

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
PEF 2409 Geotecnia Ambiental

# Análise de estabilidade de taludes

# Introdução

Abordagem **estática** dos problemas de estabilidade

Hipótese de **equilíbrio** numa massa de solo

Modelo **rígido plástico** – eminência de escorregamento

# Introdução

- Comparação entre a resistência ao cisalhamento do solo e as solicitações atuantes
  - ◆ Forças atuantes – peso da massa de solo e sobrecargas
  - ◆ Determinação das tensões de cisalhamento induzidas – resistência ao cisalhamento do solo

**MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE**

# Introdução

- Para avaliar a estabilidade de um determinado talude, é necessário definir / estimar:
  - ◆ Geometria do talude
  - ◆ Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solos envolvidos ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $S_u$ )

# Conceitos

- Hipóteses de geometria da superfície de ruptura
  - ◆ Planar
    - ◆ Taludes íngrimes
    - ◆ Talude infinito / escorregamento de massas
  - ◆ Circular
    - ◆ Observações mostram tendência de superfícies de ruptura com forma conchoidal / circular
  - ◆ Outras geometrias mais complexas

# Conceitos

- **Fator de Segurança – FS** – estima em quanto a resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície de ruptura supera os esforços solicitantes = margem de segurança → depende do tipo e do contexto da obra, separando fase construtiva daquela operacional.
  - ◆ Equilíbrio de forças
  - ◆ Equilíbrio de momentos

# Conceitos

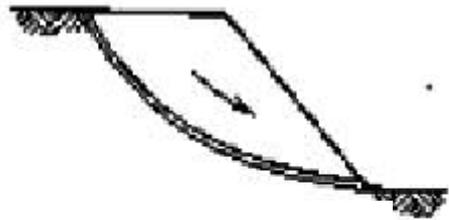
- Fator de Segurança – FS
- Em Normas Técnicas e a Boa Prática impoe que  $FS \geq 1,5$

# Conceito

QUAL A SUPERFÍCIE GEOM'ETRICA NA  
QUAL SE DESENVOLVE A CONDICAÇÃO  
DE RUPTURA **MAIS** CRÍTICA?

- Processo tentativo – busca da superfície de menor fator de segurança

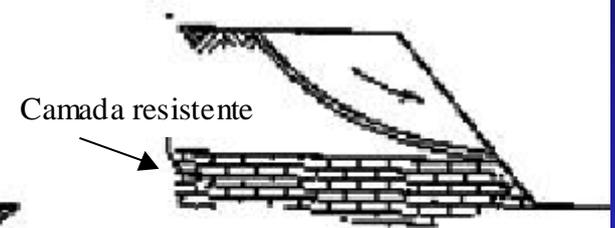
# Superfícies de ruptura - tipos



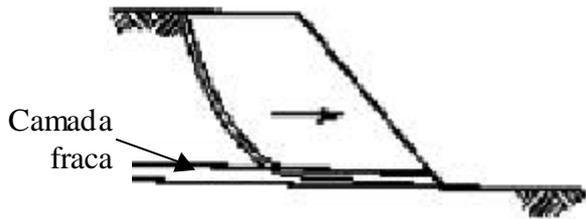
rotacional



translacional



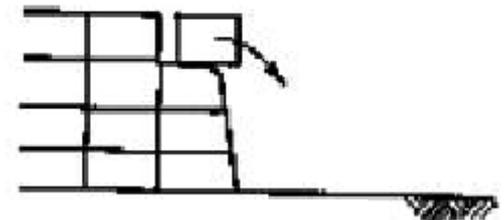
limitado



condicionado



corrida de lama



tombamento

# Métodos de cálculo de estabilidade de taludes

## ■ Métodos de equilíbrio limite

- ◆ Método Sueco (das “fatias” ou lamelas)
  - ◆ Método de Fellenius
  - ◆ Método de Bishop / Bishop simplificado
  - ◆ Método de Janbu / Janbu simplificado
  - ◆ Método de Morgenstern-Price
  - ◆ Método de Spencer
  - ◆ Método de Sarma
- ◆ Método das cunhas

# Métodos de cálculo de estabilidade de taludes

- Os métodos se distinguem entre si pelas **hipóteses simplificadoras** que cada um adota, geralmente associadas à consideração da **distribuição interna de esforços interlamelas**
- Alguns métodos são mais conservadores do que outros em função do nível de simplificação
- Métodos mais atuais consideram o caráter estatístico dos problemas

# Pressupostos dos métodos de equilíbrio limite

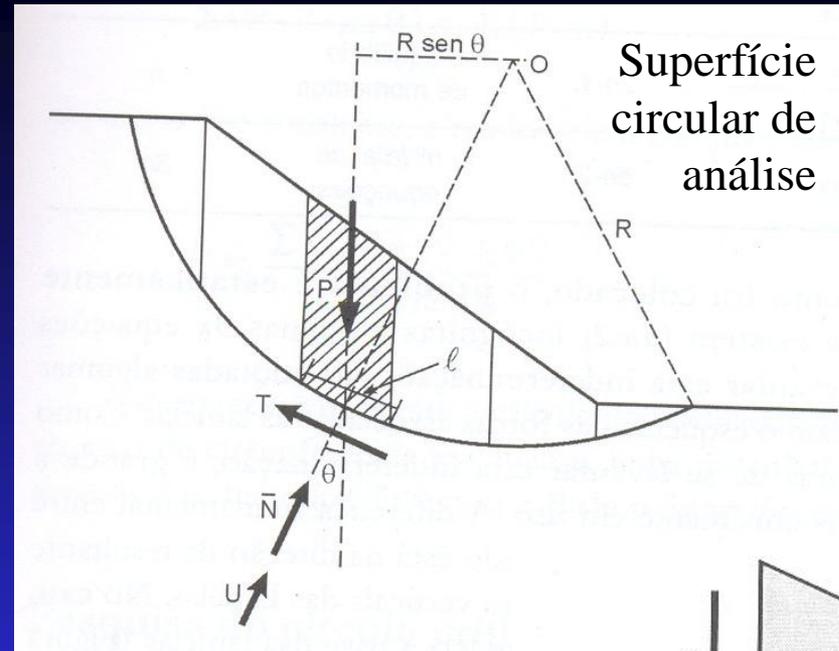
- Comportamento do solo assumido como **rígido plástico perfeito**
- Equações de equilíbrio estático até a eminência de ruptura (na realidade o processo é evolutivo/dinamico)
- O FS é constante ao longo da superfície de ruptura (na realidade o processo pode ser progressivo)

# Equilíbrio Limite

## ■ ESTATICA

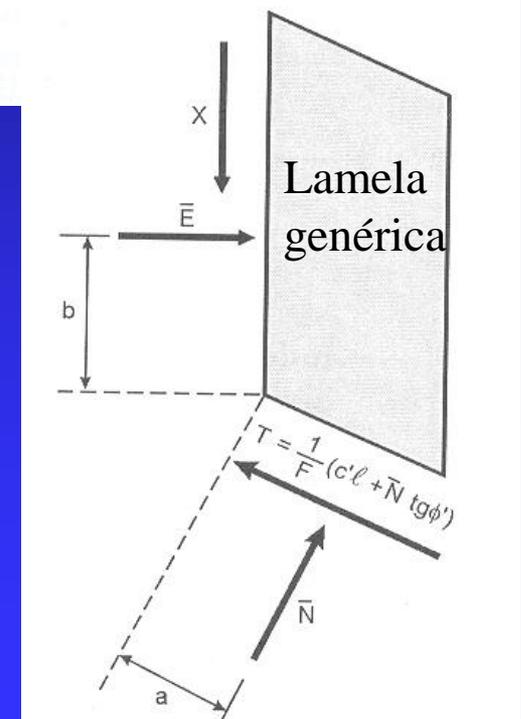
EQUILIBRIO DOS ESFORCOS NA  
HORIZONTAL, NA VERTICAL E  
SOMATORIO DE MOMENTOS NULO

# Métodos

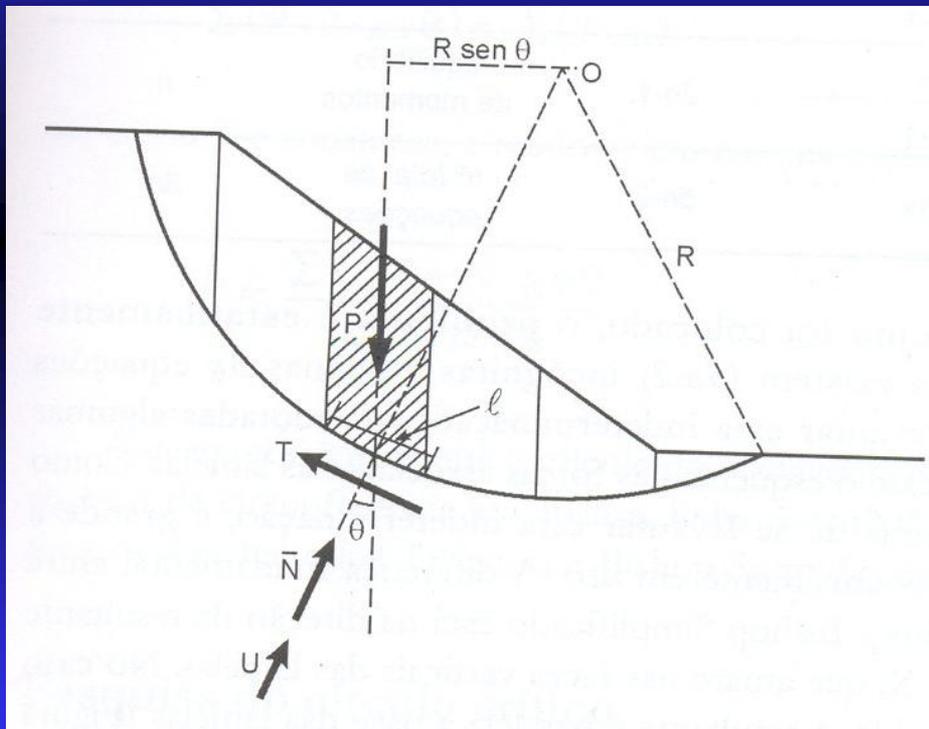


## ■ Bishop e Fellenius

- ◆ Superfície de ruptura – arco de circunferência
- ◆ Massa de solo subdividida em lamelas



# Fator de segurança - Dedução da fórmula considerando equilíbrio dos Momentos



Momento das forças  
atuantes

$$\Sigma (P * R * \text{sen } \theta)$$

Momento das forças  
resistentes

$$\Sigma (T * R)$$

# Fator de segurança

- No equilíbrio – eminência da ruptura:

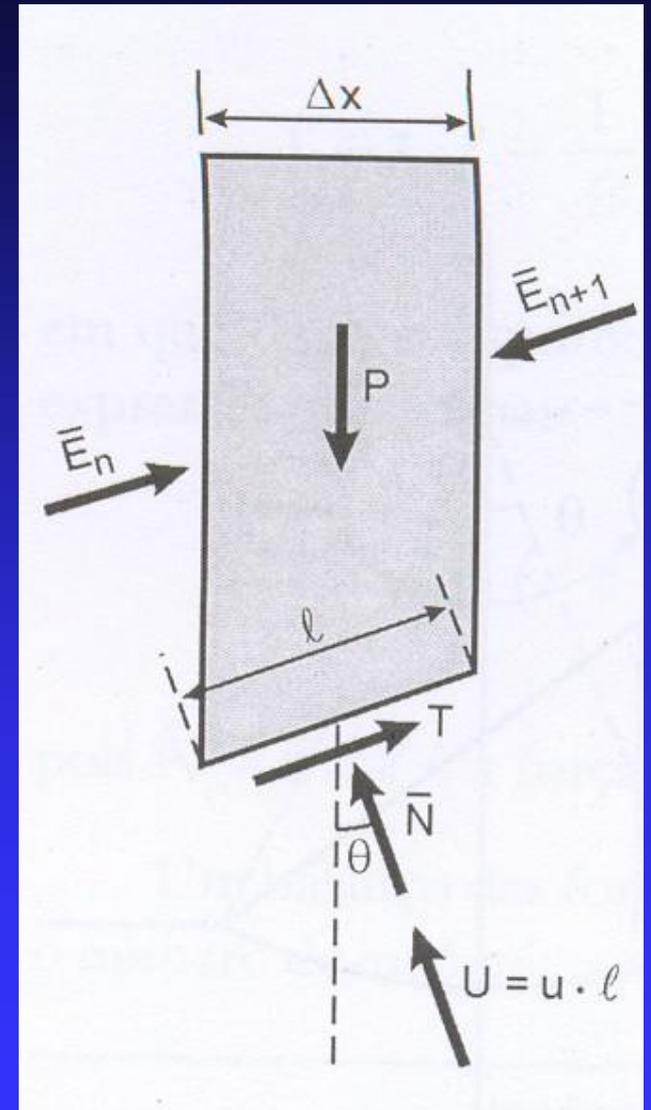
$$\Sigma (P * R * \text{sen } \theta) = \Sigma (T * R)$$

- Fator de segurança – relação entre o esforço resistente disponível e o esforço solicitante

$$F = \frac{\Sigma(c' \cdot 1 + \bar{N} \cdot \text{tg}\varphi)}{\Sigma(P \cdot \text{sen } \theta)}$$

# Método de Fellenius

- Equilíbrio de forças na direção normal
- Para pressões neutras elevadas o método pode induzir erro

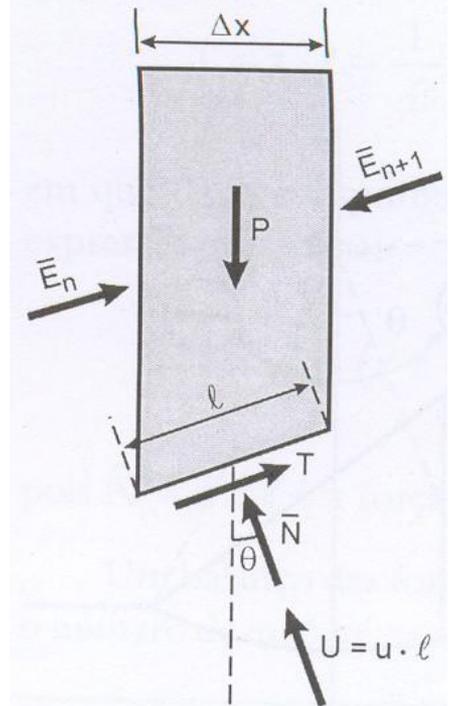


# Método de Fellenius

$$\bar{N} + U = P \cdot \cos \theta$$

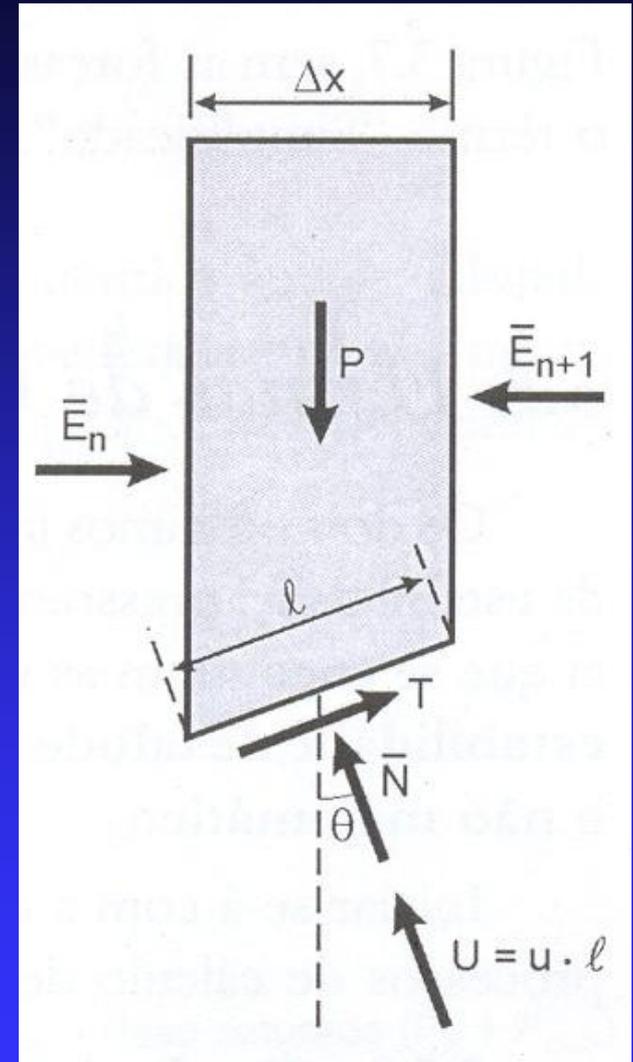
$$\bar{N} = P \cdot \cos \theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec \theta$$

$$F = \frac{\sum [c' \cdot l + (P \cdot \cos \theta - u \cdot \Delta x \cdot \sec \theta) \cdot \operatorname{tg} \phi']}{\sum (P \cdot \operatorname{sen} \theta)}$$



# Método de Bishop simplificado

- Equilíbrio de forças na direção vertical

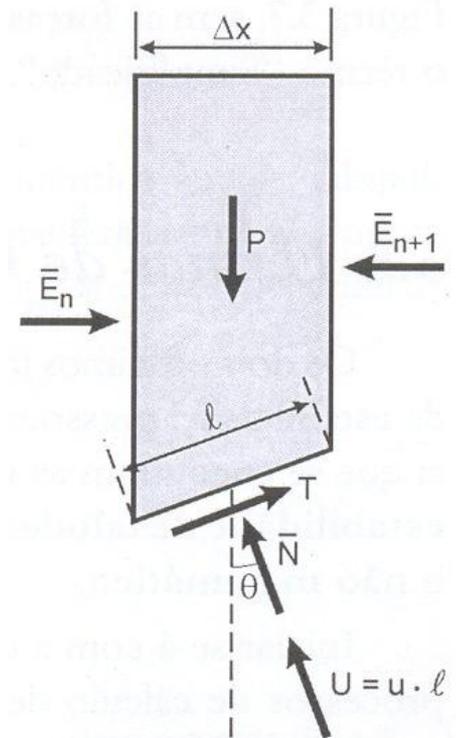


# Método de Bishop simplificado

$$(\bar{N} + U) \cdot \cos\theta + T \cdot \sin\theta = P$$

$$\bar{N} = \frac{P - u \cdot \Delta x - \frac{c' \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg}\theta}{F}}{\cos\theta + \frac{\operatorname{tg}\phi' \cdot \sin\theta}{F}}$$

$$F = \frac{\sum \left[ c' \cdot \ell + \frac{P - u \cdot \Delta x - c' \cdot \Delta x \cdot \operatorname{tg}\theta / F}{\cos\theta + \operatorname{tg}\phi' \cdot \sin\theta / F} \cdot \operatorname{tg}\phi' \right]}{\sum (P \cdot \sin\theta)}$$

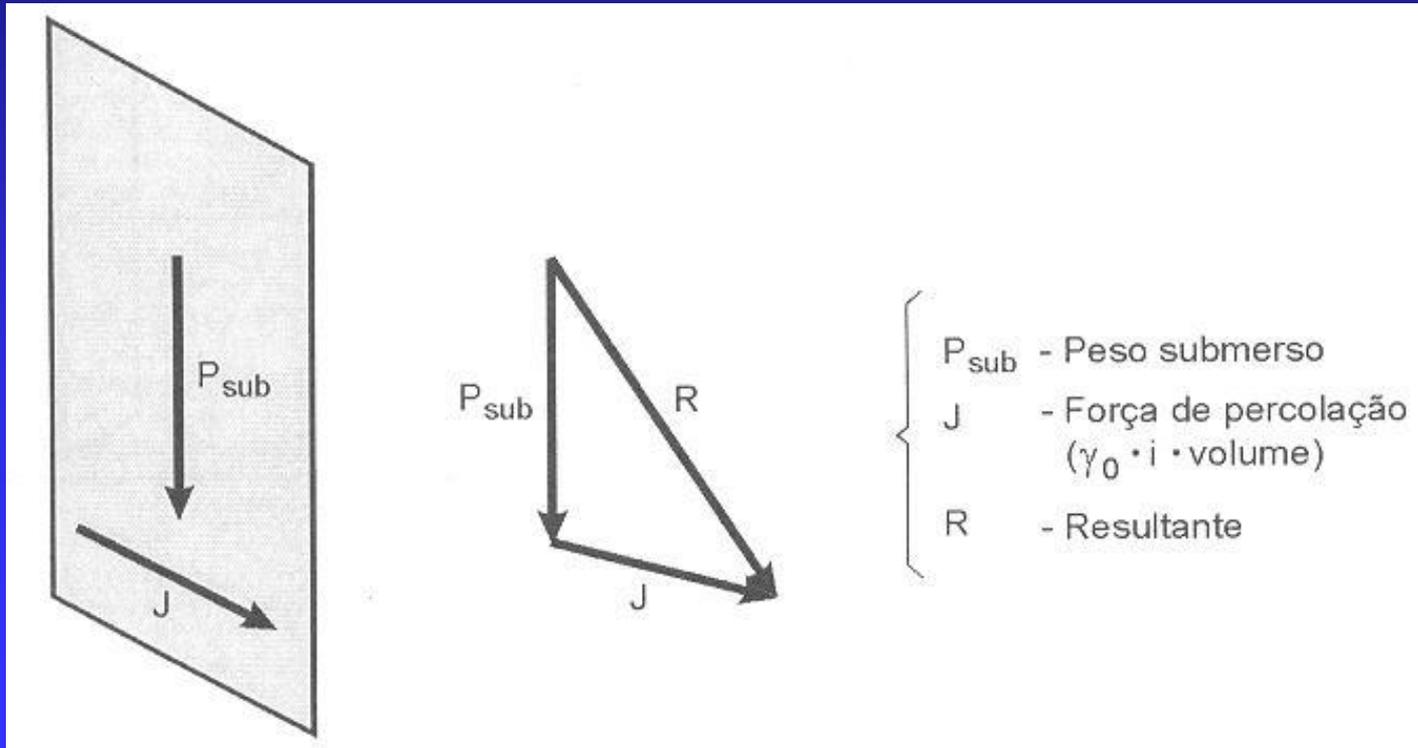


# Pressões Neutras

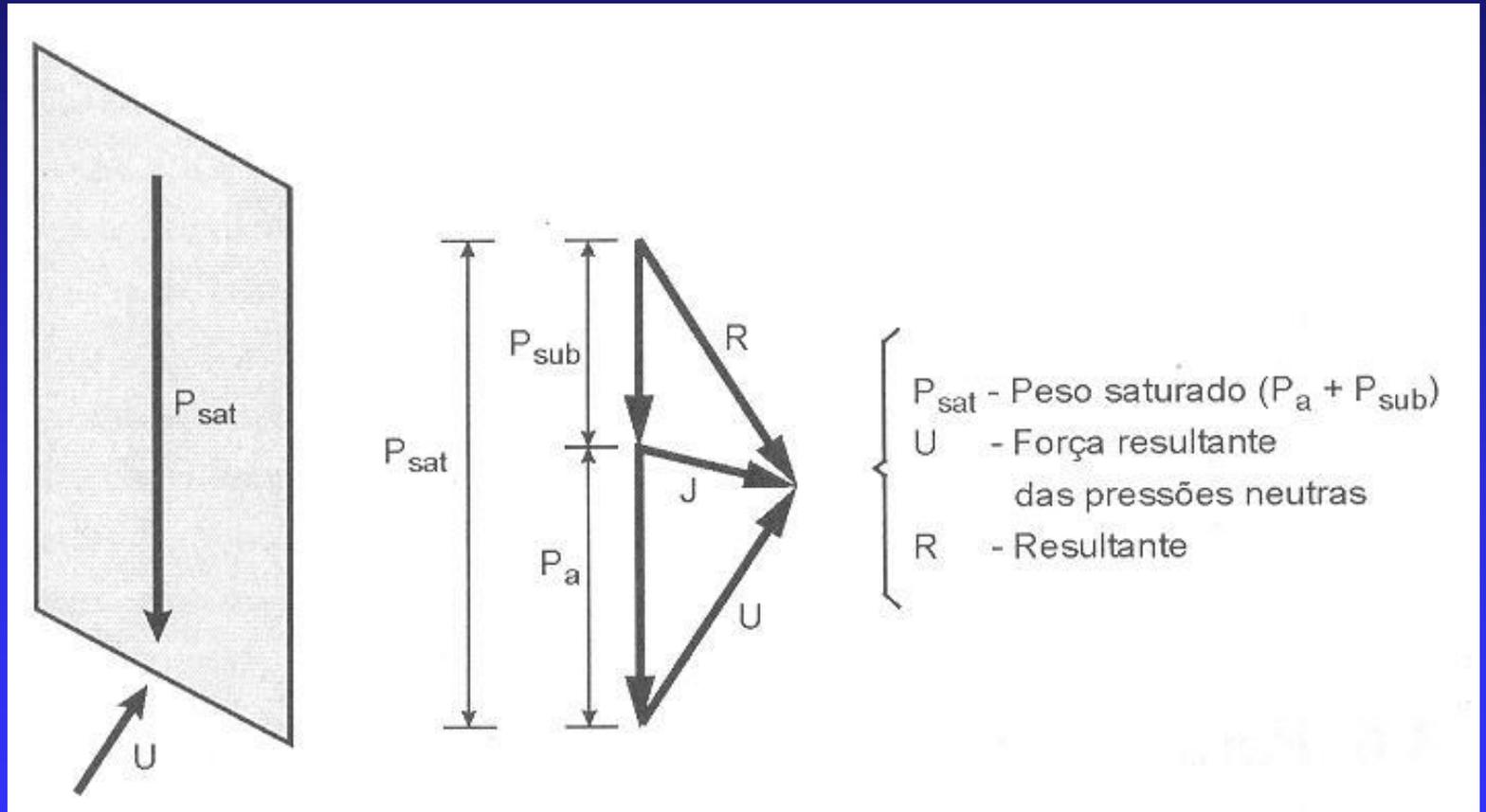
- Barragem em final de construção ou aterro sobre solos moles
  - ◆ parâmetro  $\bar{B} = u/\sigma_v$

# Pressões Neutras

Barragem em operação e talude submerso com rede de fluxo em regime permanente  $\rightarrow$  incluir forças de percolação nas análises (J)

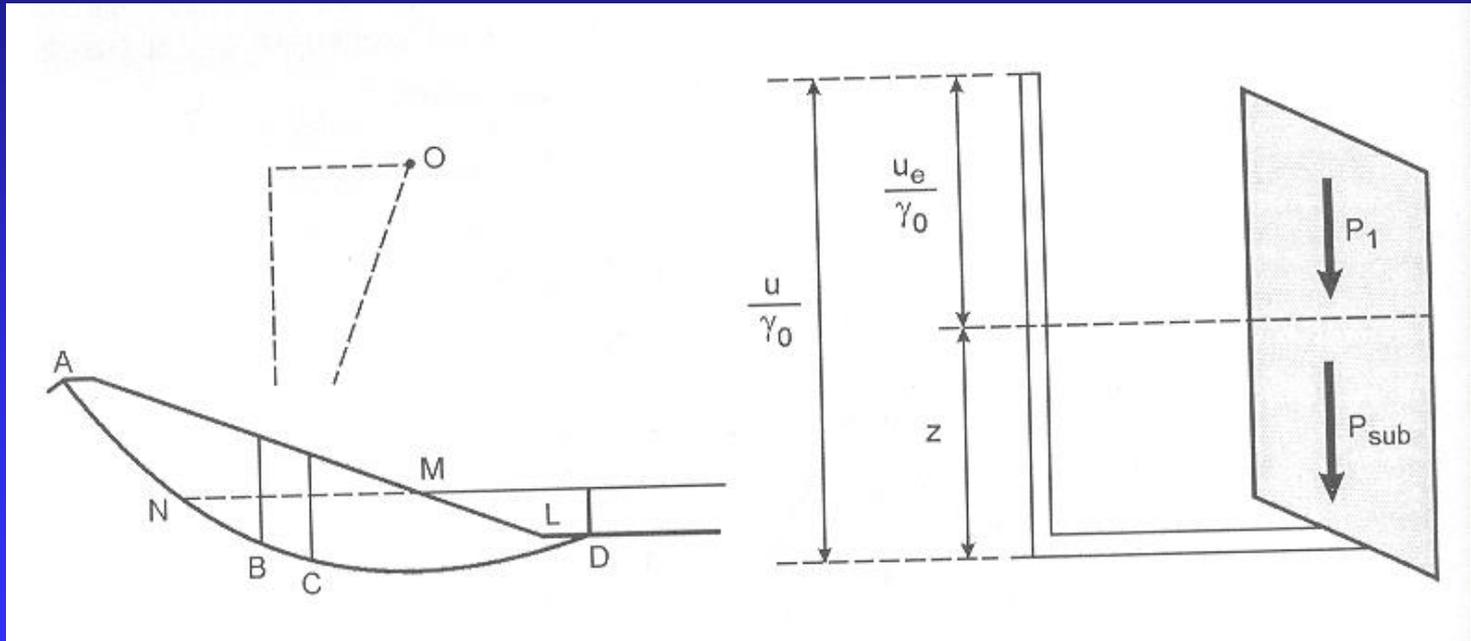


# Pressões Neutras



# Pressões Neutras

- Talude com submersão parcial



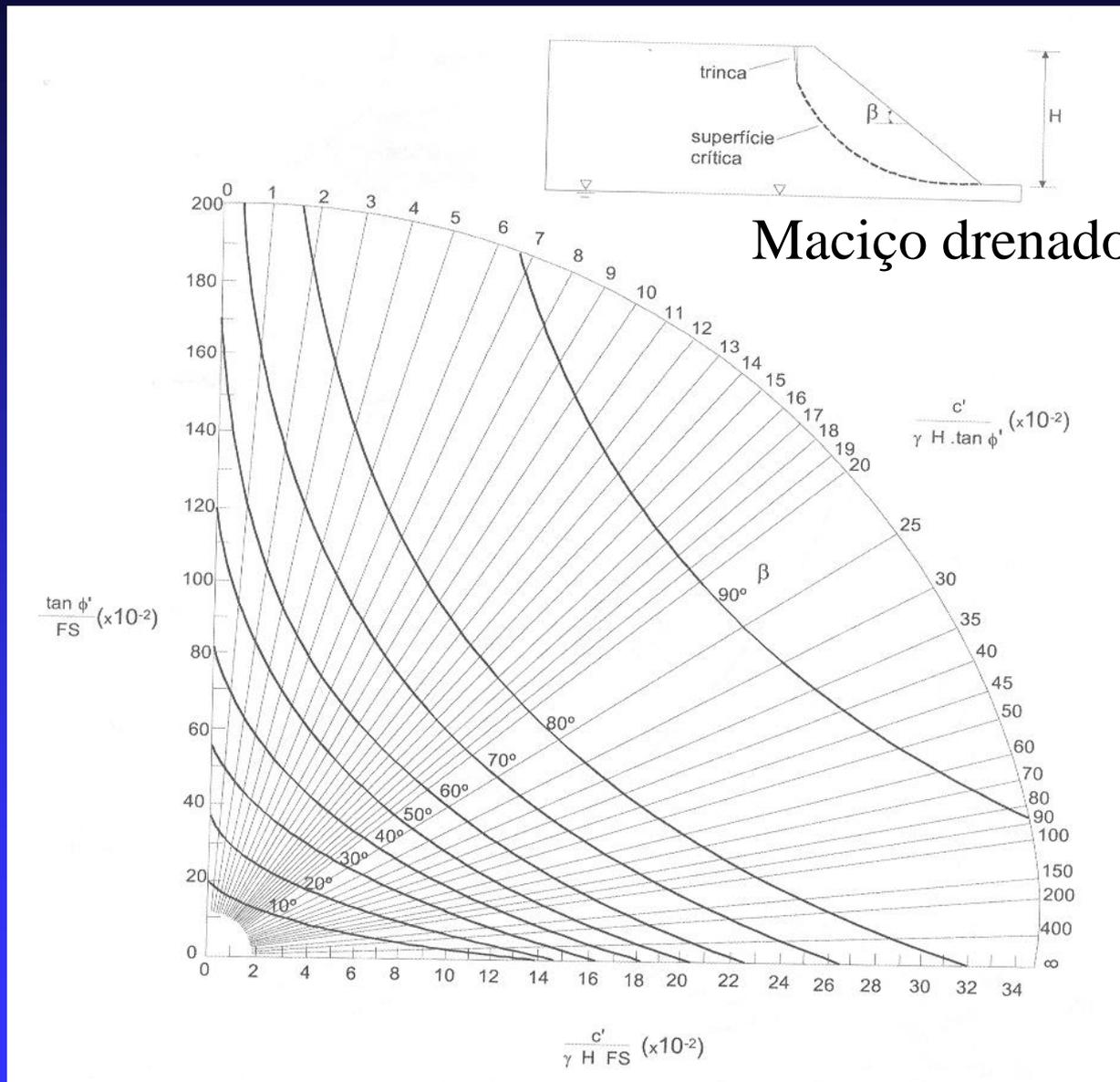
# Parâmetros de resistência

- Resistência ao cisalhamento depende:
  - ◆ Nível de tensões (vertical efetiva)
  - ◆ Condições de drenagem
  - ◆ Trajetória e história de tensões
  - ◆ Estrutura dos solos
- Parâmetros de resistência
  - ◆ Coesão efetiva ( $c'$ )
  - ◆ Coesão não drenada ( $S_u$ )
  - ◆ Ângulo de atrito interno ( $\phi'$ )

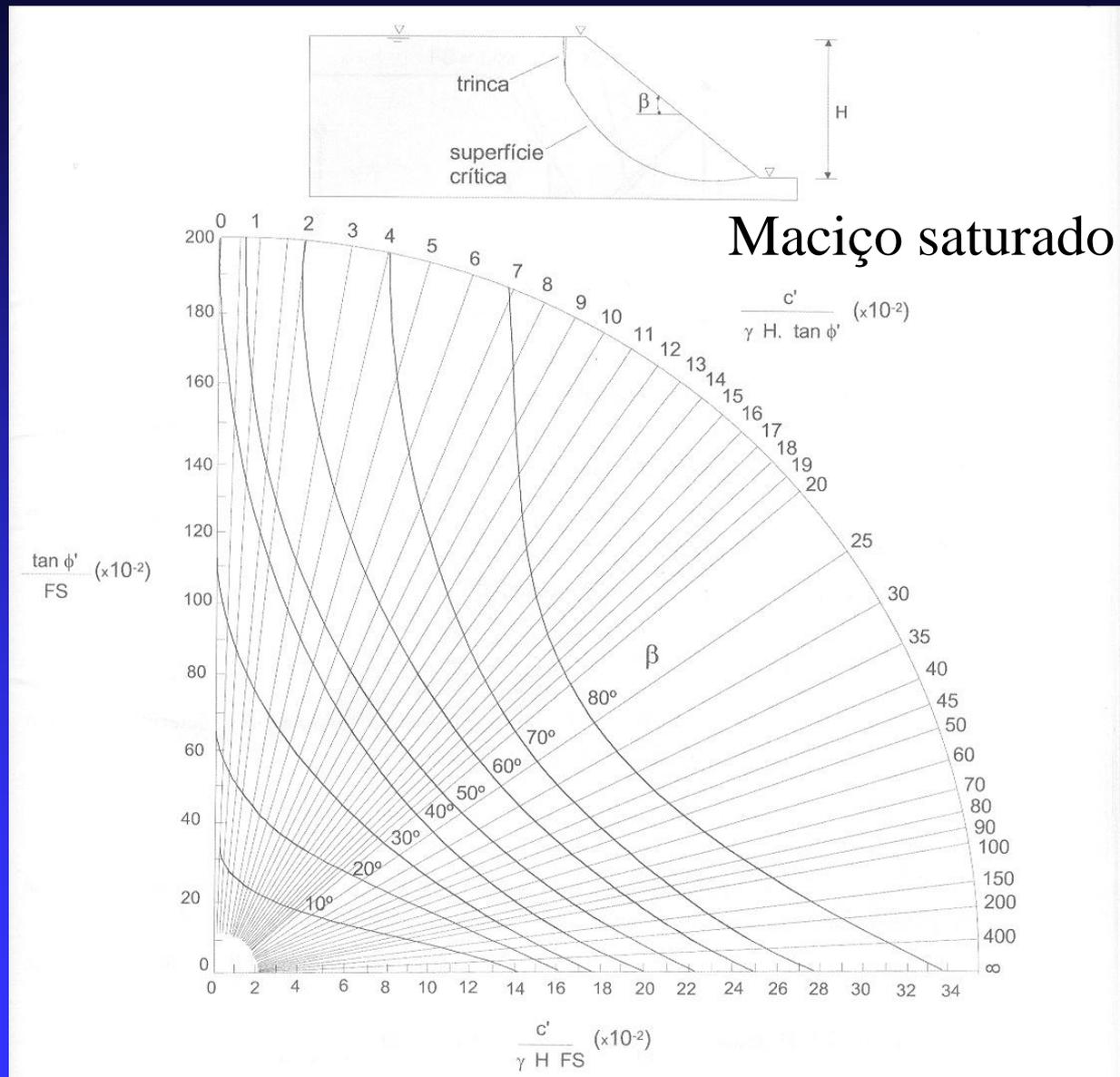
# Parâmetros de resistência

- Análise de estabilidade de barragem de terra:
  - ◆ Final de construção
    - ◆ Talude de jusante
    - ◆ Não há tempo para dissipação da pressão neutra (parâmetros rápidos, sem dissipação)
  - ◆ Barragem em operação
    - ◆ Talude de jusante
    - ◆ NA máximo
    - ◆ Ensaio rápidos ou lentos, adensados
  - ◆ Rebaixamento rápido
    - ◆ Talude de montante
    - ◆ Ensaio rápidos, adensados não drenados

# Ábacos de cálculo



# Ábacos de cálculo



# SOFTWARES de cálculo

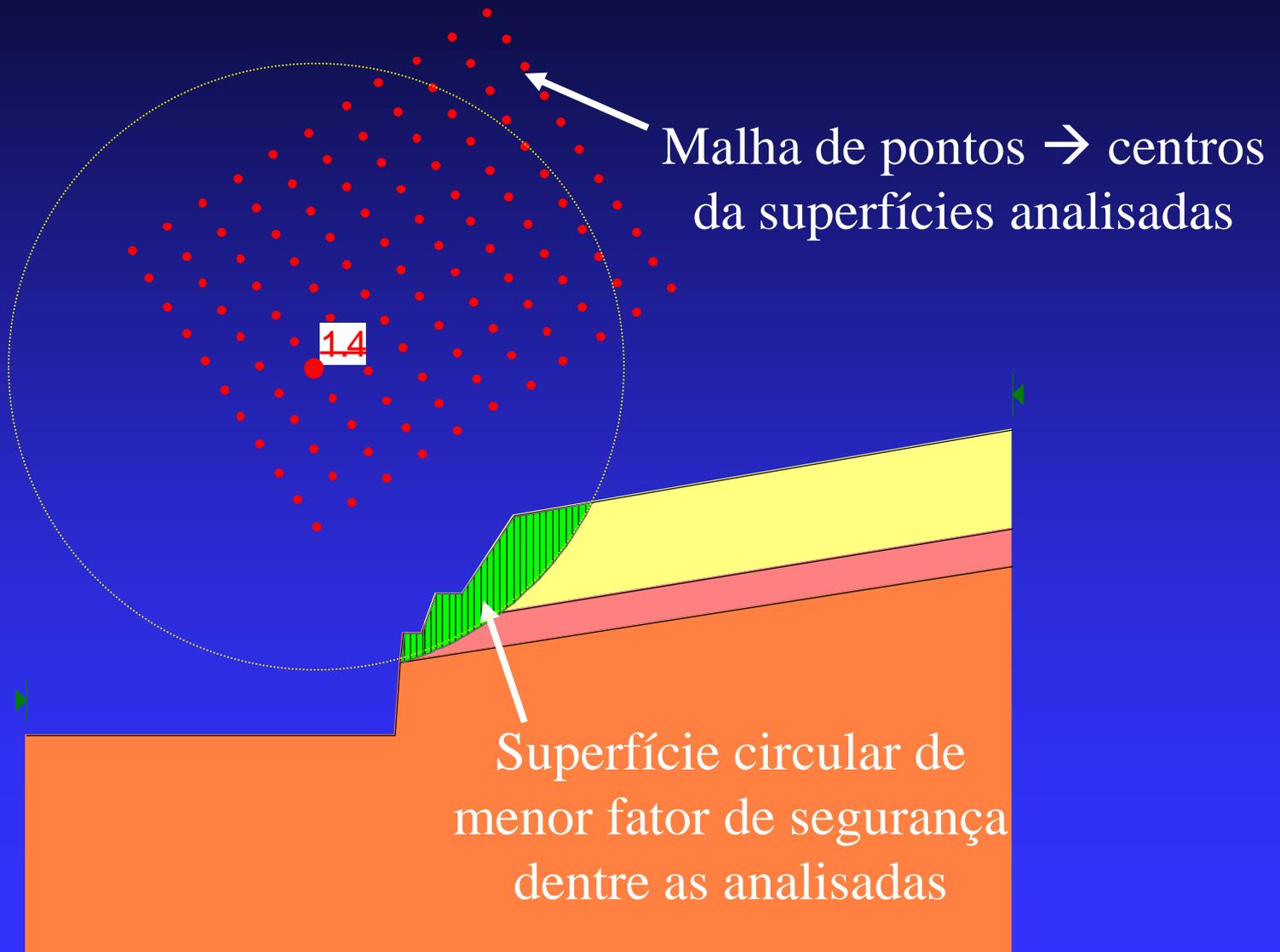
- Modelos bidimensionais tipo equilíbrio limite
  - ◆ Pesquisa de diversas superfícies de ruptura
    - ◆ circulares – arcos de circunferência
    - ◆ planares – especificadas
  - ◆ Abordagens estatísticas

# SOFTWARES de cálculo

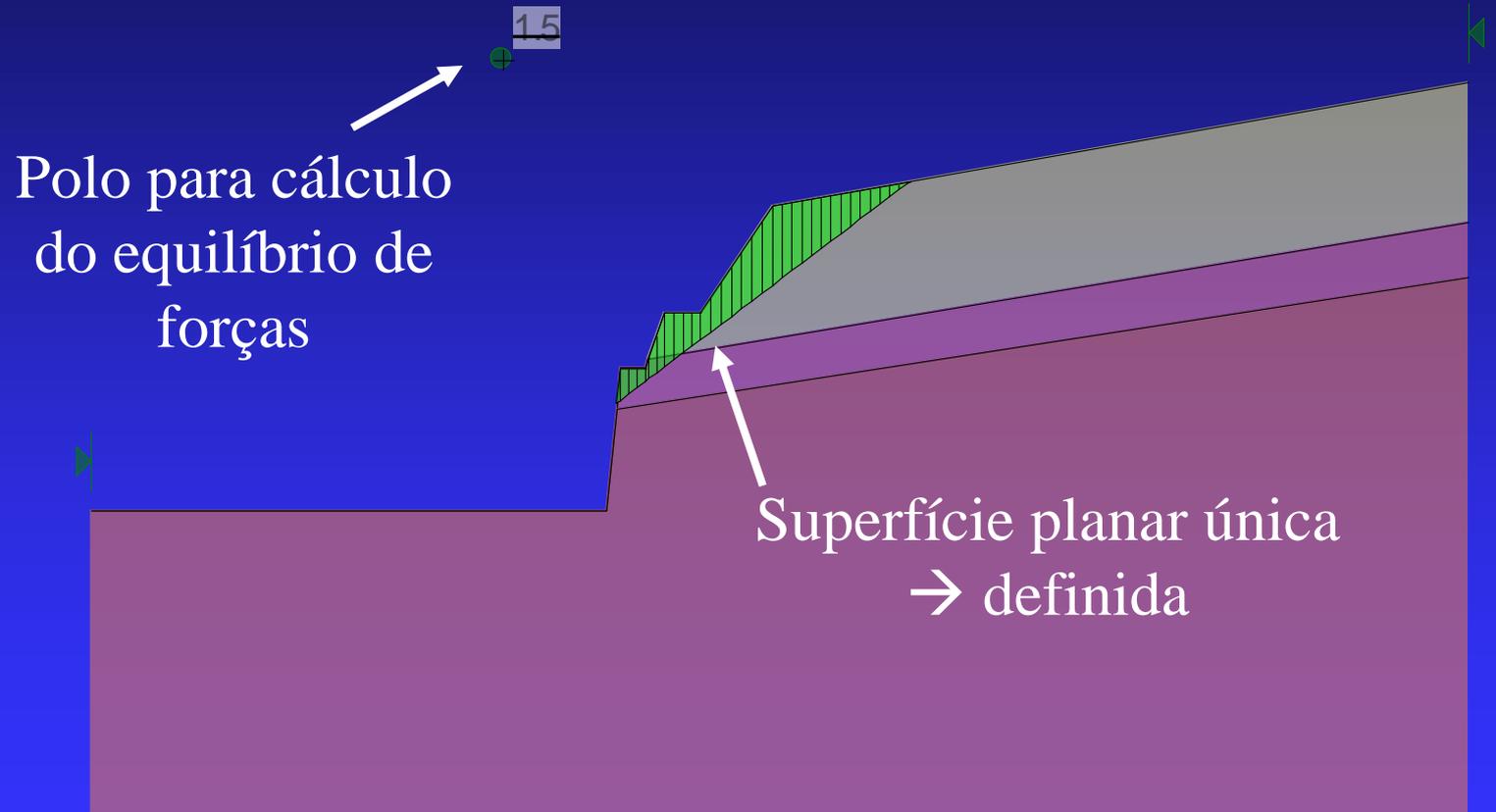
## ■ Modelos de elementos finitos

- ◆ análise de superfícies de plastificação
- ◆ geração de estado de tensões para posterior análise tipo equilíbrio limite

# Exemplos de processamentos



# Exemplos de processamentos



# Para pensar....

- Heterogeneidade / variabilidade – abordagem estatística
- Efeito tridimensional – taludes côncavos / convexos
- Parâmetros geomecânicos de resíduos sólidos (sanitário, rejeito industrial, etc)
- Retro-análise – ruptura: FS ~ 1.0