

# Solo grampeado: análises de equilíbrio limite e tensão-deformação

ABMS – NRSP – 28/10/08

Resumo da apresentação original na  
Celebração dos 50 anos da SMMS

Cidade do México, 4/10/2007



**Waldemar Coelho Hachich**

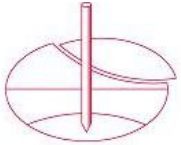
Professor Titular, Depto. de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica, Univ. de S. Paulo

**Víctor Enrique León Bueno de Camargo**

Mestre em Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica, Univ. de S. Paulo, Bureau de Projetos

**Alexei Gino Najár Jiménez**

Mestre em Engenharia Geotécnica, Escola Politécnica, Univ. de S. Paulo, Intertechne



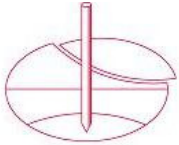
# Execução

Reforço por meio de inclusões (grampos)



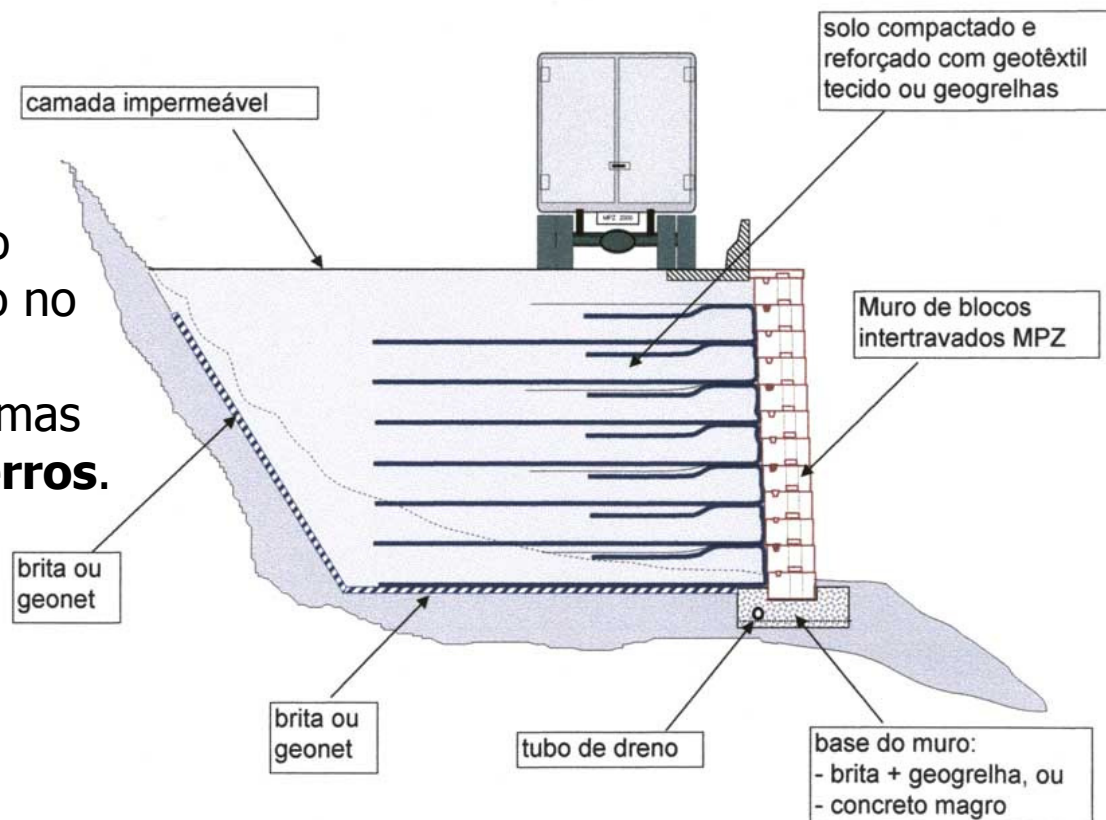
Sempre em **cortes**, de cima para baixo, por bancada.

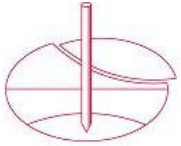
Paramento (frequentemente de concreto projetado) é quem faz a contenção? Só entre bancadas, não a global!



# Terra armada (em aterros)

Inclusões reforçam o solo, como no caso dos grampos, mas só em **aterros**.

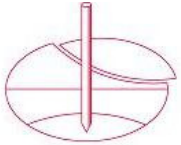




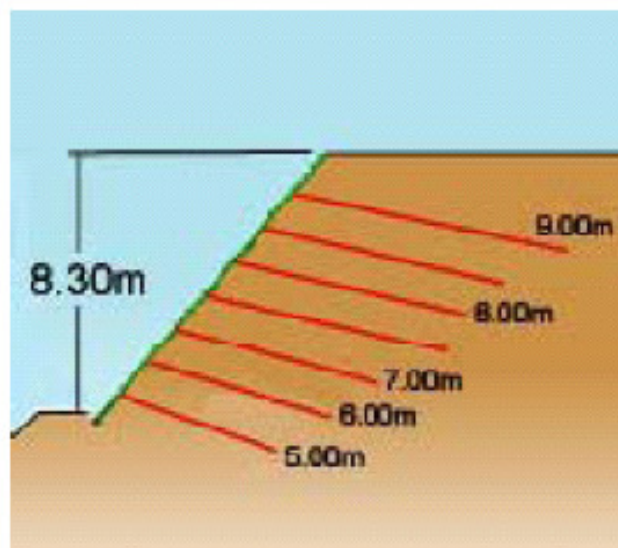
# Solo grampeado (em cortes)







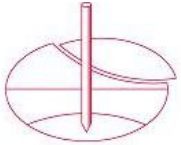
# Talude reforçado com grampos



(a)



(b)



# Tirantes vs. grampos

Paramento estrutural (cortina)  
transmite cargas dos tirantes ao  
talude, para estabilizá-lo.



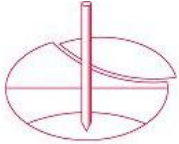
(a)

Comparar  
espaçamentos!



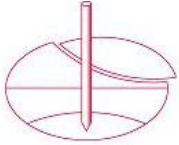
(b)

Grampos reforçam  
o terreno, de modo  
que ele fique  
estável mesmo na  
ausência de um  
paramento com  
função estrutural.



# Contenção ou reforço?

- Contenção: paramento estrutural equilibrado por elementos ativos, com cargas pré-estabelecidas e aplicadas externamente, independentemente das deformações do maciço (caso típico dos tirantes)
- Reforço: elementos passivos, que dependem de deformação do maciço para entrarem em carga (caso típico dos grampos)



# Resumo: contenção x reforço

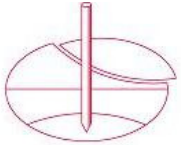
## ■ Contenção

- Elementos ativos
- Ex.: **tirantes**
- Cargas aplicadas externamente
- Contenção => solo com resistência original, mas com solicitações adicionais estabilizantes

## ■ Reforço

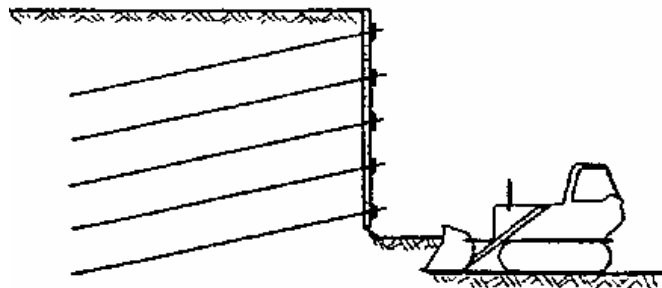
- Elementos passivos
- Ex.: **grampos**
- Cargas mobilizadas pelas deformações
- Reforço => aumento de resistência do solo, para as mesmas solicitações



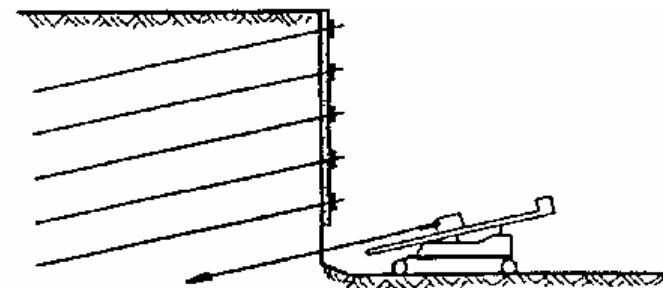


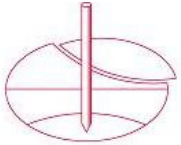
# Escavação e perfuração

- Escavação para a próxima bancada



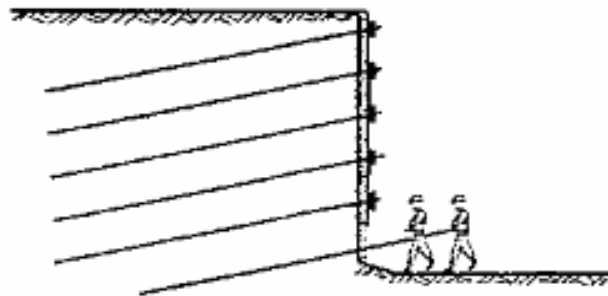
- Perfuração do grampo





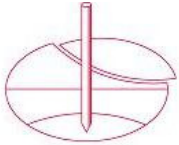
# Instalação / injeção e projetado

- Instalação / injeção

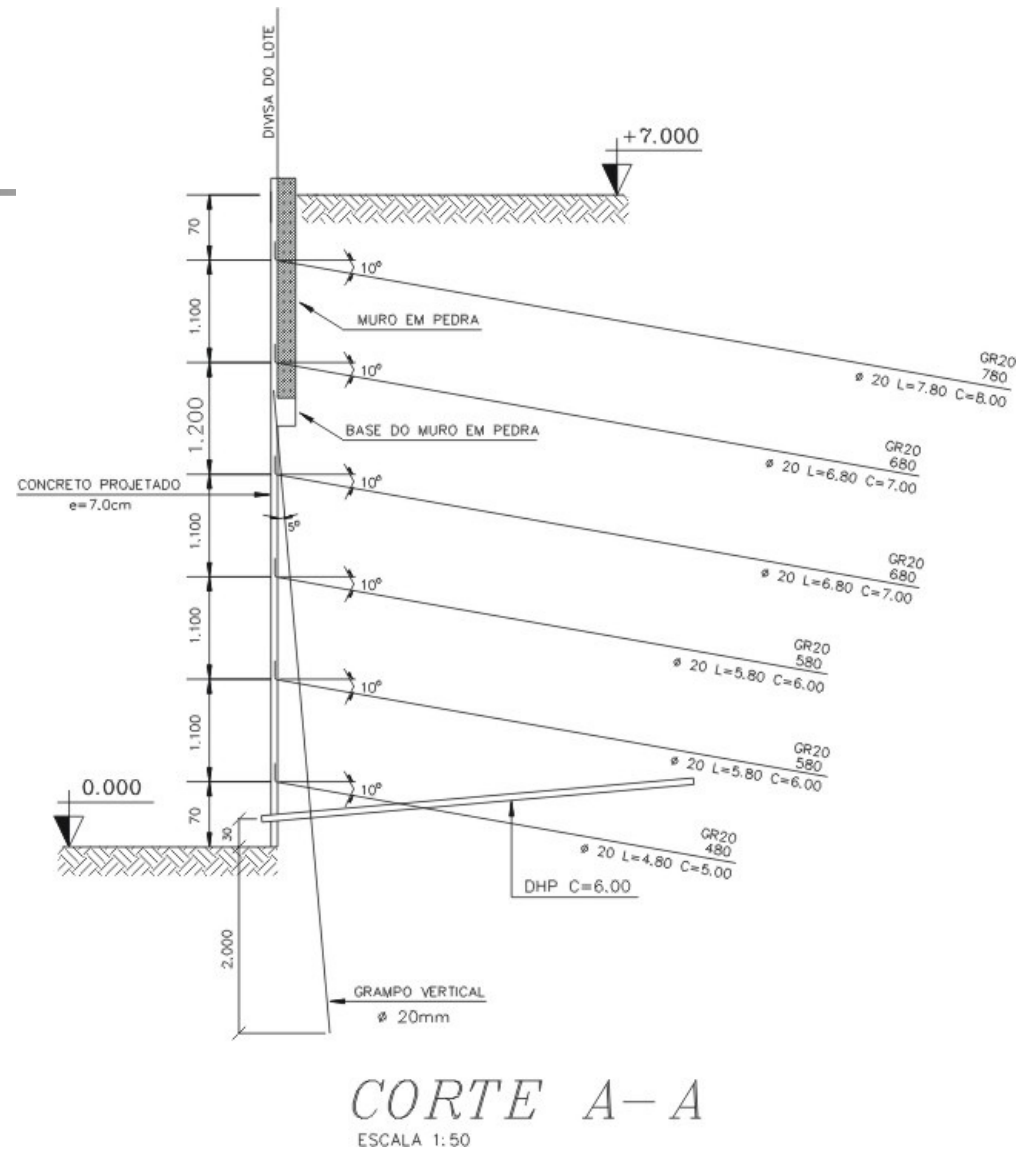


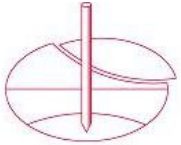
- Concreto projetado



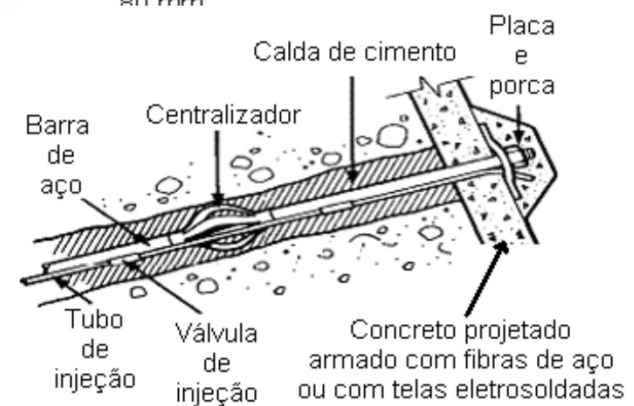
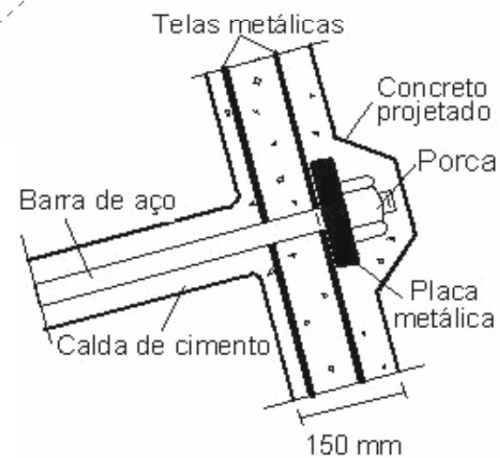
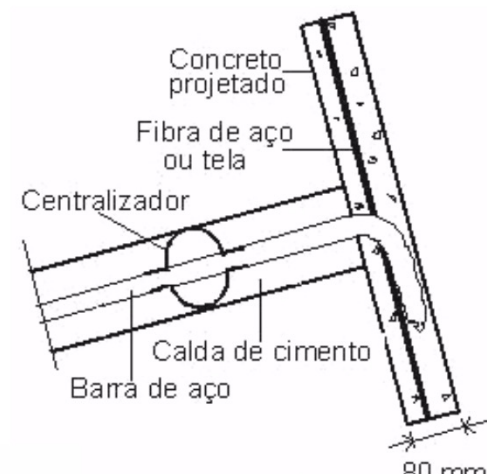
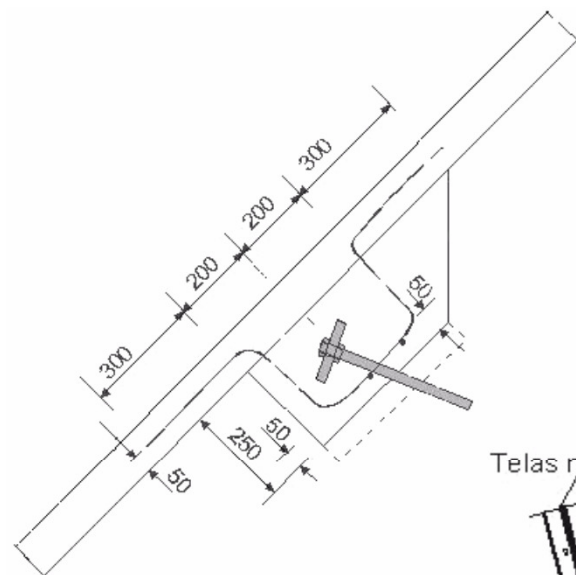


# Projeto

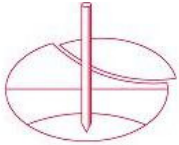




# Detalhes típicos

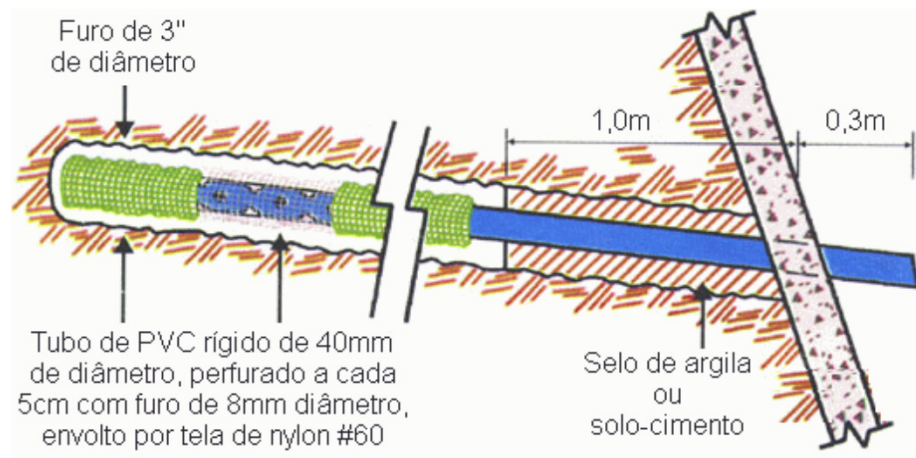




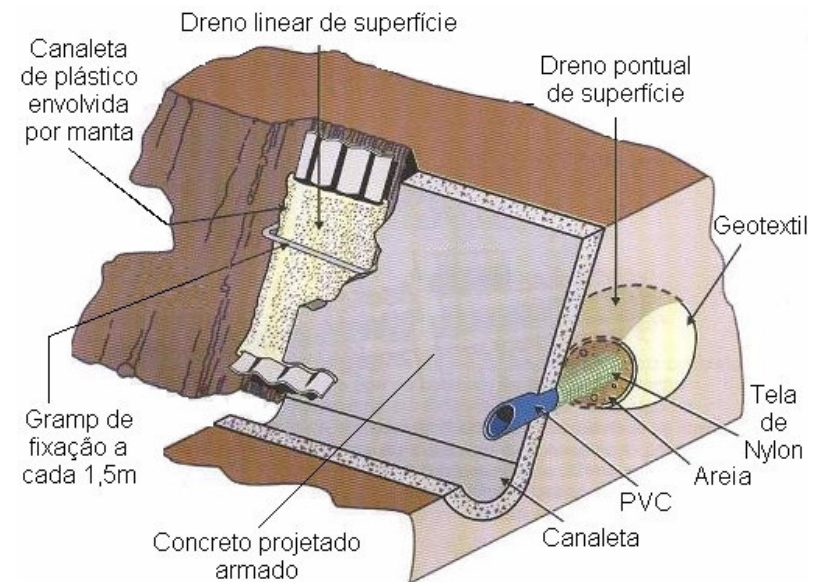


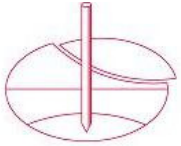
# Detalhes da drenagem

## Dreno (sub-)horizontal profundo (DHP)



## Drenos de superfície (de paramento)





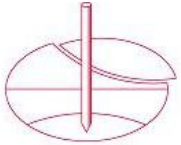
# Dreno linear de paramento



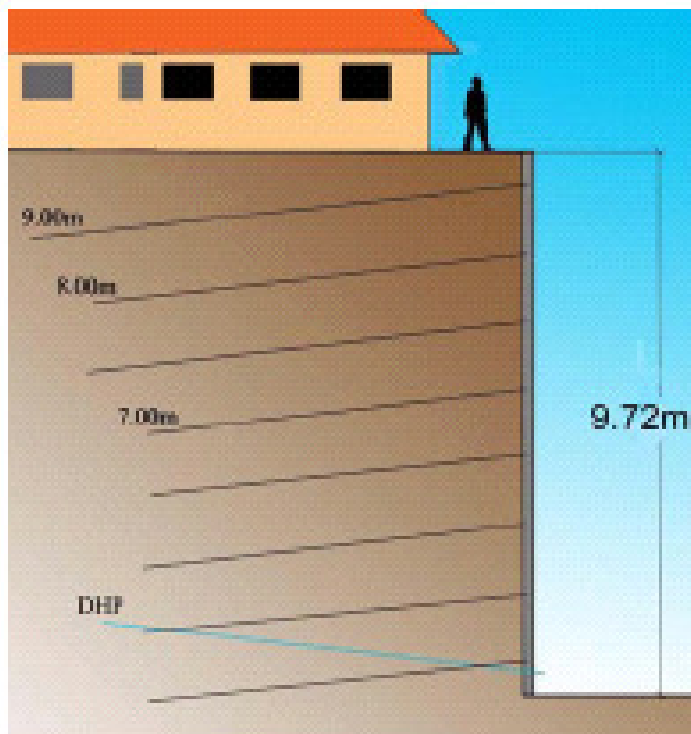
28/10/08

Waldemar Hachich

14



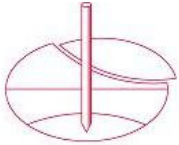
# Exemplo: edifício em S. Paulo



(a)

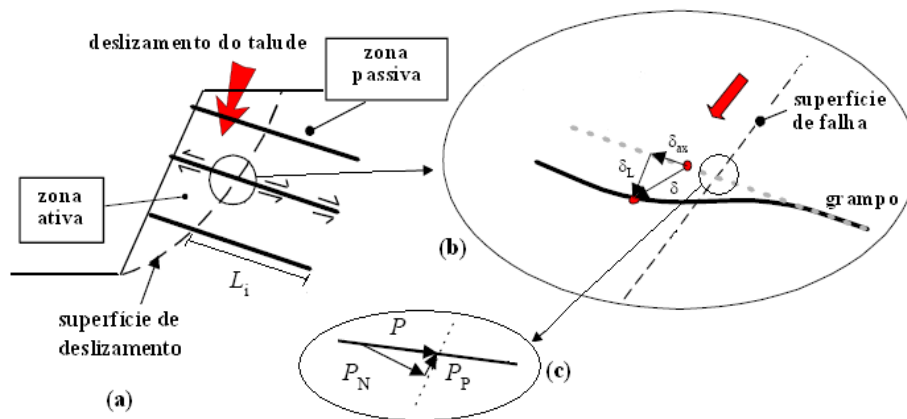


(b)

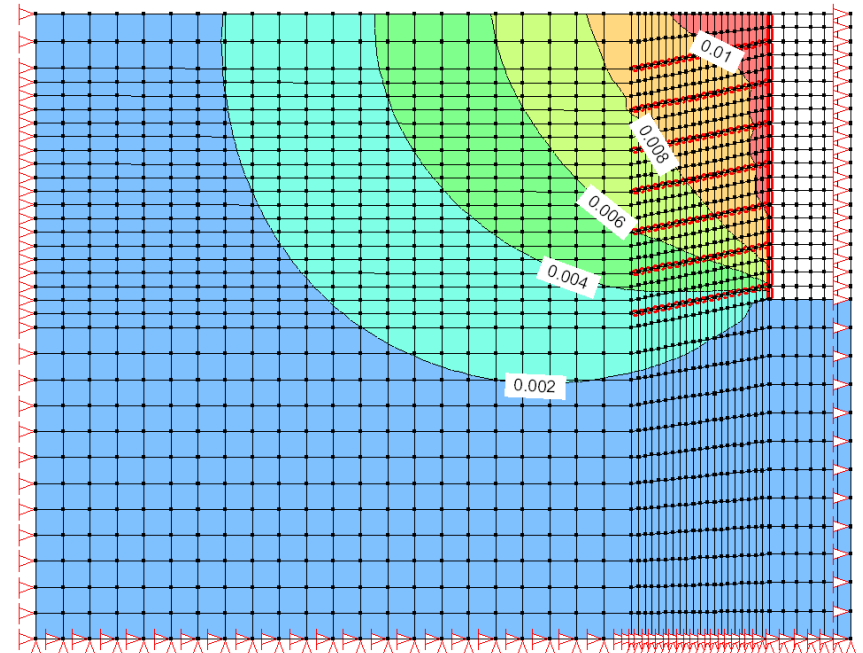


# Processos de análise

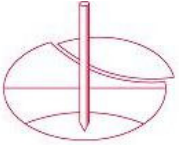
## ■ Equilíbrio limite



## ■ Tensão-deformação

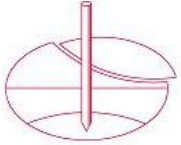






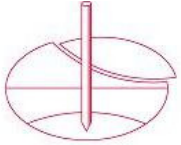
# Processos de análise

- Equilíbrio limite
  - Modelos mais simples
  - Parâmetros mais usuais ( $c$ ,  $\phi$ )
  - Frequentes na prática
  - Não permitem previsão de deslocamentos...
- Tensão-deformação
  - Modelos mais complexos
  - Parâmetros de deformabilidade
  - Bem menos frequentes
  - Permitem previsão de deslocamentos (desejável para inclusões passivas!)



# Preferências

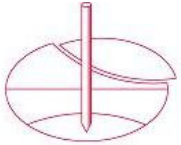
- Modelos **simples** (tanto quanto possível)
- Parâmetros facilmente **compreensíveis** (Física)
- Modelos bem **aferidos** (como selecionar parâmetros e condições de contorno para obter boas previsões)



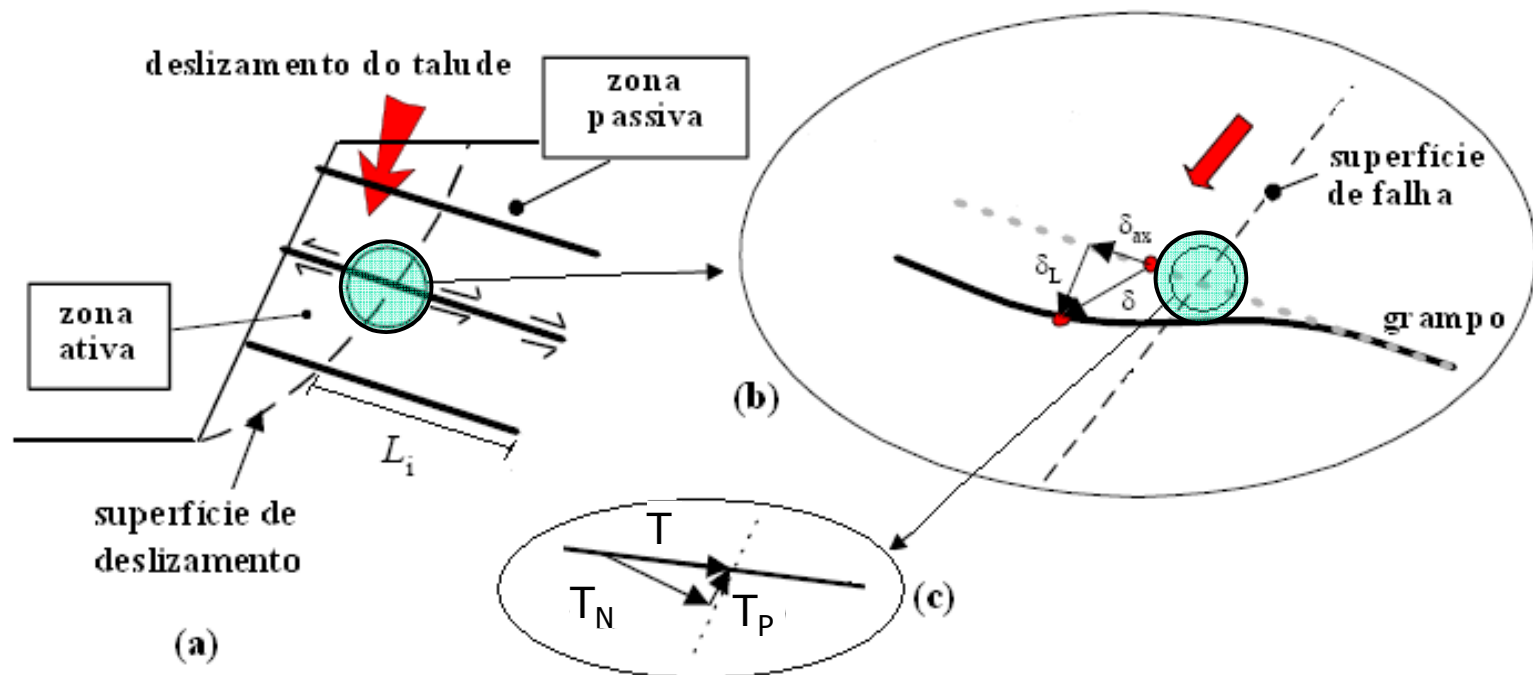
## Ainda assim...

---

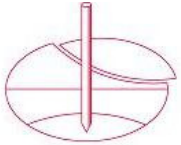
- Seria bom poder prever deslocamentos em uma técnica que
  - depende de deformações para mobilizar resistência do reforço
  - pretende causar poucos transtornos às edificações vizinhas



# Contribuições dos grampos



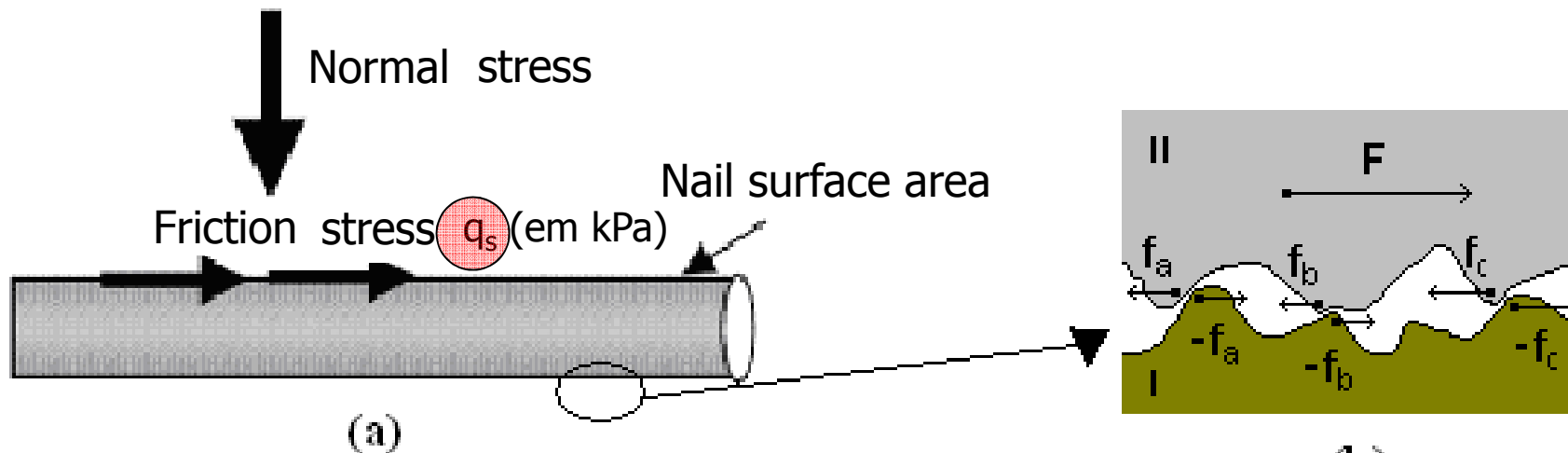




# Atrito grampo-solo

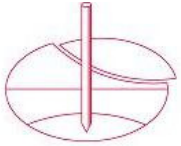
- Relevante em todos os processos

Relação entre tensão normal e atrito não é direta.



Perfuração para instalação + injeção subsequente alteram muito o estado de tensão. Fórmulas semi-empíricas para  $q_s$  ( $\sim$  estaca-raiz)

**Ensaio de arrancamento** é a melhor forma de estimar  $q_s$ .



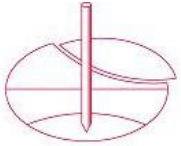
# Brasileira USP - arrancamento



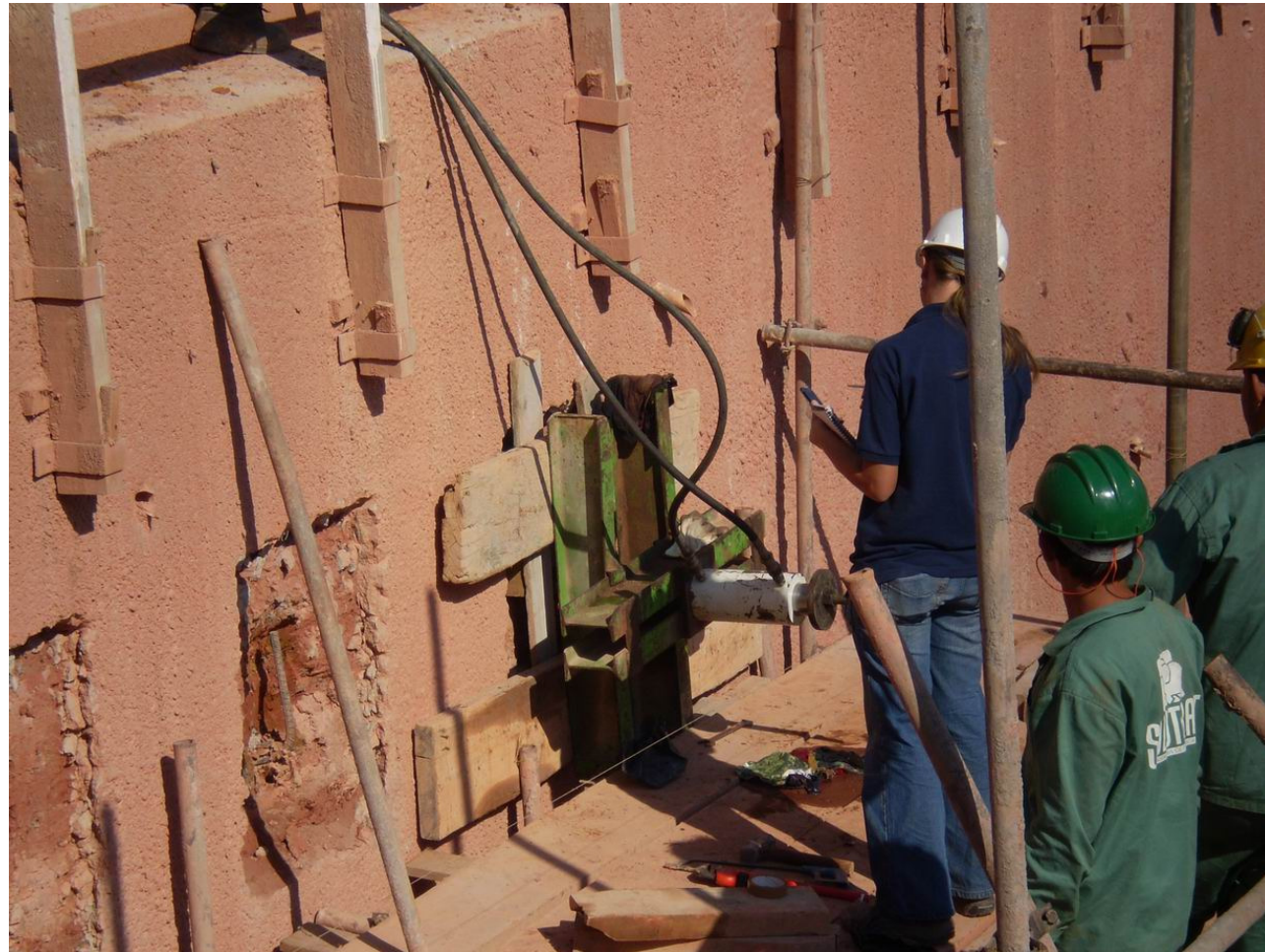
28/10/08

Waldemar Hachich

22



# Brasiliiana USP - arrancamento

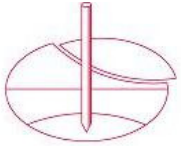


28/10/08

Waldemar Hachich

23

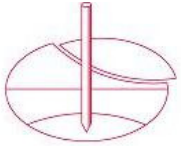




# Brasiliiana USP (antes)

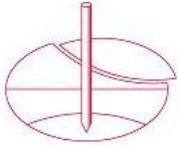






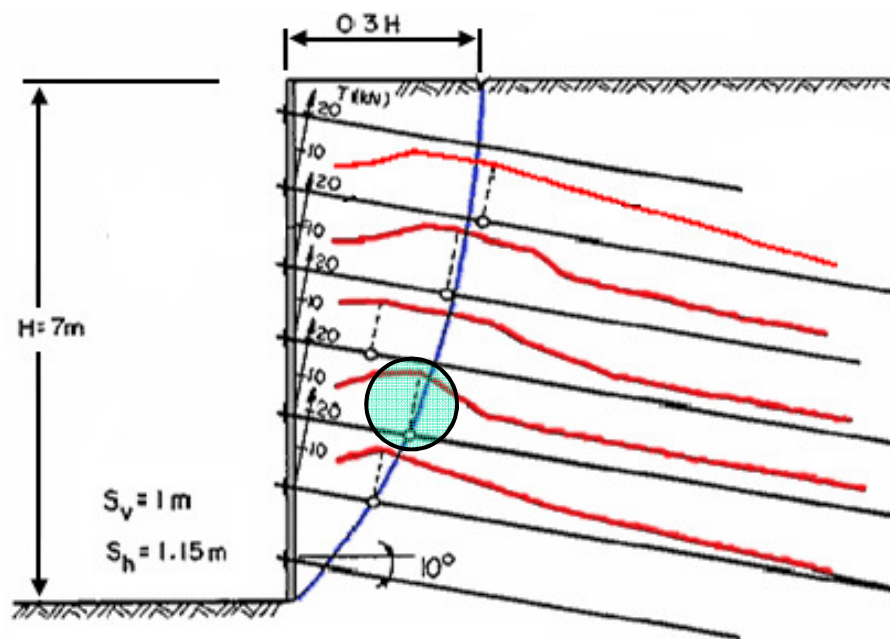
# Brasiliiana USP (depois)



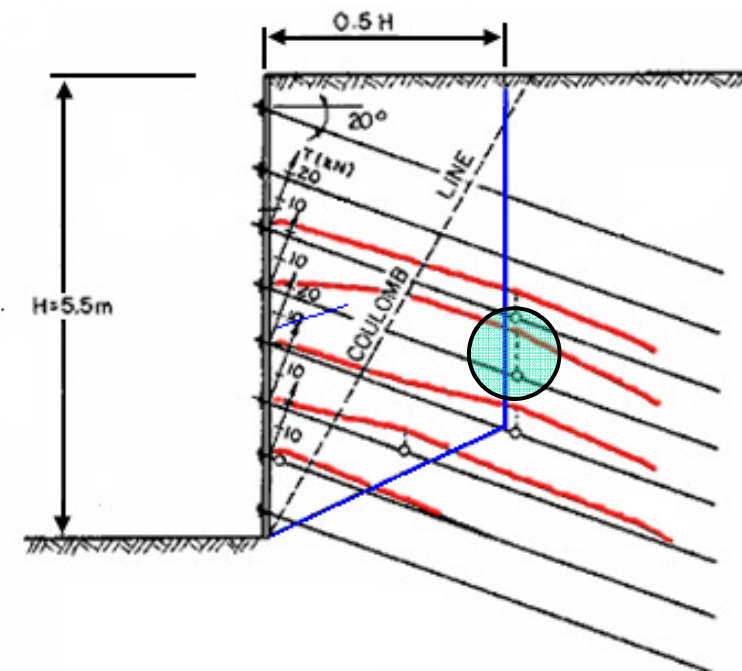


# Forças máximas na interseção

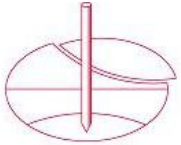
Comprovação experimental – Projeto Nacional Clouterre  
(França, últimas décadas do século XX)



(a)

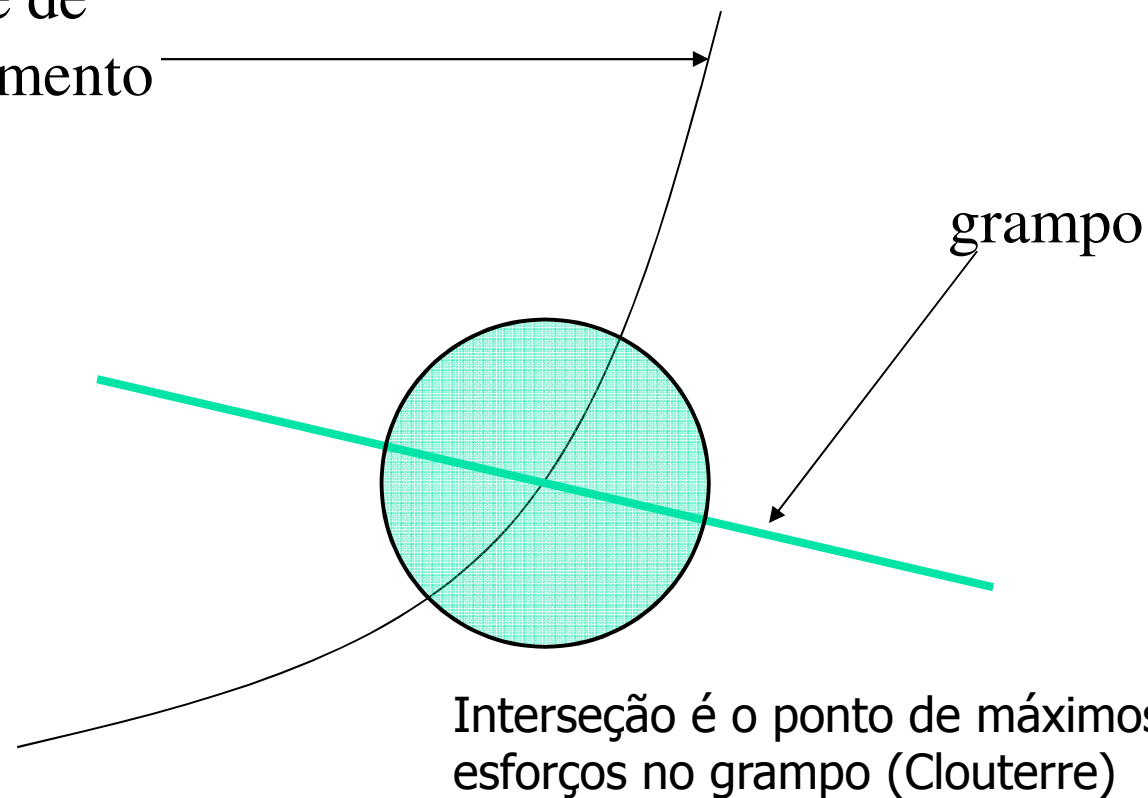


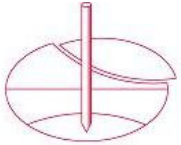
(b)



# Grampo cortando superfície

Superfície de  
escorregamento

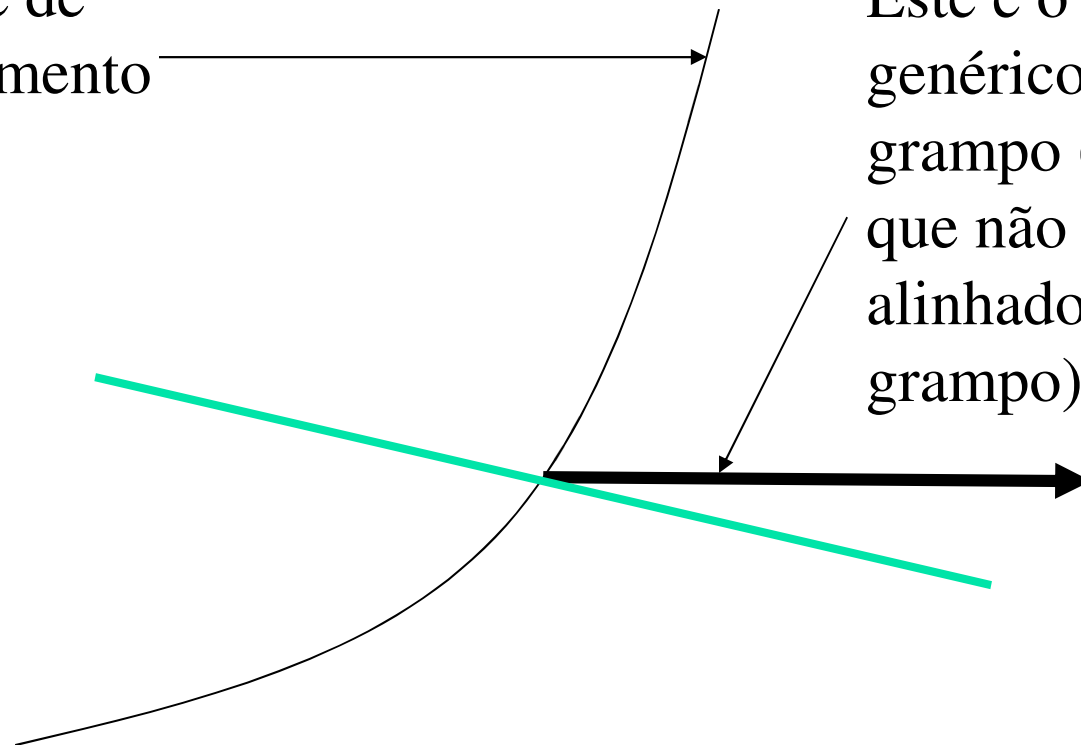


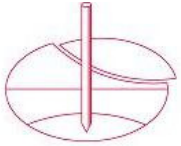


# Esforço genérico no grampo

Superfície de  
escorregamento

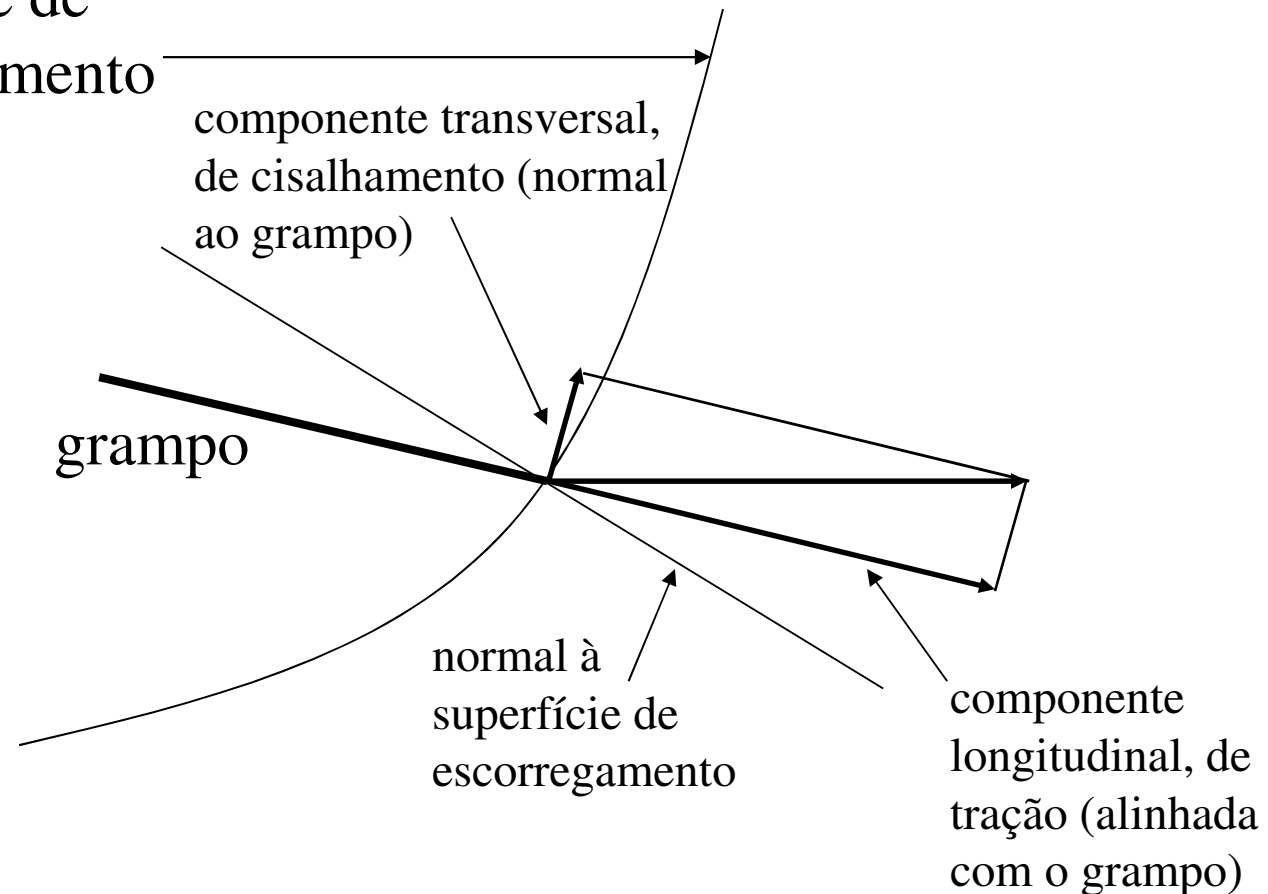
Este é o esforço  
genérico no  
grampo (observe  
que não está  
alinhado com o  
grampo)



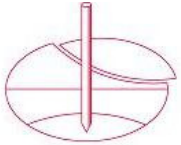


# Decomposição do esforço genérico

Superfície de  
escorregamento

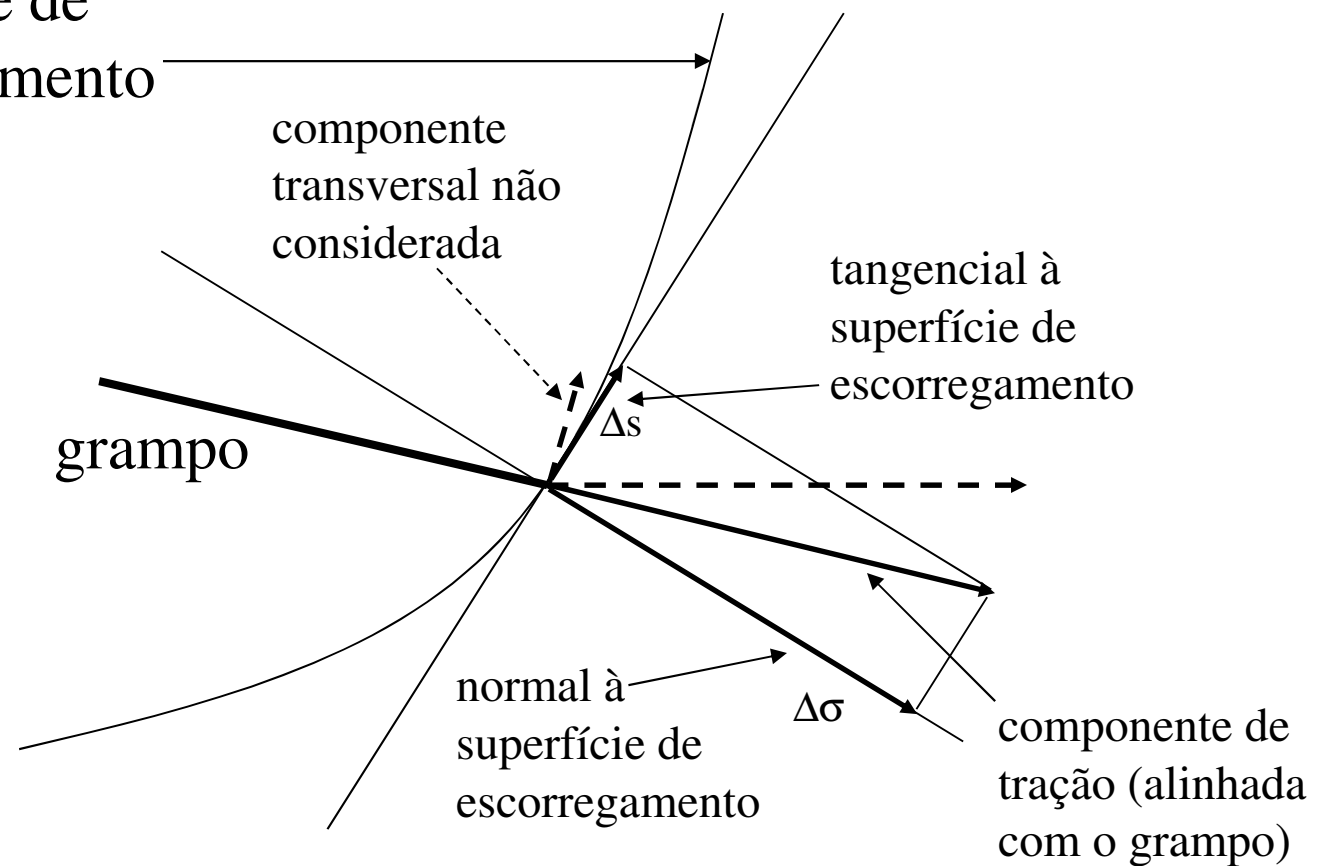


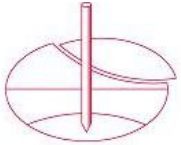




# Decomposição da componente de tração

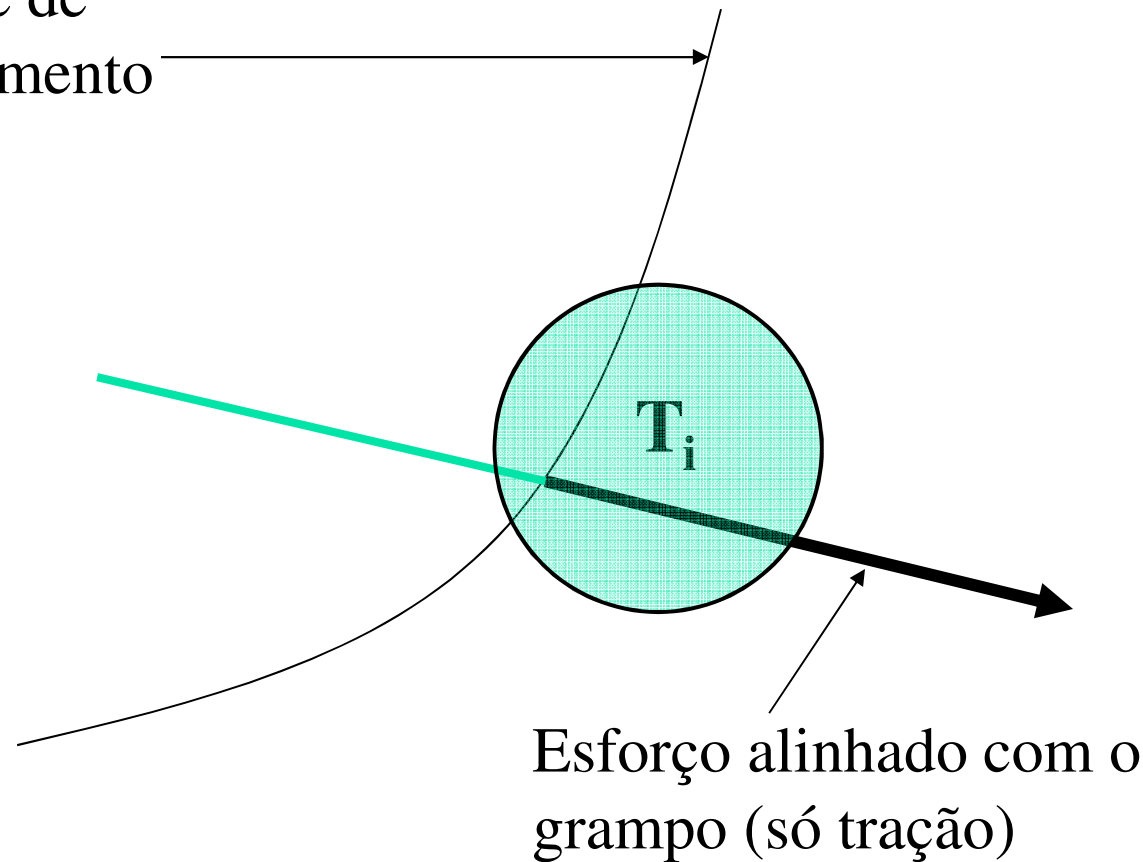
Superfície de  
escorregamento

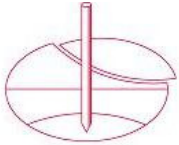




# Só tração (hipótese de vários dos processos de análise)

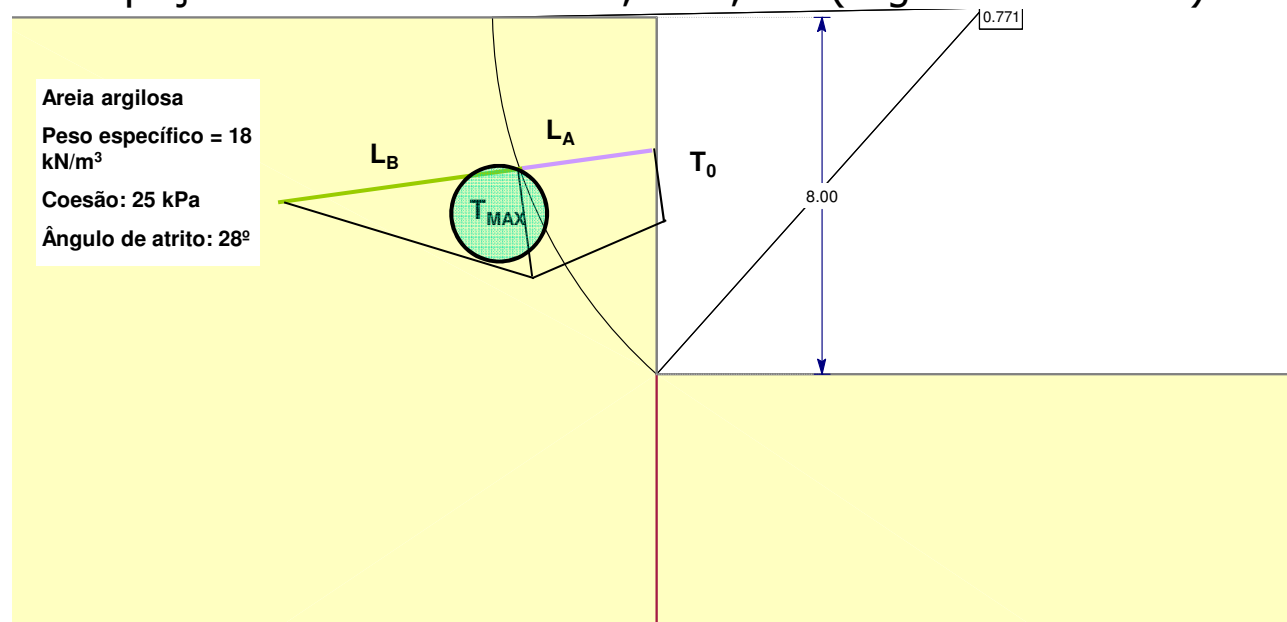
Superfície de  
escorregamento

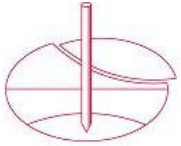




# Tração máxima ( $T_{\text{máx}}$ )

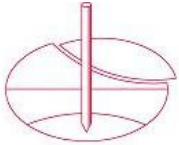
- $T_{\text{máx}} = \text{mín} (T_0 + L_A \cdot q_s; L_B \cdot q_s)$
- $T_0/T_{\text{máx}} \Rightarrow$  depende da rigidez do paramento
  - 0  $\Rightarrow$  sem paramento
  - 0,6  $\Rightarrow$  mais ou menos típico para espessura de até uns 10 cm de projetado e espaçamento da ordem de 1,2 a 1,8 m (segundo Clouterre)





# Equilíbrio limite

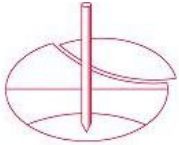
---



# Processos disponíveis

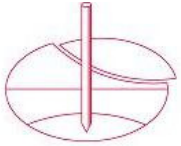
- Superfície de ruptura não atravessa região reforçada
  - Bloco monolítico (projetado como se fosse muro de arrimo)
- Superfície de ruptura atravessa região reforçada
  - Só esforços longitudinais (tração) nos grampos
    - Culmann modificado
    - Alemão (Stocker et al.)
    - Cardoso e Fernandes
    - Jewell
    - Bridle
    - Davis (Shen et al.)
    - Fellenius modificado
    - Homogeneização
  - Esforços longitudinais e transversais nos grampos
    - Juran
    - Multicritério (Schlösser)



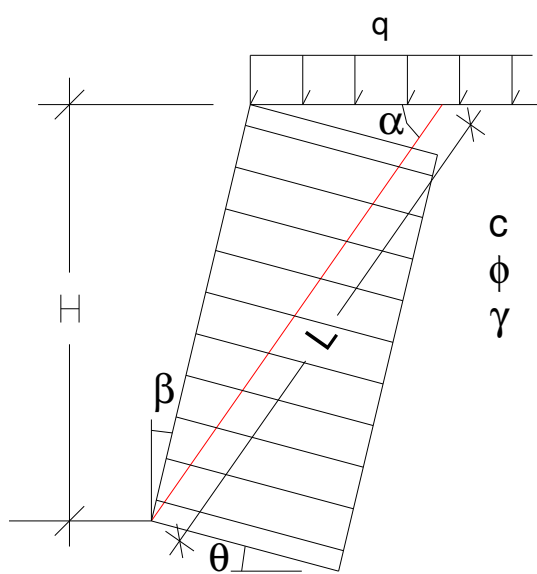


# Bloco monolítico

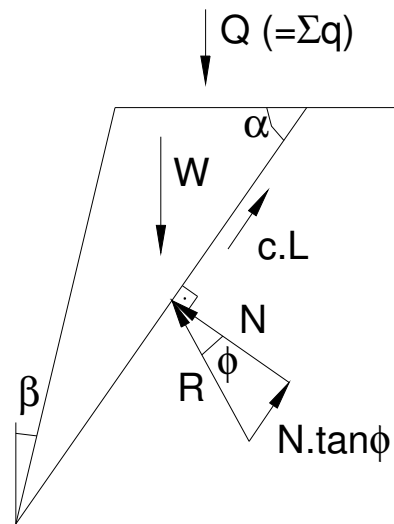
- Muro de arrimo
  - Escorregamento
  - Tombamento
  - Capacidade de carga da fundação
  - Estabilidade geral
  
- Hipótese só é realista para reforço com **alta densidade** de grampos (para constituir “bloco” de solo reforçado)



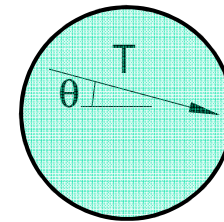
# Culmann modificado



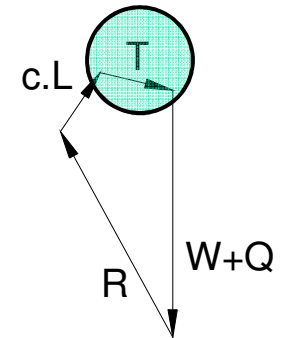
(a)



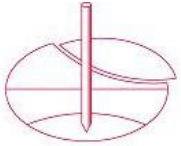
(b)



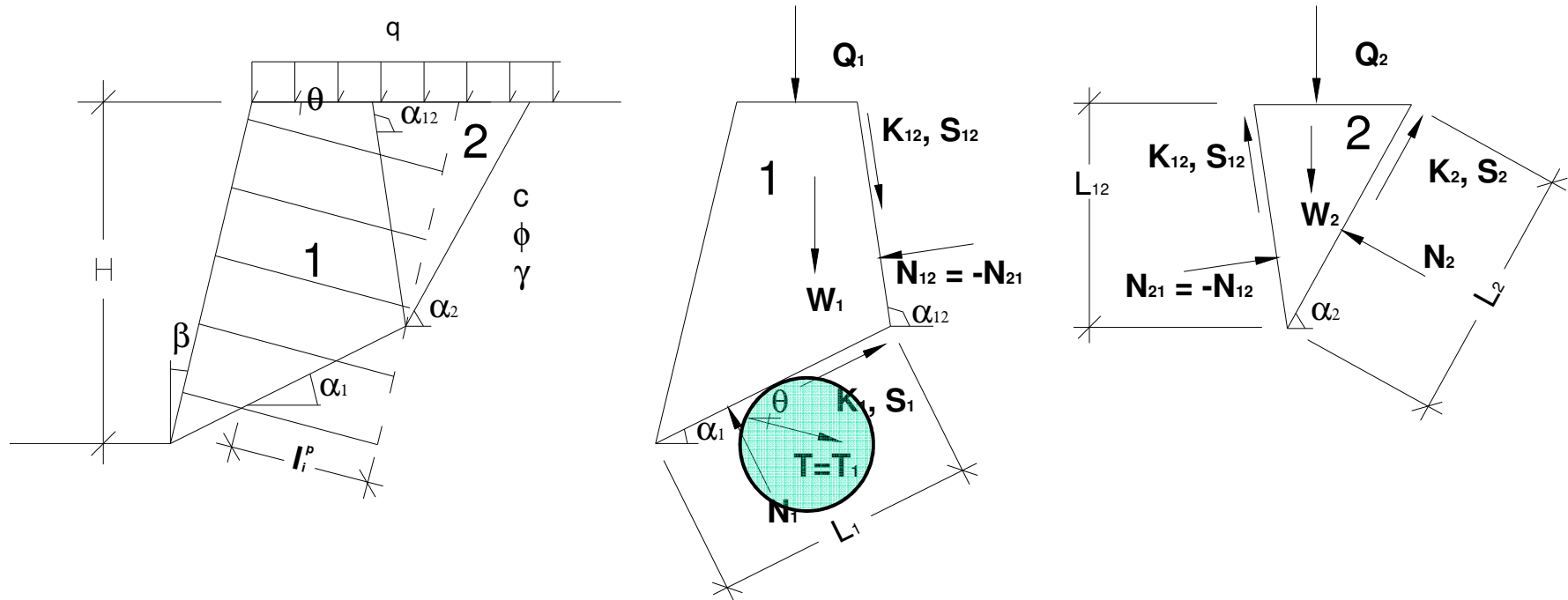
(c)

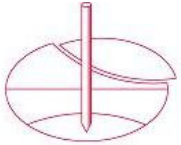


(d)

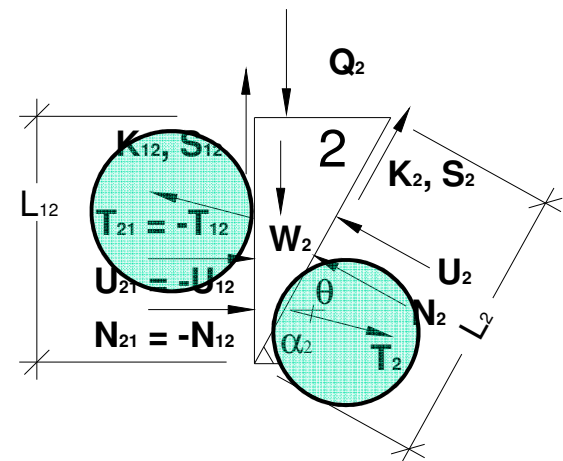
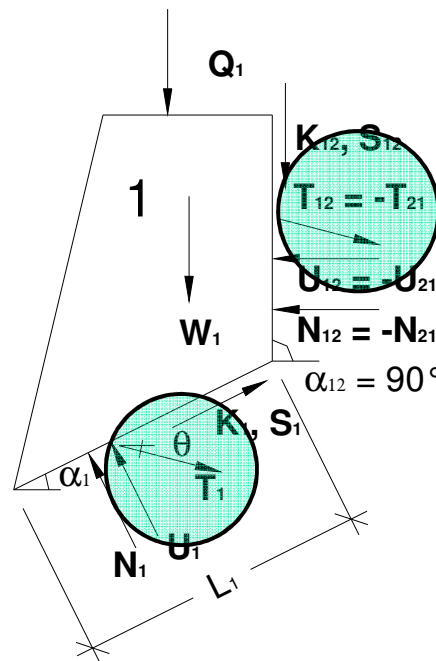
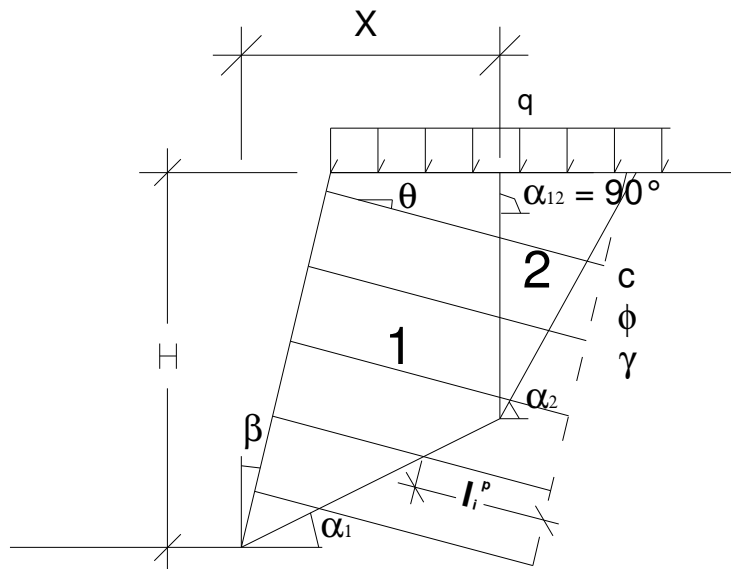


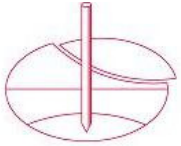
# Alemão (Stocker et al.)



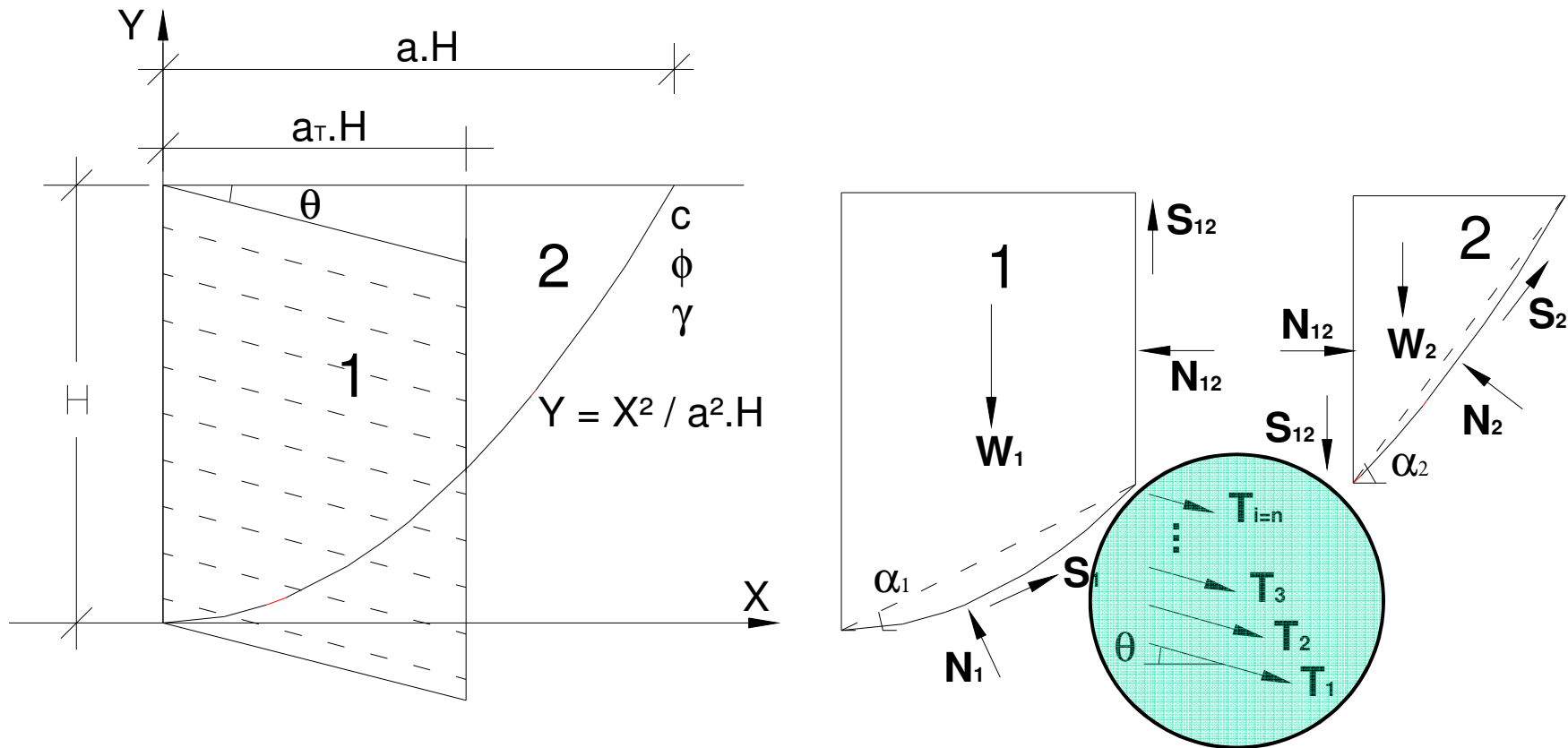


# Jewell

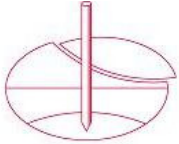




# Davis (Shen et al.)

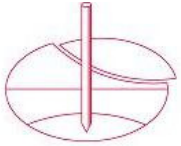




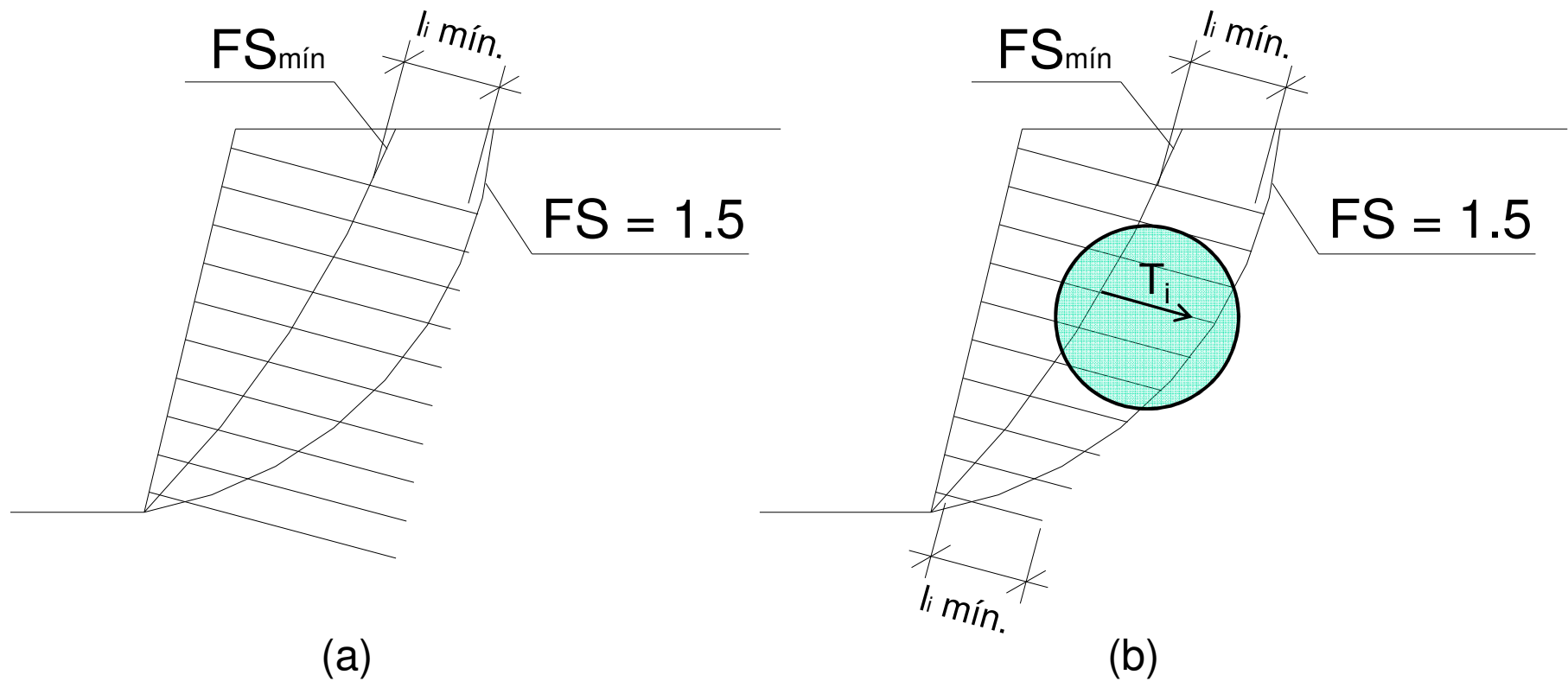


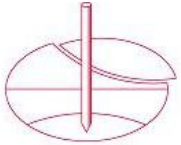
# A idéia dos dois processos seguintes

- Considerar uma análise de estabilidade convencional (equilíbrio limite)
- Calcular o coeficiente de segurança da superfície crítica
- Impor que os grampos elevem esse coeficiente de segurança para um valor adequado (em geral 1,5)
- Estimar comprimentos em função da distância entre essa superfície crítica e uma superfície que já tinha, antes do grampeamento, coeficiente de segurança adequado (em geral 1,5)



# Fellenius modificado

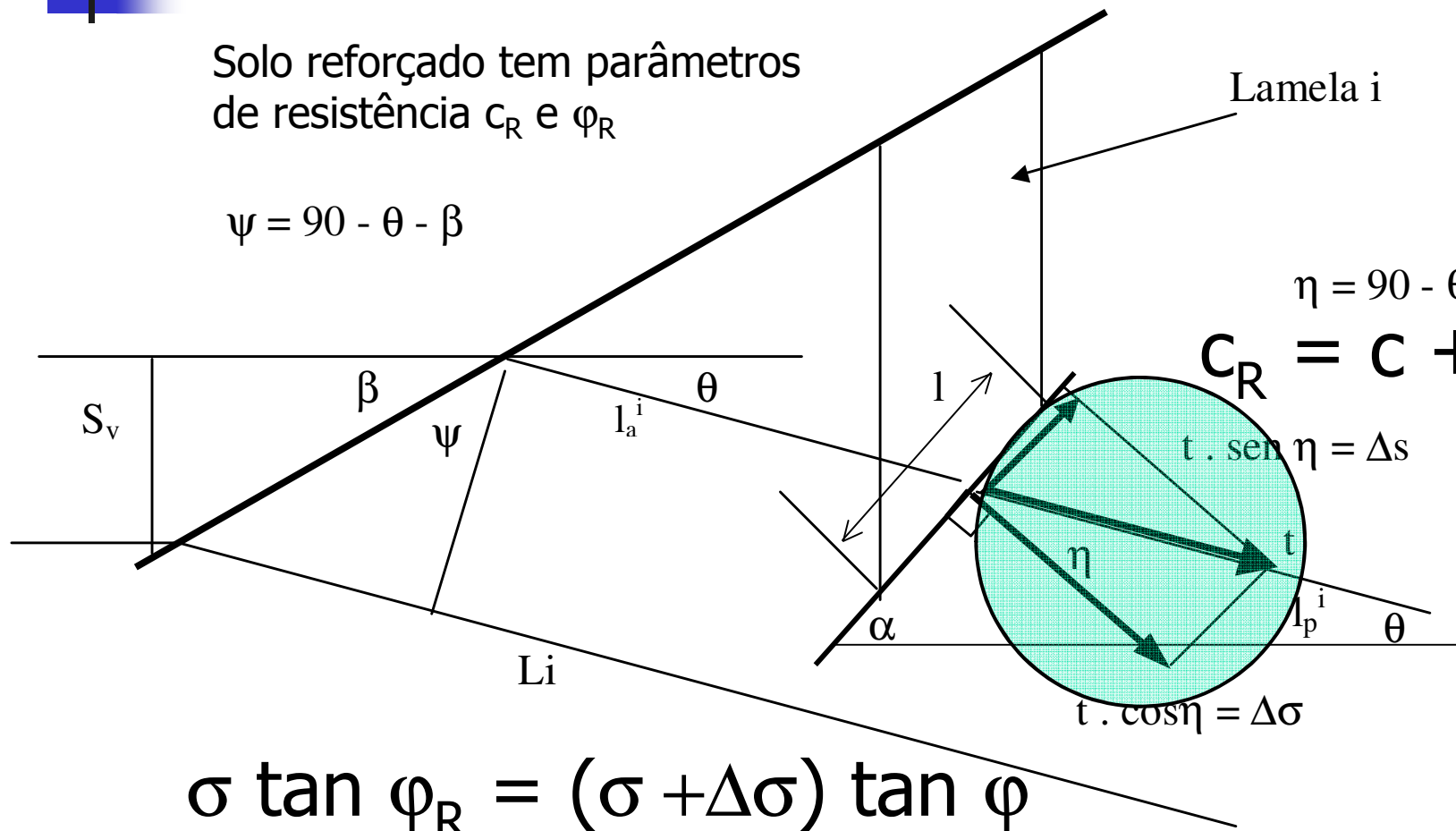




# Homogeneização

Solo reforçado tem parâmetros de resistência  $c_R$  e  $\varphi_R$

$$\psi = 90 - \theta - \beta$$



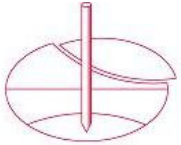
$$\eta = 90 - \theta - \alpha$$

$$C_R = C + \Delta S$$

$$t \cdot \sin \eta = \Delta s$$

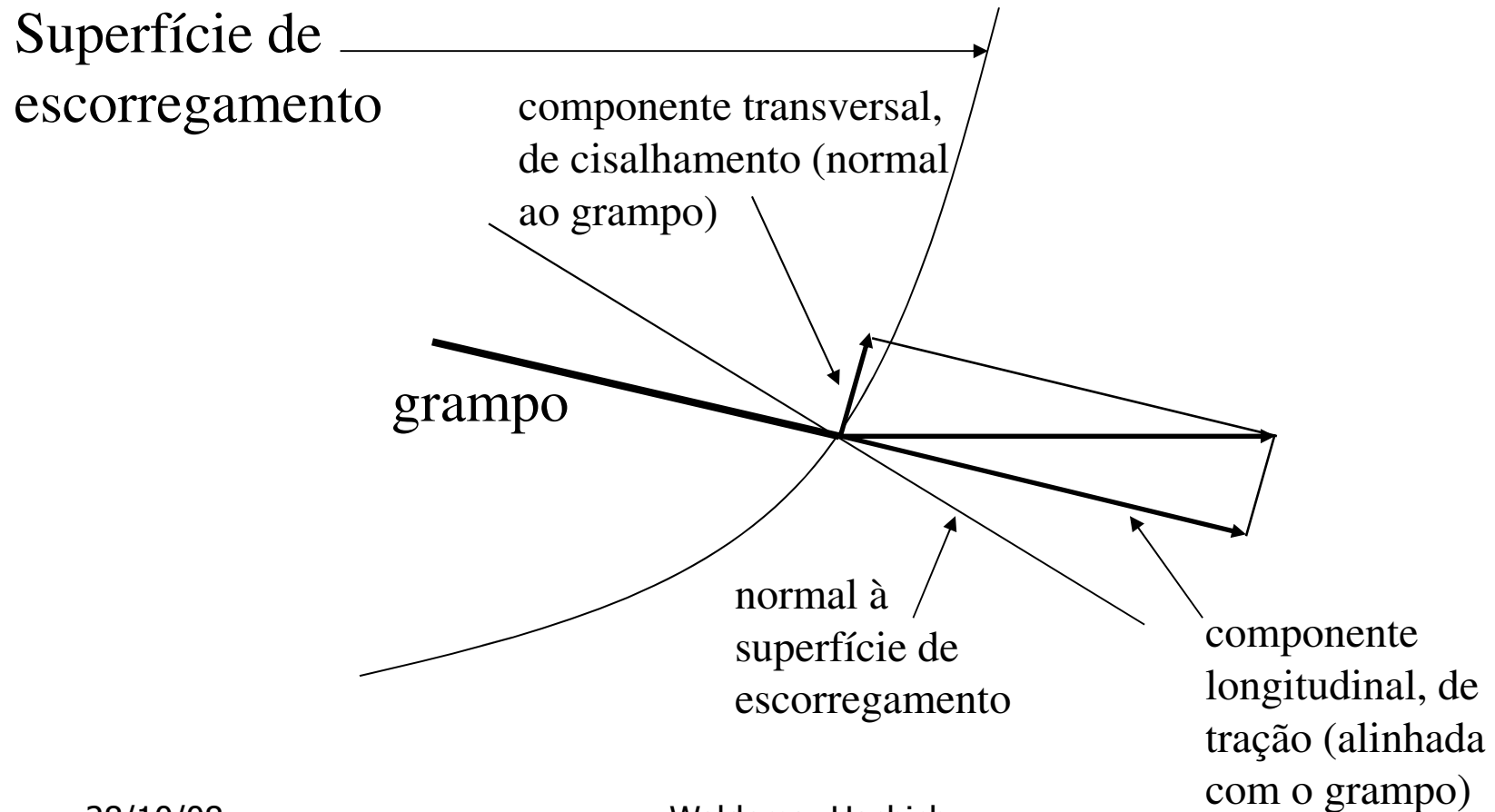
$$t \cdot \cos \eta = \Delta \sigma$$

$$\sigma \tan \varphi_R = (\sigma + \Delta \sigma) \tan \varphi$$

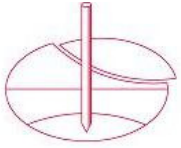


# A idéia dos dois processos seguintes...

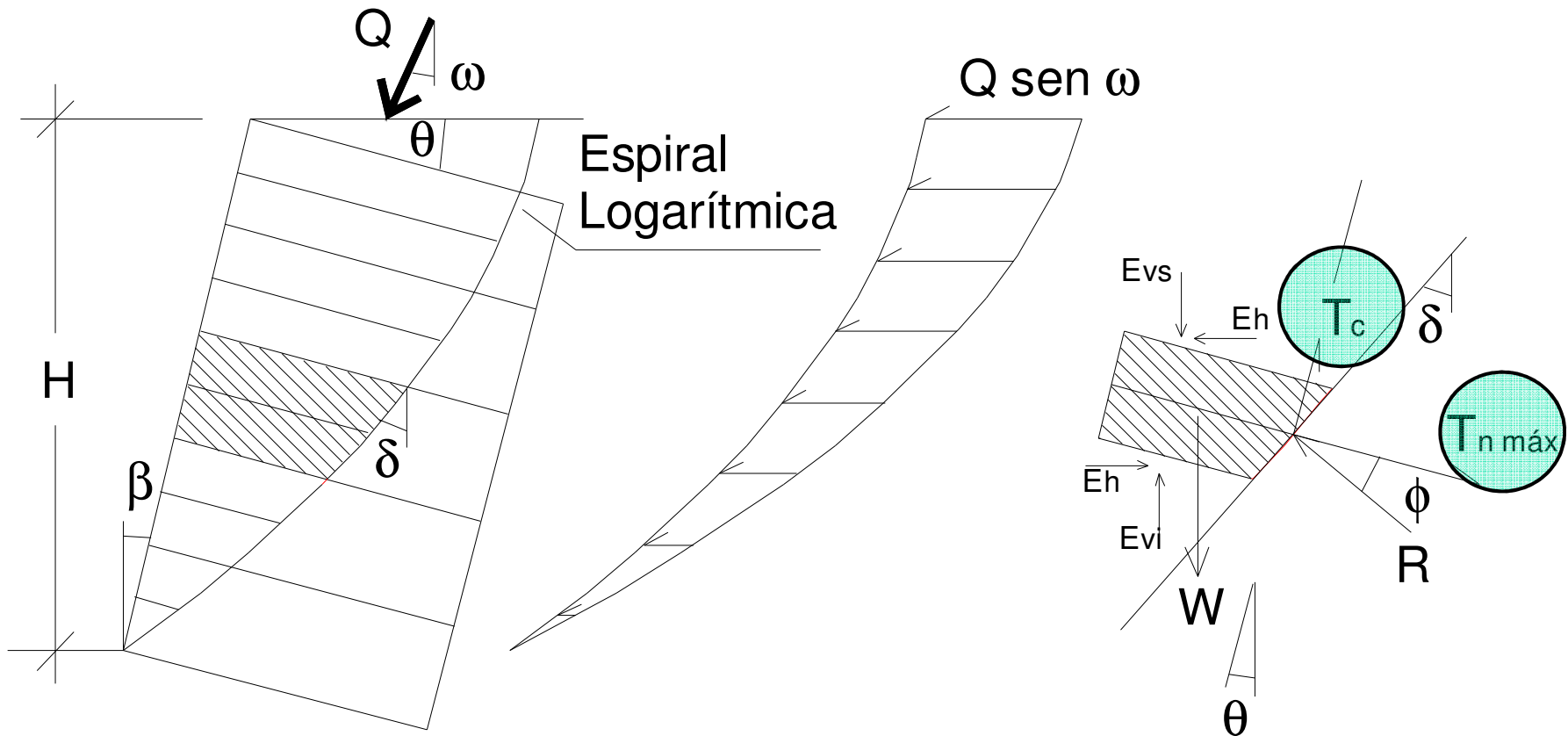
Grampos não trabalham exclusivamente à tração!

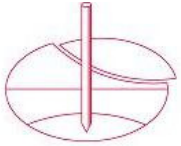




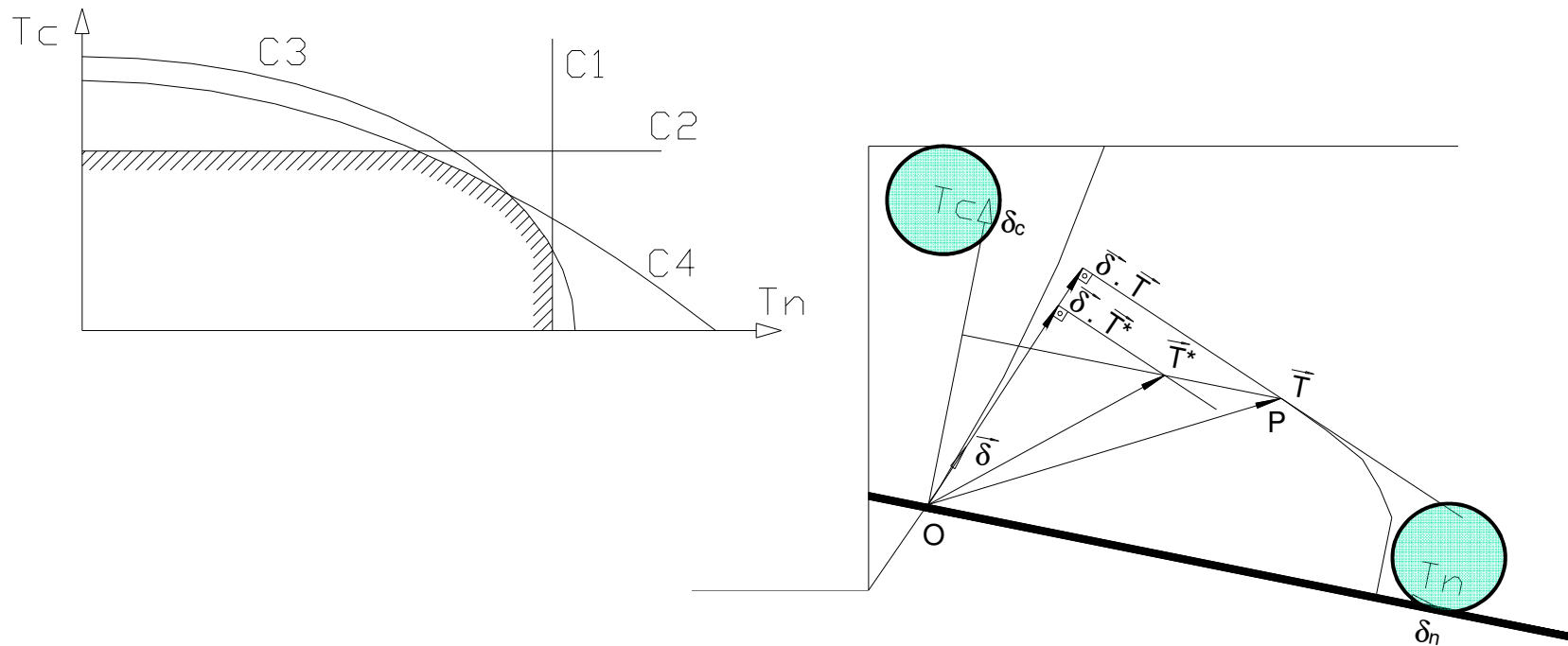


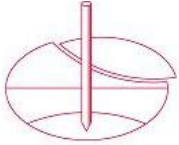
# Juran





# Multicritério (Schlösser)

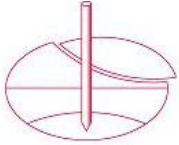




# Processos disponíveis

---

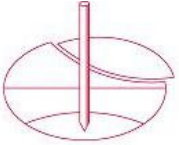
- Bloco monolítico
- Culmann modificado
- Alemão
- Cardoso e Fernandes
- Jewell
- Bridle
- Davis
- Fellenius modificado
- Homogeneização
- Juran
- Multicritério



# Processos comparados

---

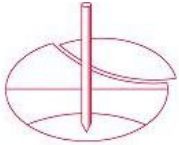
- Jewell
- Davis
- Fellenius modificado
- Homogeneização
- Juran
- Multicritério



## Pontos em comum

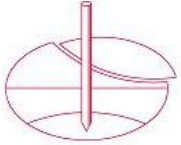
- Todos consideram força de tração nos grampos
- Máximas forças nos grampos na interseção com a superfície de escorregamento ( $T_{\text{máx}}$ )
- Incorporação de pressões neutras é possível
- Nenhum calcula os deslocamentos
- Nenhum dimensiona o paramento





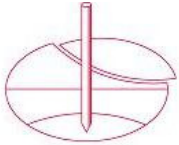
# Principais diferenças

- Representação do modo de colapso
  - Forma da(s) superfície(s)
  - Influência dos grampos na localização da(s) superfície(s) crítica(s)
- Contribuição dos grampos
  - Todos, com exceção dos dois últimos, consideram apenas tração nos grampos ( $\sim$  grampos “flexíveis”)
  - Contribuição individual de cada grampo nem sempre calculada
  - Coeficientes parciais de segurança muito diferentes (nem sempre consistentes com compatibilização de deslocamentos)



## Casos para comparação

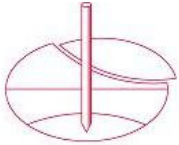
1. obra já executada em São Paulo
2. caso relatado como exemplo em Juran et al. (1990)
3. caso hipotético, com contribuição transversal dos grampos
4. caso hipotético idêntico ao 3, sem contribuição transversal dos grampos (grampos "flexíveis")



# Dados dos casos analisados

Tabela 1. Dados dos casos analisados

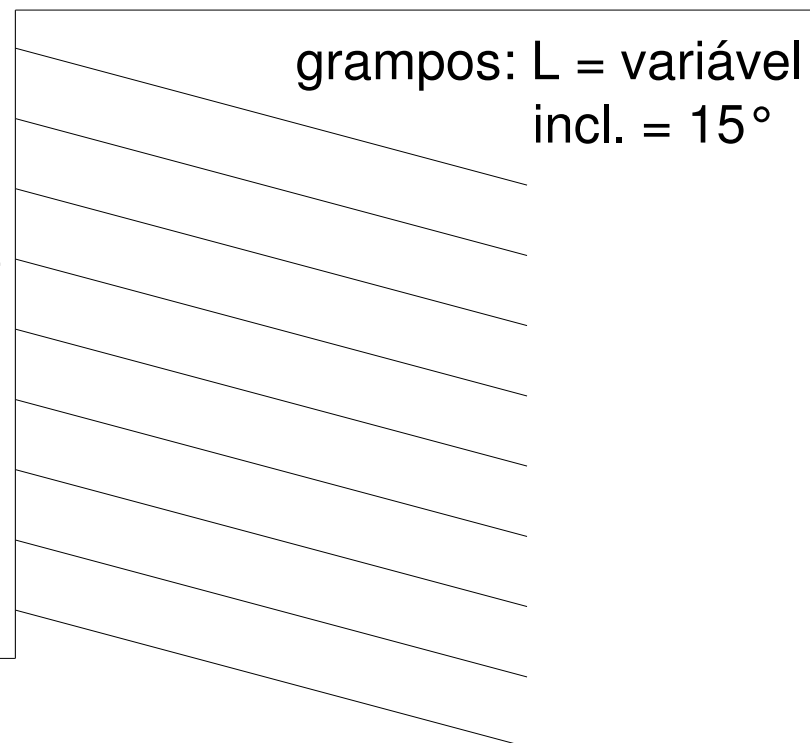
Casos	1 (obra real)	2 (ex. Juran)	3 e 4 (hipotéticos)
altura (m)	12	12	7
$L_{\text{GRAMPO}}$ (executado) (m)	10		
$s_V$ (executado) (m)	1,3		
$s_H$ (executado) (m)	1,3		
$c$ (kPa)	44	12	14
$\phi$ ( $^\circ$ )	14	35	30
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17	20	20
$f_{yk \text{ GRAMPO}}$ (MPa)	500	168	500
$\Phi_{\text{GRAMPO}}$ (mm)	20		20
$\Phi_{\text{PERF}}$ (mm)	75	100	75
inclinação dos grampos com a horizontal ( $^\circ$ )	15	15	15
atrito solo-grampo (kPa)	140	120	60

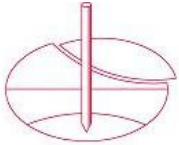


# Caso 1 (caso real, SP)

$H = 12 \text{ m}$   
face vertical  
 $e_v = e_h = 1,30 \text{ m}$   
diam. furo = 7,5 cm  
barras 1",  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

$c' = 44 \text{ kPa}$   
 $\phi' = 14^\circ$   
 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$



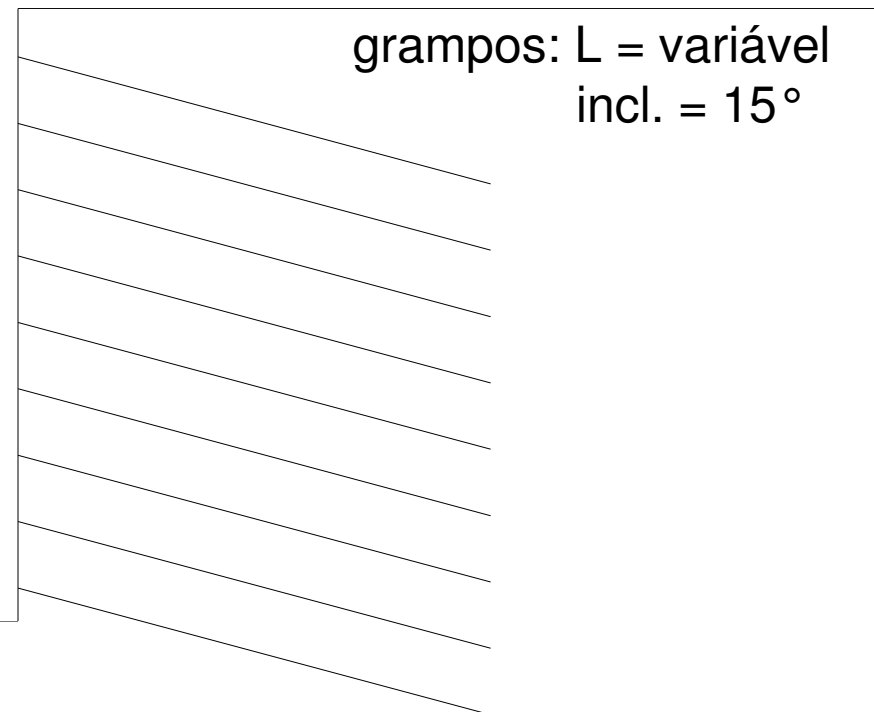


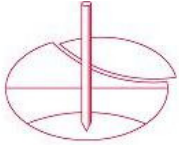
## Caso 2 (de Juran, 1990)

### CASO ANALISADO

$H = 12 \text{ m}$   
face vertical  
 $e_v = e_h = 1,35 \text{ m}$   
diam. furo = 10 cm  
barras 1",  $f_{yk} = 168 \text{ MPa}$

$c' = 12 \text{ kPa}$   
 $\phi' = 35^\circ$   
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

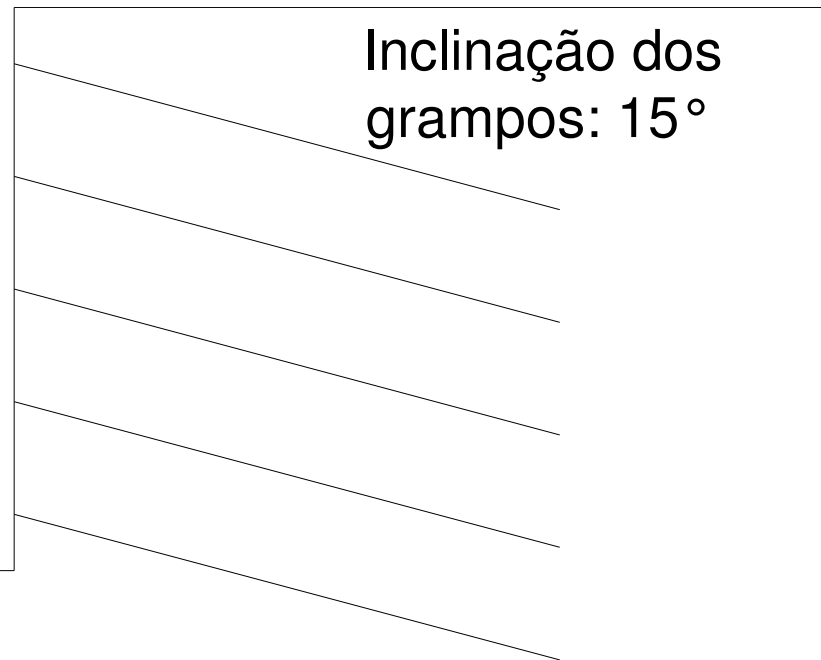




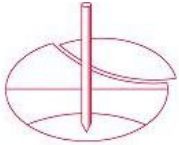
## Casos 3 e 4

$H = 7 \text{ m}$   
face vertical  
diam. furo = 7,5 cm  
barras  $\phi 20 \text{ mm}$   
 $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

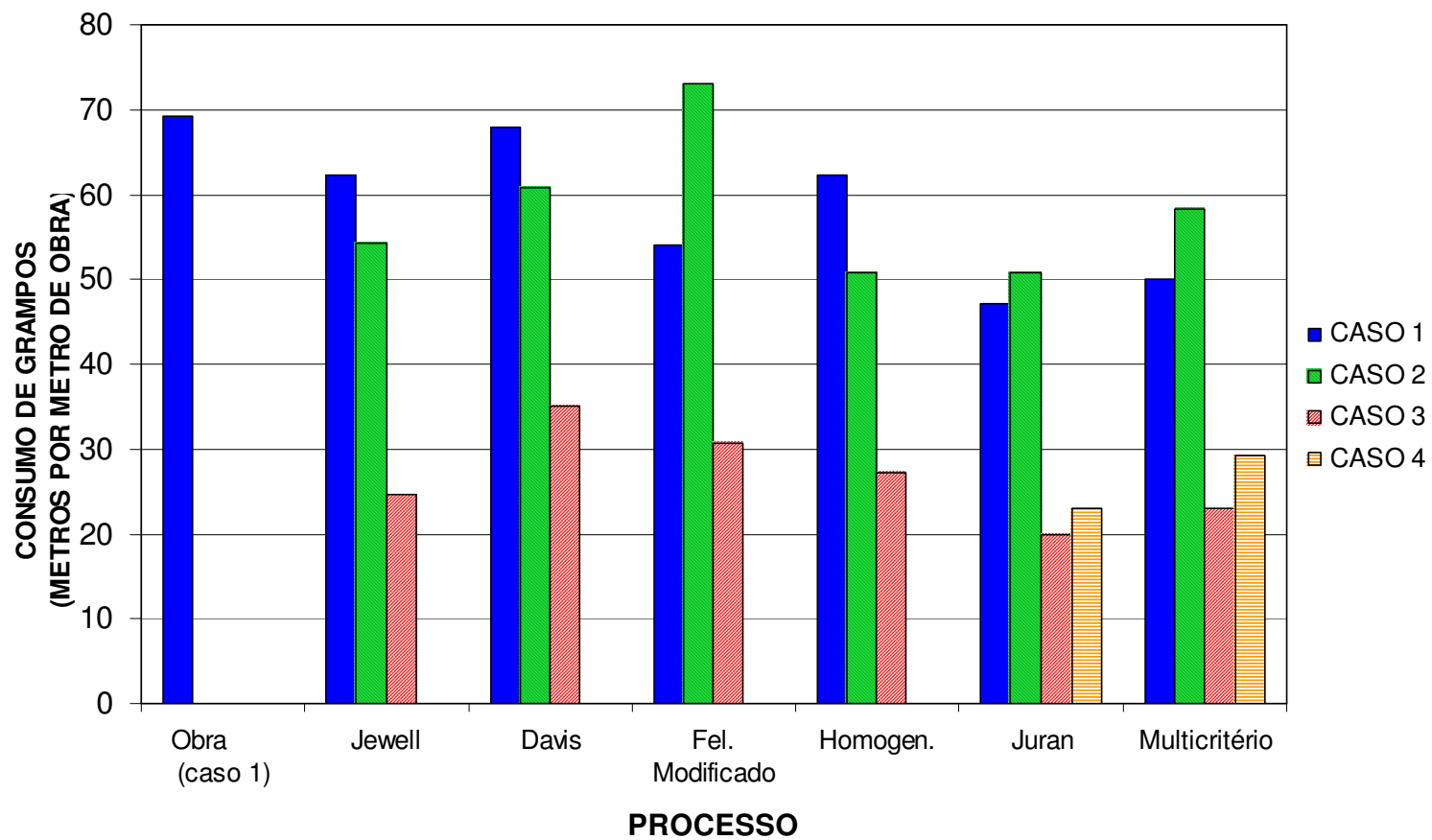
$c' = 14 \text{ kPa}$   
 $\phi' = 30^\circ$   
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

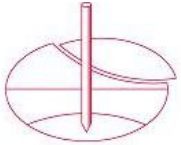






# Comparação de consumo / m





# Informação adicional e comentários

- ISSMGE – TC17
- Waldemar Hachich
- [www.pef.usp.br/docentes/whachich](http://www.pef.usp.br/docentes/whachich)
- [whachich@usp.br](mailto:whachich@usp.br)

