

# Estabilidade de Taludes

GEOTECNIA II

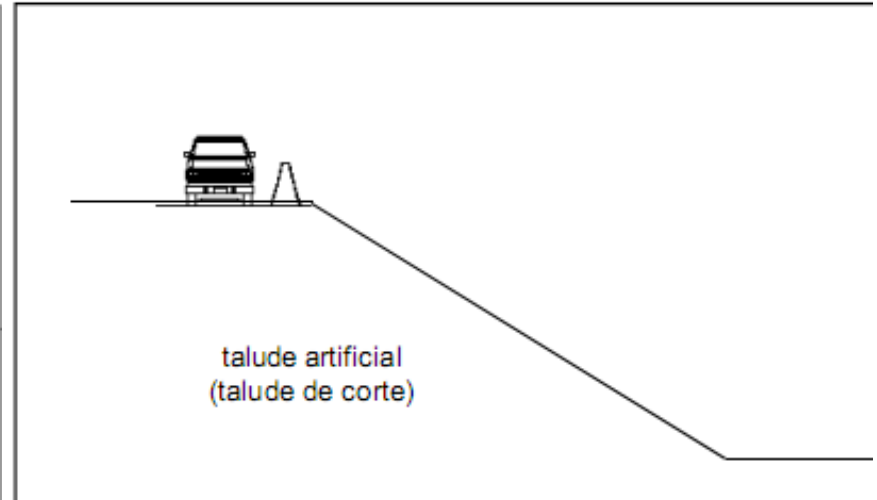
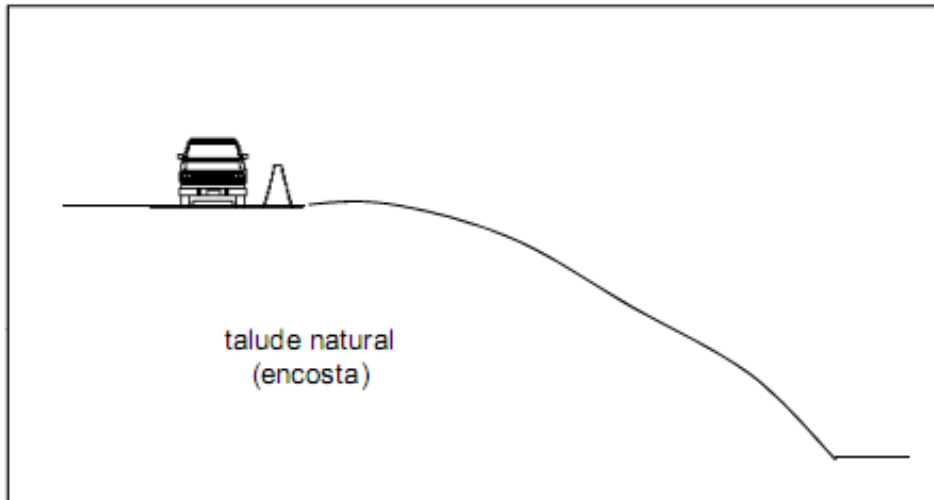
SLIDES 14

*Prof. MSc. Douglas M. A. Bittencourt*  
prof.douglas.pucgo@gmail.com



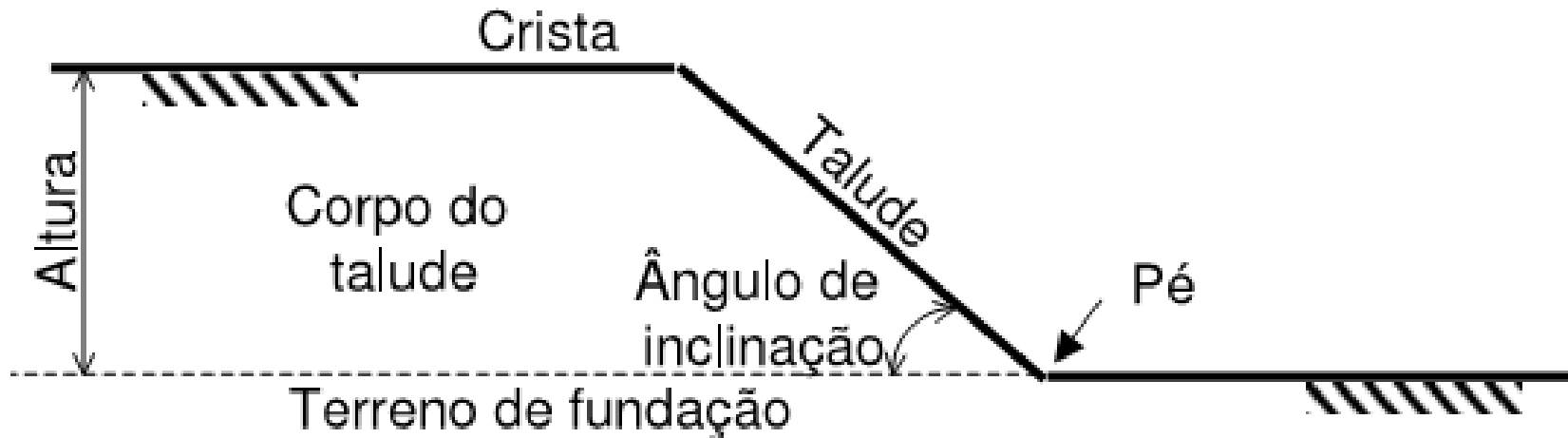
# Introdução

Chama-se **talude** a qualquer **superfície inclinada** em relação a horizontal que delimita uma massa de solo, rocha ou outro material qualquer (minério, escória, lixo etc.). Podem ser **naturais** (encostas) ou **construídos pelo homem** (cortes e aterros).



# Introdução

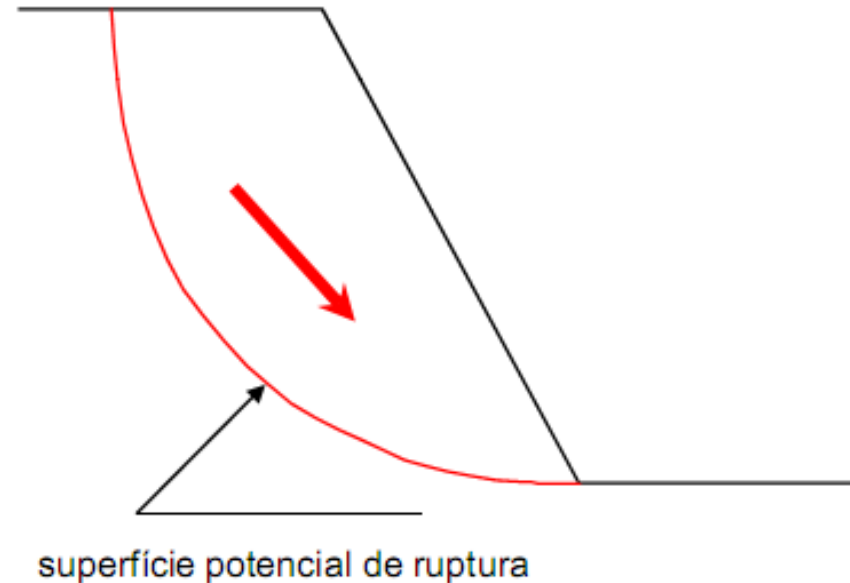
- Nomenclatura dos elementos de um talude



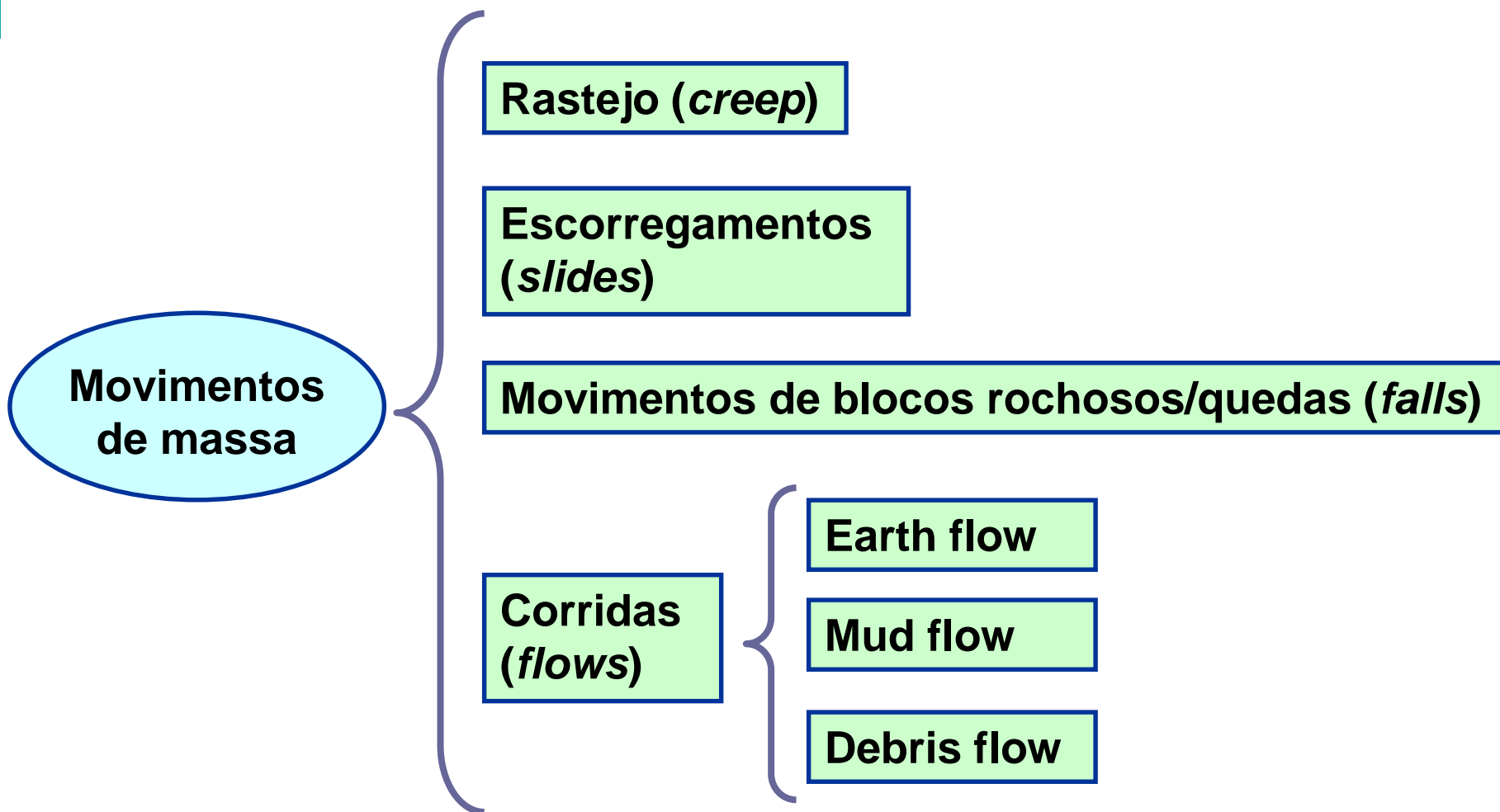
**Inclinação do talude  $\Rightarrow$  H:V**

# Introdução

Sob condições específicas, uma porção do material de um talude pode **deslocar-se em relação ao maciço restante**, desencadeando um processo genericamente denominado de **movimento de massa**, ao longo de uma dada superfície chamada **superfície de ruptura**.

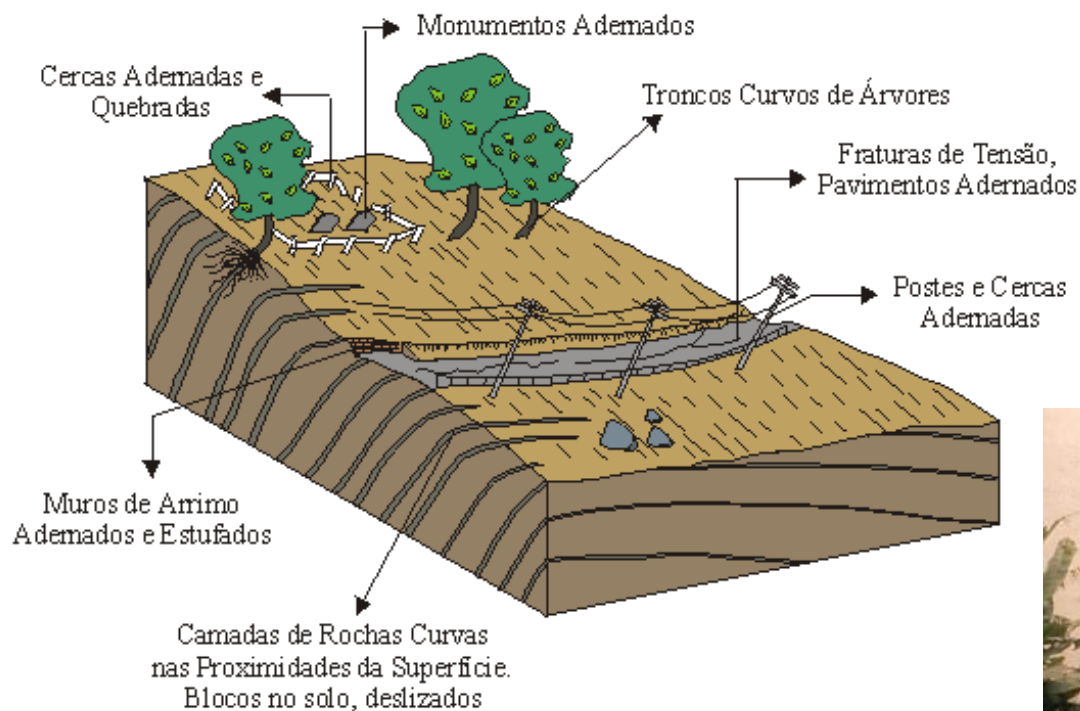


# MOVIMENTOS DE MASSA



# MOVIMENTOS DE MASSA

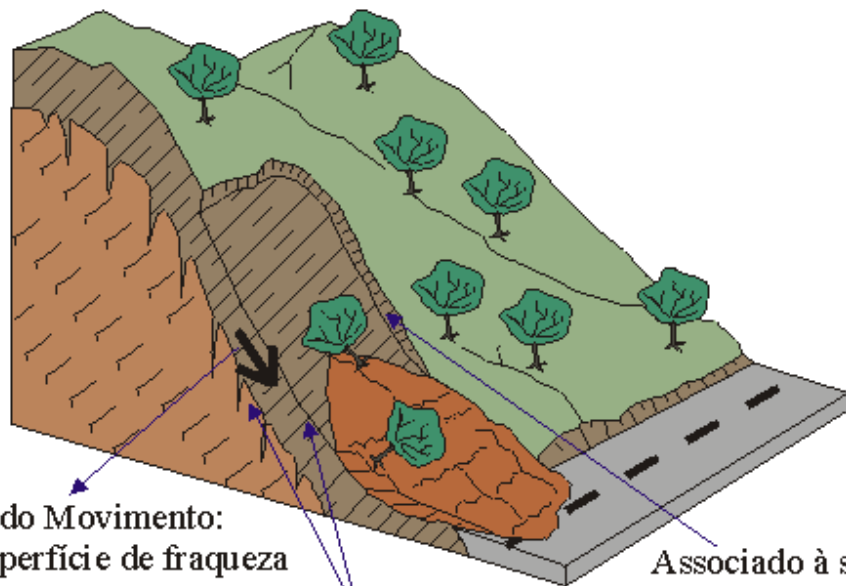
## Rastejo (*creep*)



# MOVIMENTOS DE MASSA

## Escorregamentos (*slides*)

### Escorregamento Planar (Translacionais)



Sentido do Movimento:  
paralelo a superfície de fraqueza

Associado à solos  
pouco espessos

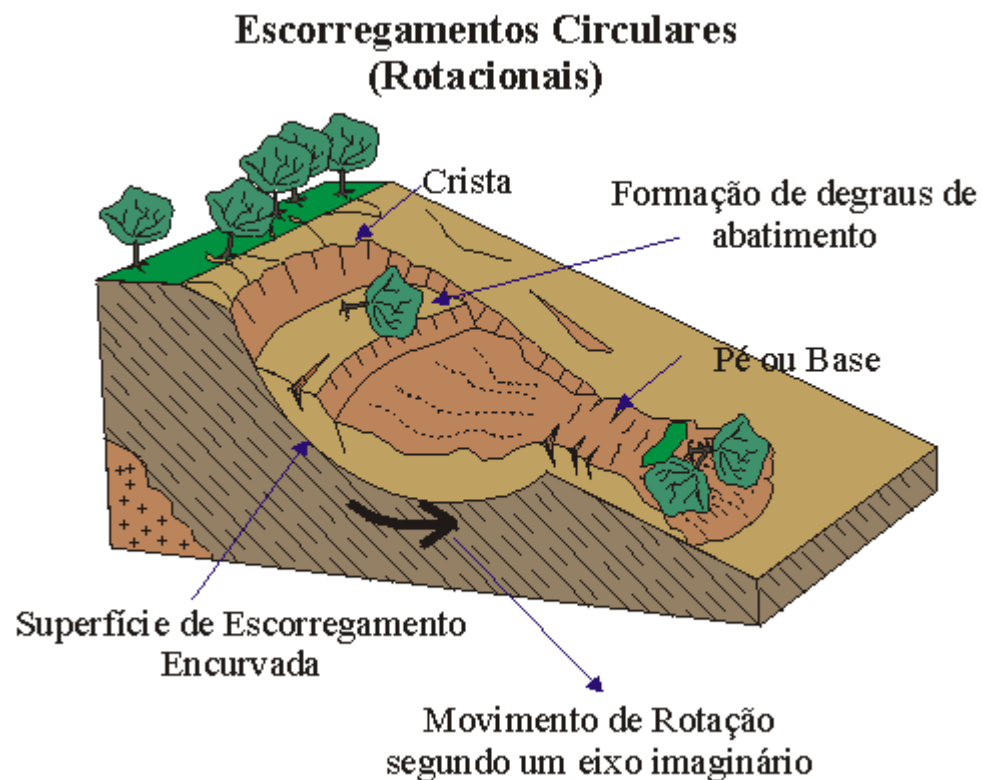
Ruptura ao longo de  
superfícies de fraqueza  
(xistosidade, foliação, etc)





# MOVIMENTOS DE MASSA

## Escorregamentos (*slides*)

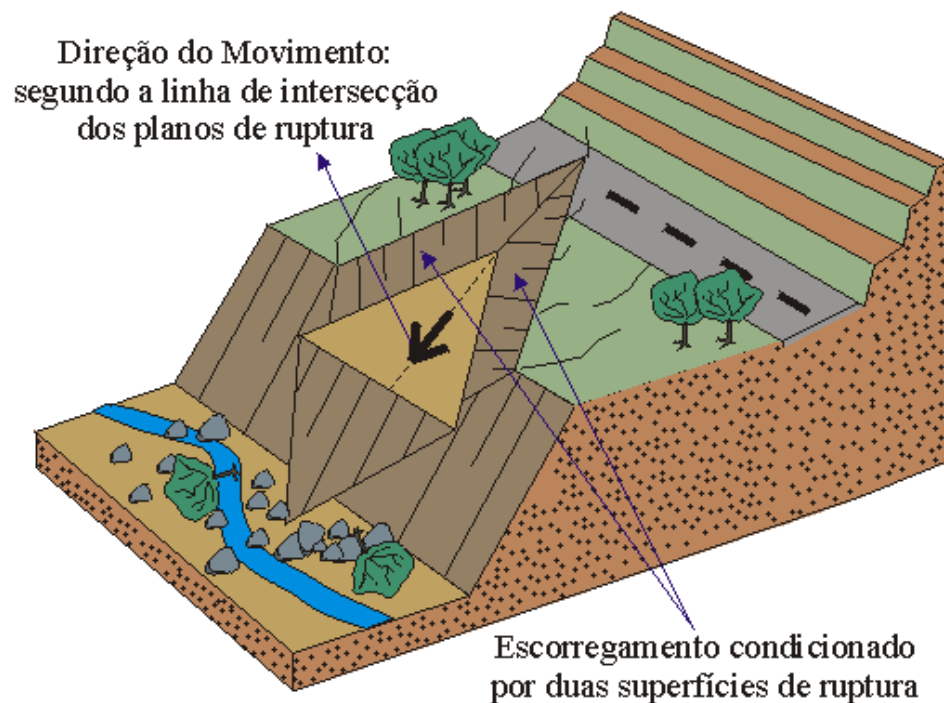




# MOVIMENTOS DE MASSA

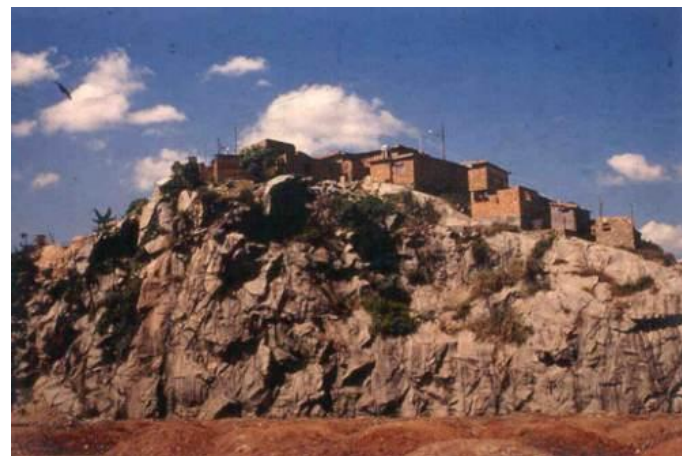
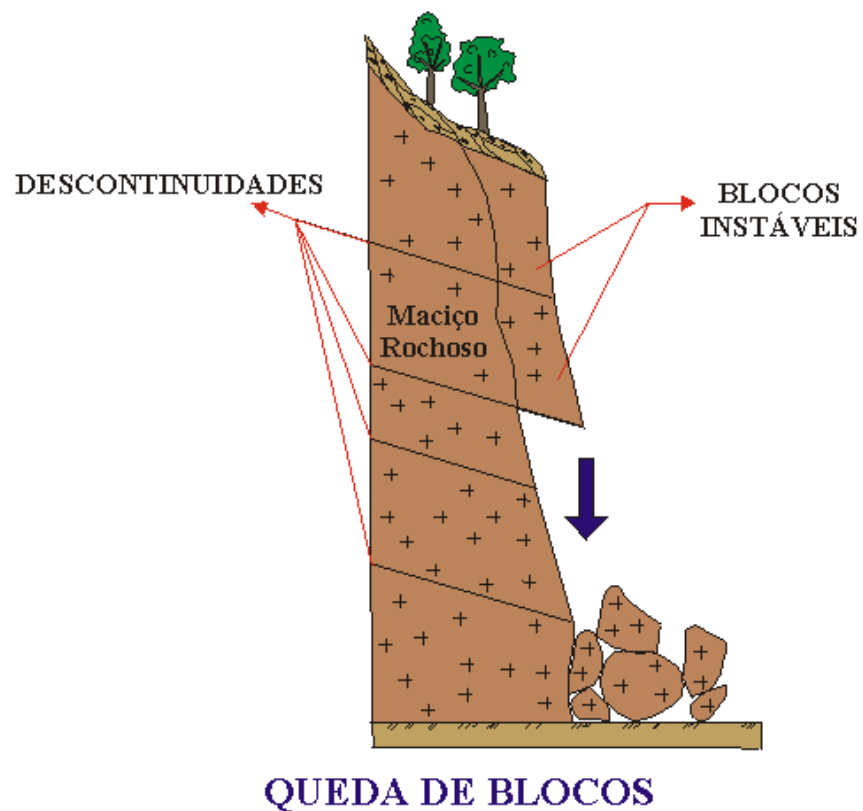
## Escorregamentos (*slides*)

### Escorregamento em Cunha



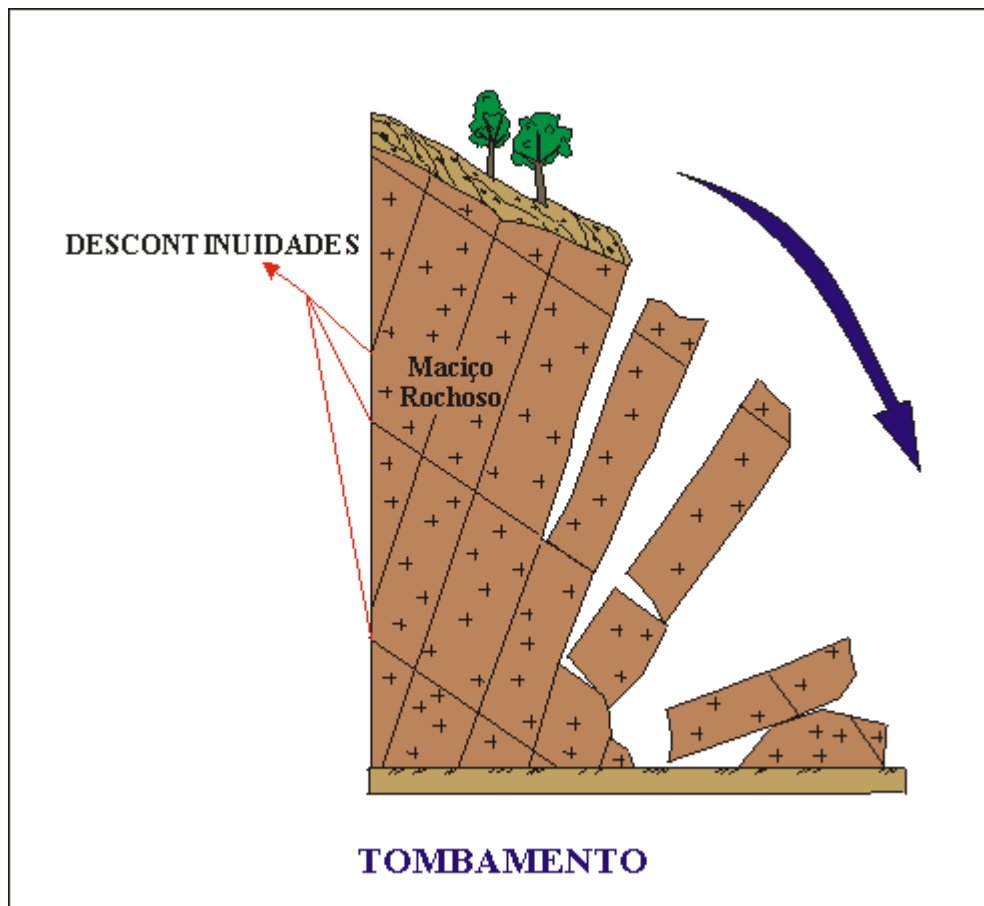
# MOVIMENTOS DE MASSA

## Movimentos de blocos rochosos/quedas (*falls*)



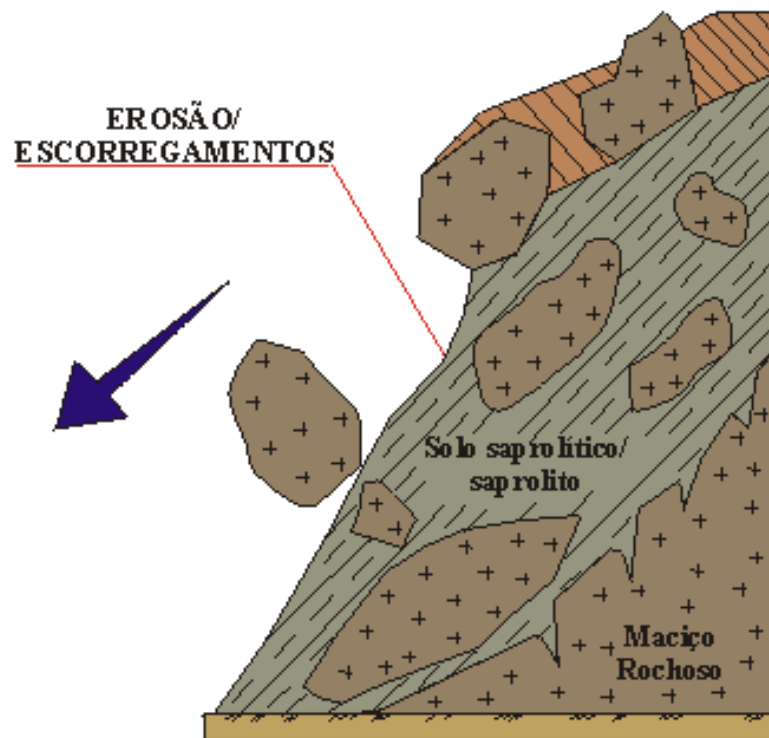
# MOVIMENTOS DE MASSA

## Movimentos de blocos rochosos/quedas (falls)



# MOVIMENTOS DE MASSA

## Movimentos de blocos rochosos/quedas (falls)

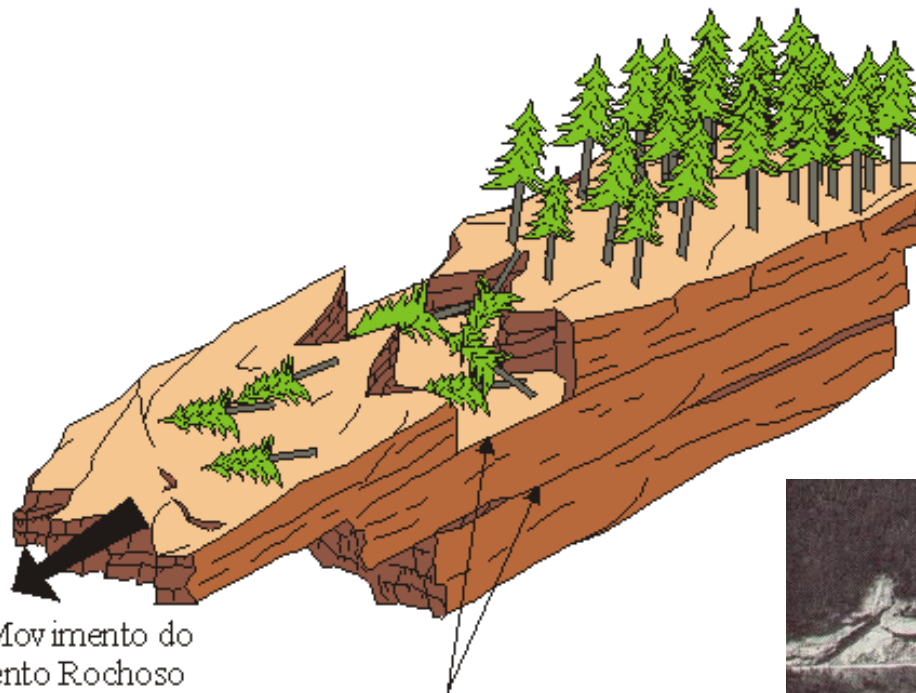


ROLAMENTO DE BLOCOS



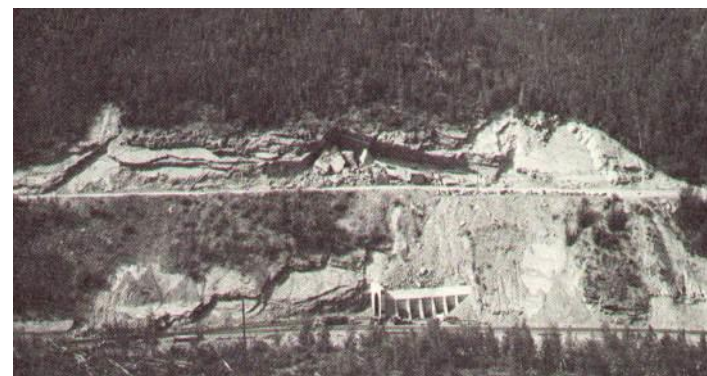
# MOVIMENTOS DE MASSA

## Movimentos de blocos rochosos/quedas (*falls*)



Sentido de Movimento do  
Deslocamento Rochoso

Superfícies Geológicas  
(Acamamento, Xistosidade, etc)  
com alto ângulo de mergulho





# MOVIMENTOS DE MASSA

## Corridas (*flows*)



***Mud flow***



***Earth flow***



***Debris flow***

***Debris flow***



# Classificação dos movimentos de massa

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
<b>Rastejo (creep)</b>	Vários planos de deslocamento (internos)
	Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade
	Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes
	Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada
	Geometria indefinida
<b>Escorregamentos (slides)</b>	Poucos planos de deslocamento (externos)
	Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)
	Pequenos a grandes volumes de material
	Geometria e materiais variáveis
	<b>Planares:</b> solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza
	<b>Circulares:</b> solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas
	<b>Em cunha:</b> solos e rochas com dois planos de fraqueza



# Classificação dos movimentos de massa

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
<b>Quedas (falls)</b>	Sem planos de deslocamento
	Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado
	Velocidades muito altas (vários m/s)
	Material rochoso
	Pequenos a médios volumes
	Geometria variável: lascas, placas, blocos etc
	Rolamento de matacão
Tombamento	
<b>Corridas (flows)</b>	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa de movimentação)
	Movimento semelhante ao de um líquido viscoso
	Desenvolvimento ao longo das drenagens
	Velocidades médias a altas
	Mobilização do solo, rocha, detritos e água
	Grandes volumes de material
	Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

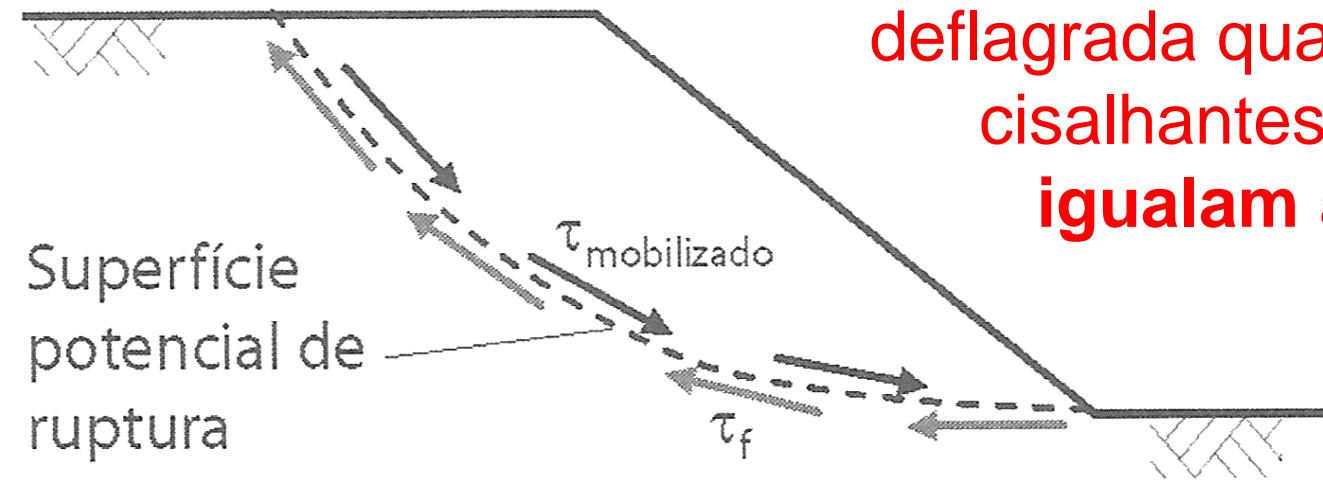
# Movimentos de Massa

## ■ Forças atuantes em um talude

- Forças **instabilizadoras**
  - Induzem o movimento de massa ao longo da superfície de ruptura por meio das tensões cisalhantes mobilizadas
    - Comumente forças gravitacionais e/ou de percolação
- Forças **resistentes**
  - Se opõem a ação do movimento de massa, em função da resistência ao cisalhamento do material

# Movimentos de Massa

A instabilidade do talude é deflagrada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se **igualam** à resistência ao cisalhamento.



$$\text{Fator de segurança} = \frac{\tau_f}{\tau_{\text{mob}}} = 1; \text{ onde:}$$

$\tau_f$  = resistência ao cisalhamento

$\tau_{\text{mob}}$  = tensões cisalhantes mobilizadas

# Exemplo de ruptura de talude: Salvador (BA) - 2005



- 26/08/2005 – Motoristas observam uma lombada no trecho.
- 27/08/2005 – Meio dia: interdição da avenida. Asfalto elevado em 30 cm.  
Noite: Elevação de 1,5 m.
- 28/08/2005 – Elevação de 3,0 m e aumentando...

# Estabilidade de taludes

## ■ Influência da água intersticial:

- ❑ aumento do peso específico do solo pela retenção parcial das águas de infiltração
- ❑ desenvolvimento de poropressões no terreno, com consequente redução das tensões efetivas
- ❑ eliminação da coesão aparente (sucção) em solos não saturados
- ❑ perda da cimentação existente entre as partículas de solo
- ❑ introdução de uma força de percolação na direção do fluxo, que tende a arrastar as partículas do solo

# Estabilidade de taludes

## ■ Ação Antrópica:

- ❑ execução de cortes com geometria incorreta
- ❑ execução deficiente de aterros (geometria, compactação e fundação)
- ❑ lançamento de lixo, entulho nas encostas ou nos taludes
- ❑ remoção da cobertura vegetal
- ❑ lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas
- ❑ vibrações produzidas por tráfego pesado, explosões etc

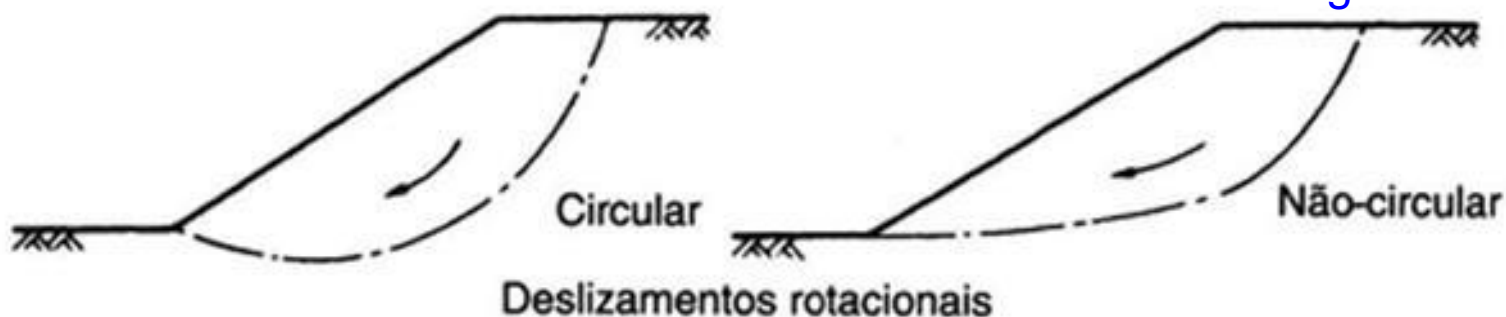
# Estabilidade de taludes

## Formas de ruptura de um talude de terra

### Ausência de uma descontinuidade em profundidade:

materiais homogêneos

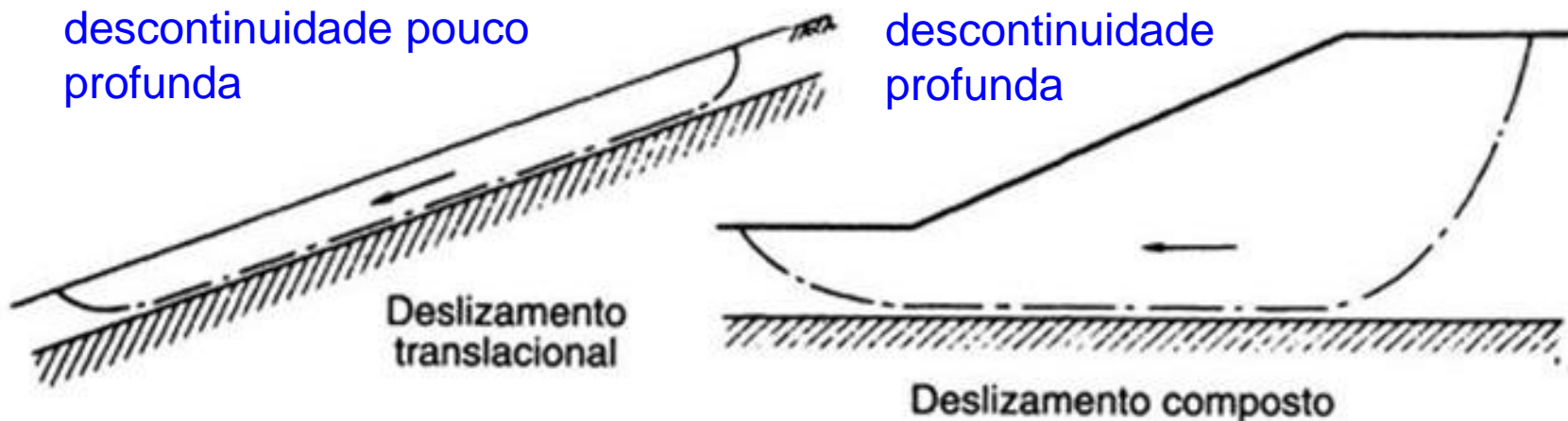
materiais não homogêneos



### Presença de uma descontinuidade em profundidade:

descontinuidade pouco profunda

descontinuidade profunda





# Análise de estabilidade de taludes

O **objetivo** da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa do solo presente em talude natural ou construído.

- **Métodos probabilísticos**: análise quantitativa expressa sob a forma de **uma probabilidade ou risco de ruptura**;
- **Métodos determinísticos**: análise quantitativa expressa sob a forma de um coeficiente ou **fator de segurança (FS)**. Análise de estabilidade de taludes

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \left\{ \begin{array}{l} > 1 \rightarrow obra estável \\ = 1 \rightarrow ocorre ruptura \\ < 1 \text{ não tem significado físico} \end{array} \right\}$$

# Análise de estabilidade de taludes

## NBR 11682 (ABNT, 2008): $FS_{adm}$

### Nível de segurança desejado contra perdas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos, ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

### Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

# Análise de estabilidade de taludes

**NBR 11682 (ABNT, 2008):  $FS_{adm}$**

Fatores de segurança mínimos para  
escorregamentos

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

# Análise de estabilidade de taludes

## Métodos de Equilíbrio Limite

A análise da estabilidade de taludes é feita avaliando-se as condições de equilíbrio da massa de solo num estado de ruptura iminente.

### Hipóteses básicas:

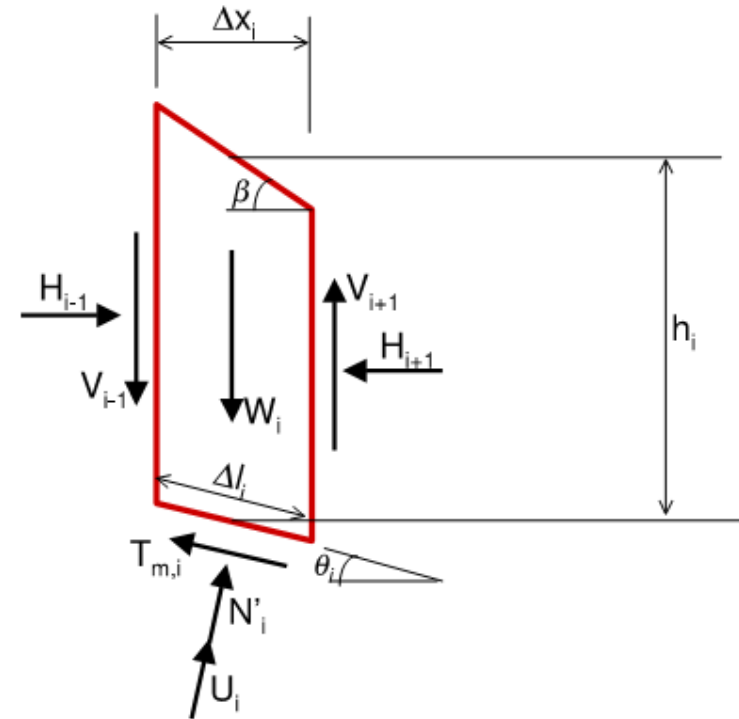
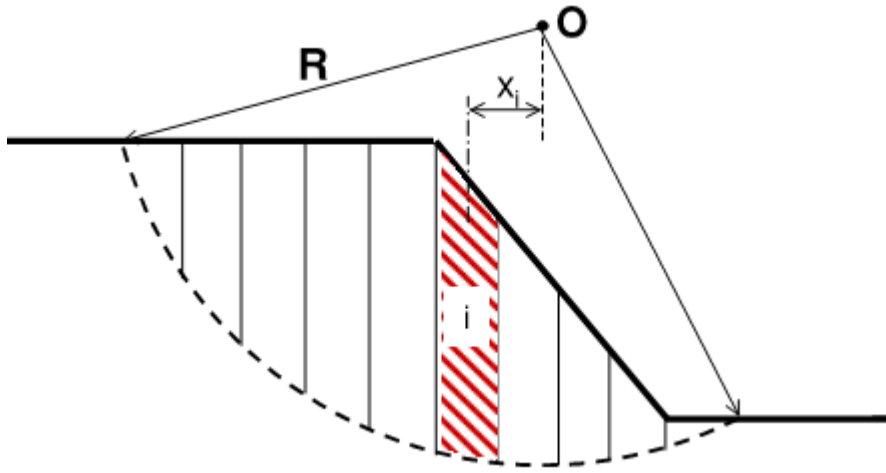
- (i) a superfície potencial de ruptura é pré-definida e de geometria qualquer;
- (ii) equações de equilíbrio estático válidas até a iminência de ruptura;
- (iii) validade do critério de ruptura ao longo de toda a superfície de ruptura considerada;
- (iv) FS é constante ao longo de toda a superfície de ruptura considerada;
- (v) a superfície potencial de ruptura, associada ao  $FS_{\text{mínimo}}$ , é determinada por um processo de procura (processo iterativo).

# Análise de estabilidade de taludes

## Método de Equilíbrio Limite - Método das Fatias:

- **o talude é subdividido em fatias**, assumindo-se a base da fatia como linear. Não podem existir dois materiais na base da lamela e o topo da fatia não deve apresentar descontinuidades;
- realiza-se o **equilíbrio de forças em cada fatia**, assumindo-se que as tensões normais na base da fatia sejam geradas pelo peso de solo contido na fatia;
- calcula-se o **equilíbrio do conjunto por meio da equação de equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo**, considerando os pesos e as forças tangenciais na base das fatias.

# Análise de estabilidade de taludes



## Método das Fatias

# Análise de estabilidade de taludes

## ■ Método de Fellenius: características

- Fellenius em 1927, após a observação de inúmeros escorregamentos ocorridos na Suécia, que apresentaram superfícies de ruptura de forma cilíndrica ou esférica, apresentou o método das Fatias ou Lamelas.
- análise bidimensional (estado plano de deformação)
- superfície de escorregamento cilíndrica, tendo por diretriz um arco de circunferência



# Análise de estabilidade de taludes

## ■ Método de Fellenius: características

- o FS é a relação entre o momento devido as forças resistentes (**Mr**) e o momento devido as forças atuantes (**Ma**) do número total de fatias (**n**) do círculo de ruptura adotado;

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n Mr_i}{\sum_{i=1}^n Ma_i}$$

**Simplificação: admite-se que os efeitos de  $H_{i-1}$  e  $H_{i+1}$ ,  $V_{i-1}$  e  $V_{i+1}$  anulam-se mutuamente, ou seja, não há influência de uma fatia sobre a outra**

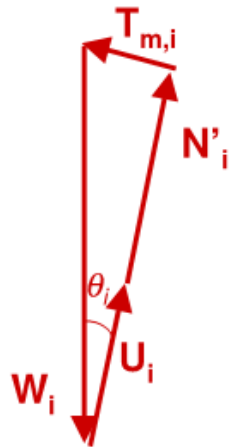
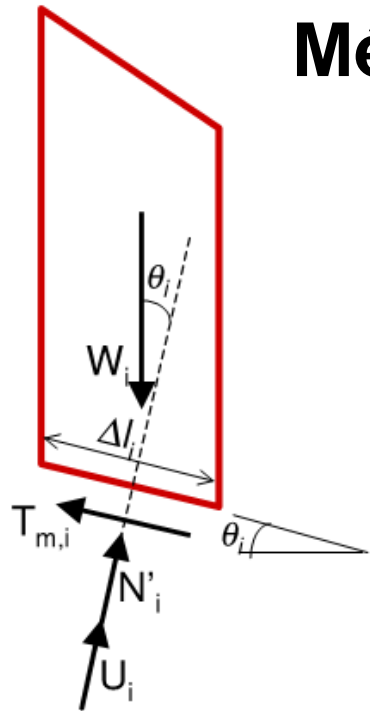
# Análise de estabilidade de taludes

## ■ Método de Fellenius: características

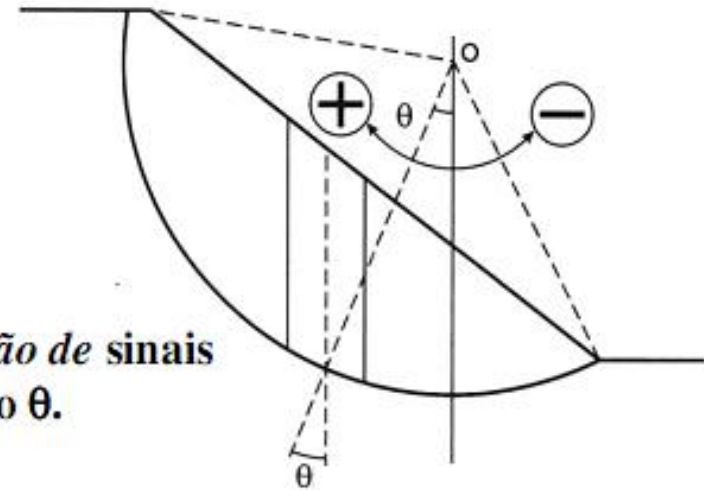
- ❑ equilíbrio de forças em cada fatia segundo a direção do raio que passa pelo meio da base
- ❑ equilíbrio de momentos de todas as fatias em relação ao centro da superfície de deslizamento;
- ❑ FS é a relação entre a resistência ao cisalhamento máxima ao longo da superfície e a tensão cisalhante mobilizada média.
- ❑ o método é conservador: baixos valores de FS;
- ❑ círculos muito profundos e poropressão elevada: FS pouco confiáveis.

# Análise de estabilidade de taludes

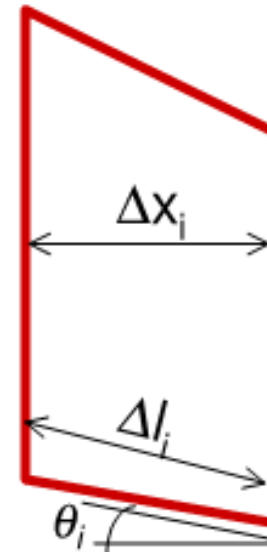
## Método de Fellenius



Convenção de sinais do ângulo  $\theta$ .



$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n c'_i \cdot \frac{\Delta x_i}{\cos \theta_i} + \left( W_i \cdot \cos \theta_i - u_i \cdot \frac{\Delta x_i}{\cos \theta_i} \right) \cdot \tan \phi'_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \text{sen} \theta_i}$$



$$\Delta l_i \cdot \cos \theta_i = \Delta x_i$$

# Análise de estabilidade de taludes

## Roteiro de Cálculo:

- 1) Arbitrar uma superfície de ruptura potencial, com centro O e raio R.
- 2) Dividir o talude em fatias verticais (15 a 30 fatias). As seções verticais devem passar pelos pontos:
  - de mudança de geometria do talude;
  - de cruzamento entre a superfície de ruptura e a linha de fluxo superior;
  - de cruzamento entre a superfície de ruptura e planos de extratificação.
- 3) Medir a largura  $\Delta x_i$  de cada fatia e os ângulos  $\theta_i$  entre a horizontal e a corda que une as extremidades de cada fatia.  $\theta_i$  será positivo quando tiver o mesmo sentido do ângulo de inclinação do talude.
- 4) Calcular o peso  $W_i$  de cada fatia ( $W = \gamma \cdot A = \gamma \cdot \Delta x \cdot h$ )
- 5) Calcular a poropressão média  $u_i$  na base de cada fatia.
- 6) Calcular FS (equação 1).
- 7) Arbitrar outras superfícies de ruptura potenciais, com diferentes centros O e raios R, e repetir os procedimentos.
- 8) Com os FS calculados, traçar linhas de igual fator de segurança (iso-FS). Adotar o FS mínimo.

# Análise de estabilidade de taludes

## ■ Método de Fellenius

ESTABILIDADE DE TALUDES													
MÉTODO DE FELLENIUS													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FATIA	c'	tanφ'	Δx	Σ(yh)	W (4x5)	θ	W senθ	cosθ	u	(6x9)	(10x4/9)	(11-12) x 3	(2x4/9)+13
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
						Σ						Σ	
												<b>FS</b> Σ(14)/Σ(8)	

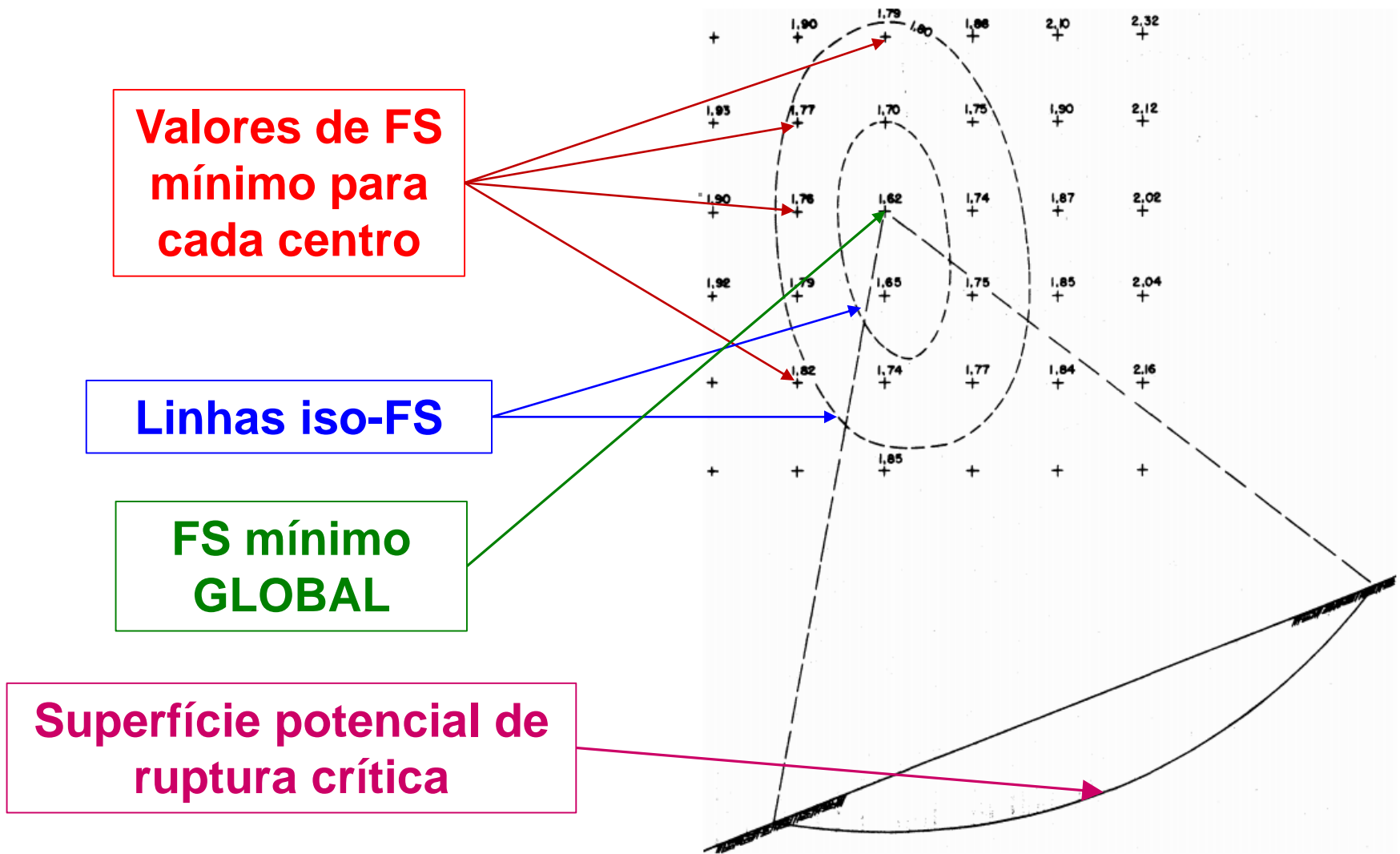
$$FS = \frac{\sum c' \cdot \frac{\Delta x}{\cos \theta} + \left( W \cdot \cos \theta - u \cdot \frac{\Delta x}{\cos \theta} \right) \cdot \tan \phi'}{\sum W \cdot \sin \theta}$$

# Análise de estabilidade de taludes

## ■ Método de Fellenius

- A determinação do FS é feita por tentativas, pesquisando-se uma série de círculos, com centros diferentes. Para cada centro deve-se, também, calcular os FS para diferentes raios.
- A pesquisa do centro do círculo é feita considerando-se uma malha de pontos equidistantes, que permitem o traçado de curvas com igual FS, que são concêntricas, em torno do valor mínimo.

# Análise de estabilidade de taludes



**Valores de FS mínimo para cada centro**

**Linhas iso-FS**

**FS mínimo GLOBAL**

**Superfície potencial de ruptura crítica**



