$A_i = t_i s$$

U_{i+1}^s = força da água no lado i+1

U_{i-1}^s = 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

t_i = espessura da coluna

α = inclinação do plano basal

Aplicando sucessivamente a equação acima, a todas as lâminas a partir do topo do talude, nas quais haja instabilidade ao tombamento ($P_{i-1} > 0$), obtém-se, finalmente, um critério válido para a condição global do mesmo, a saber:

se $P_0 < 0$, estável;

se $P_0 = 0$, equilíbrio-limite;

se $P_0 > 0$, instável.

O método de Aydan & Kawamoto (1992) teve sua concepção motivada a partir de observações feitas em modelos do tipo base friction. Posteriormente, Adhikary et al. (1997) validaram, em grande parte, as hipóteses envolvidas na formulação, por meio de um extenso programa de ensaios em modelos físicos centrifugados. Estes mesmos autores apresentaram, ainda, uma série de ábacos de projeto, baseados essencialmente na formulação em questão, mas com pequenas modificações sugeridas por seus próprios resultados experimentais (um plano basal inclinado de 10° a 12° acima daquele normal às descontinuidades e um valor ligeiramente diferente para c). O método de Aydan & Kawamoto (1992), tanto quanto é de conhecimento do autor, vem a ser o único modelo analítico disponível para análise do tombamento flexural.