

Estabilidade de Taludes em Solo

Introdução

Conceitos básicos, parâmetros e soluções

Fernando A. M. Marinho

2020

Por que as Coisas Caem?



Anúbis pesando o coração de uma sacerdotisa. O órgão é colocado no prato da esquerda, enquanto no prato da direita tem-se a representação da verdade.

A “Gravidade” dos Fatos

Santa Catarina 2008



A “Gravidade” dos Fatos



Santa Catarina 2008

A “Gravidade” dos Fatos



Angra dos Reis 2010

Consequências



- F.S. próximo de 1 após a ruptura
- F.S. aumenta com o tempo, mas depende das condições ambientais



Consequências



Consequências



Vegetação Natural e Ambiente modificado pelo Homem



Sem entrar na "mata" não se percebe as rupturas.



Consequências

Deslizamento com formação de barramento de córrego



Dois deslizamentos. O segundo com vítimas



Consequências



A “Gravidade” dos Fatos

1. Grande parte dos conhecimentos que adquirimos vem de experiências com acidentes.
2. Os métodos de análise que iremos usar devem estar associado a nossa experiência com eles e não apenas com suas características teórico/científicas.
3. Problemas com taludes podem sempre ser diferentes.
4. Nem sempre o uso de métodos mais sofisticados nos leva a uma correta avaliação. As hipóteses envolvidas e os parâmetros controlam a solidez das análises.
5. Os métodos de análise baseados na experiência devem sempre serem reavaliados.
6. É fundamental se entender os agentes de instabilização.
7. A compreensão destes agentes permitirá: um melhor projeto e método construtivo e possibilitará uma melhor definição das causas de eventuais rupturas.

A estabilidade

Uma constatação

“O requerimento fundamental para a estabilidade de taludes é:

A resistência ao cisalhamento do solo deve ser maior do que resistência ao cisalhamento mobilizada.”

Como induzir uma instabilidade?

Reduzindo a resistência ao cisalhamento do solo ou aumentando as tensões cisalhantes.



Presença da água (fluxo, drenagem, vazamentos, chuva)
Erosões
Terremotos, vibrações
Carregamentos
Escavações

Fatores de: Segurança Deslocamentos

Objetivos:

- Garantir a segurança
- limitar deslocamentos
- Cobrir incertezas

Fator de segurança:

- Fator aplicado ao carregamento que leva a ruptura
- Cobre incertezas e garante a segurança

Fator de carga:

- Fator aplicado ao carregamento para minimizar deslocamentos

Fator de segurança ou de carga globais:

- Aplicados uma vez na resistência do solo ou carregamento.

Fator de segurança ou de carga parciais:

- Aplicados separadamente às cargas e parâmetros do solo.

Fator de Segurança

$$FS = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\tau}$$

Resistência ao cisalhamento disponível

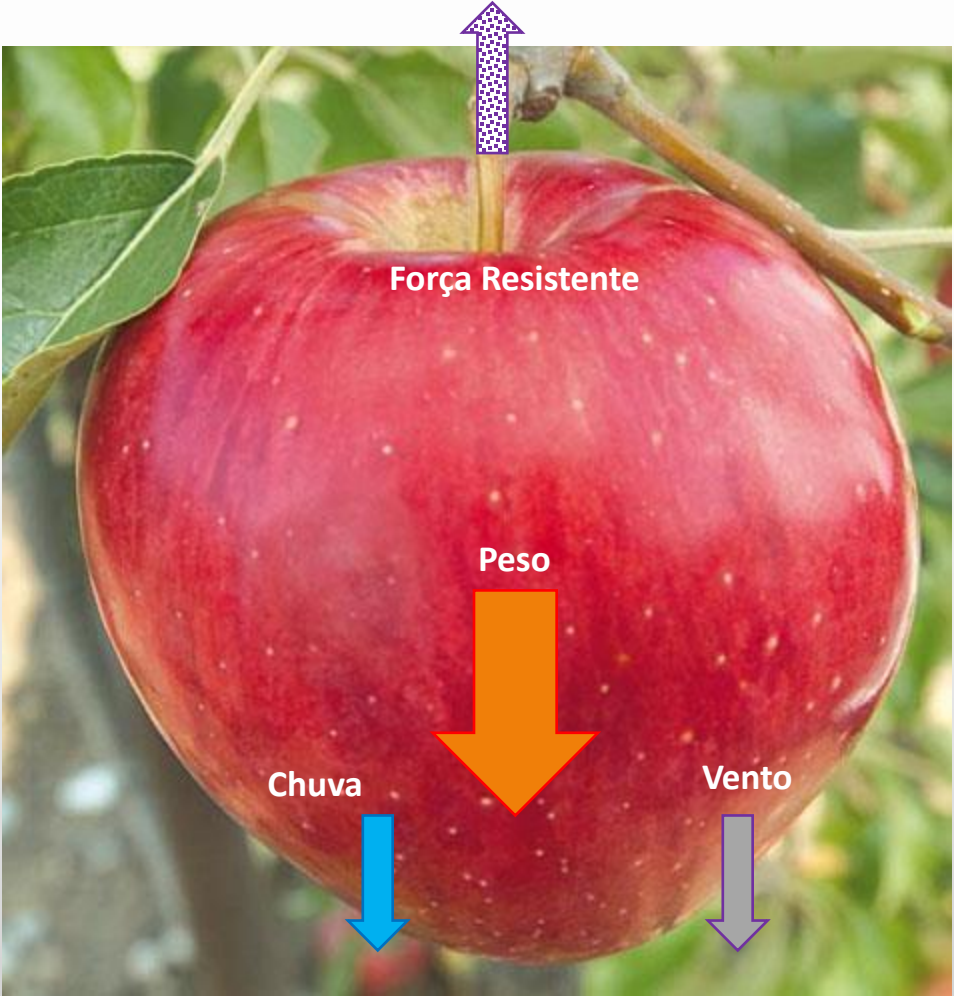
Resistência ao cisalhamento mobilizada

Fator de segurança parciais

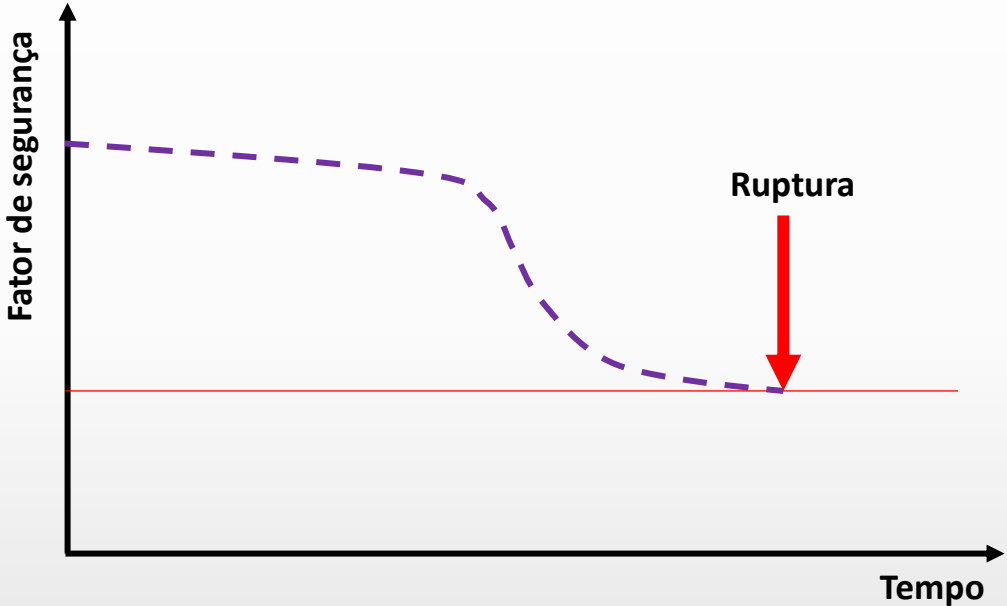
$$\tau = \frac{c'}{F_s} + \sigma' \frac{\tan \phi'}{F_s}$$

$$\tau = c'_m + \sigma' \tan \phi'_m$$

Por que as coisas caem?
Por que as coisas não caem?
Quando as coisas vão cair?



Se a força resistente = peso \Rightarrow Fator de Segurança = 1



Por que as coisas caem?

Redução da Resistência ao Cisalhamento

1. Aumento da pressão da água dos poros
2. Trincas
3. Expansão
4. Planos de ruptura pré-existentes
5. Lixiviação
6. Intemperização
7. Carga cíclica

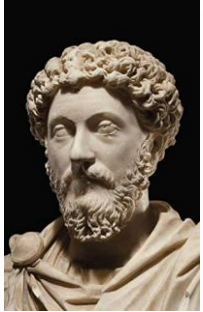
Aumento da tensão Cisalhante

1. Carga no topo do talude.
2. Aumento do peso do solo devido ao aumento do teor de umidade.
3. Escavação no pé do talude.
4. Terremoto

Qual a causa de uma ruptura?



Qual a causa de uma ruptura?



“Estamos muito acostumados a atribuir a uma única causa aquilo que é produto de várias, e daí a maioria de nossas controvérsias.”

Marco Aurélio

“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é a hora de entender mais, para que tenhamos menos medo.”

Marie Curie



“Conclusões sobre as Causas de uma Ruptura”

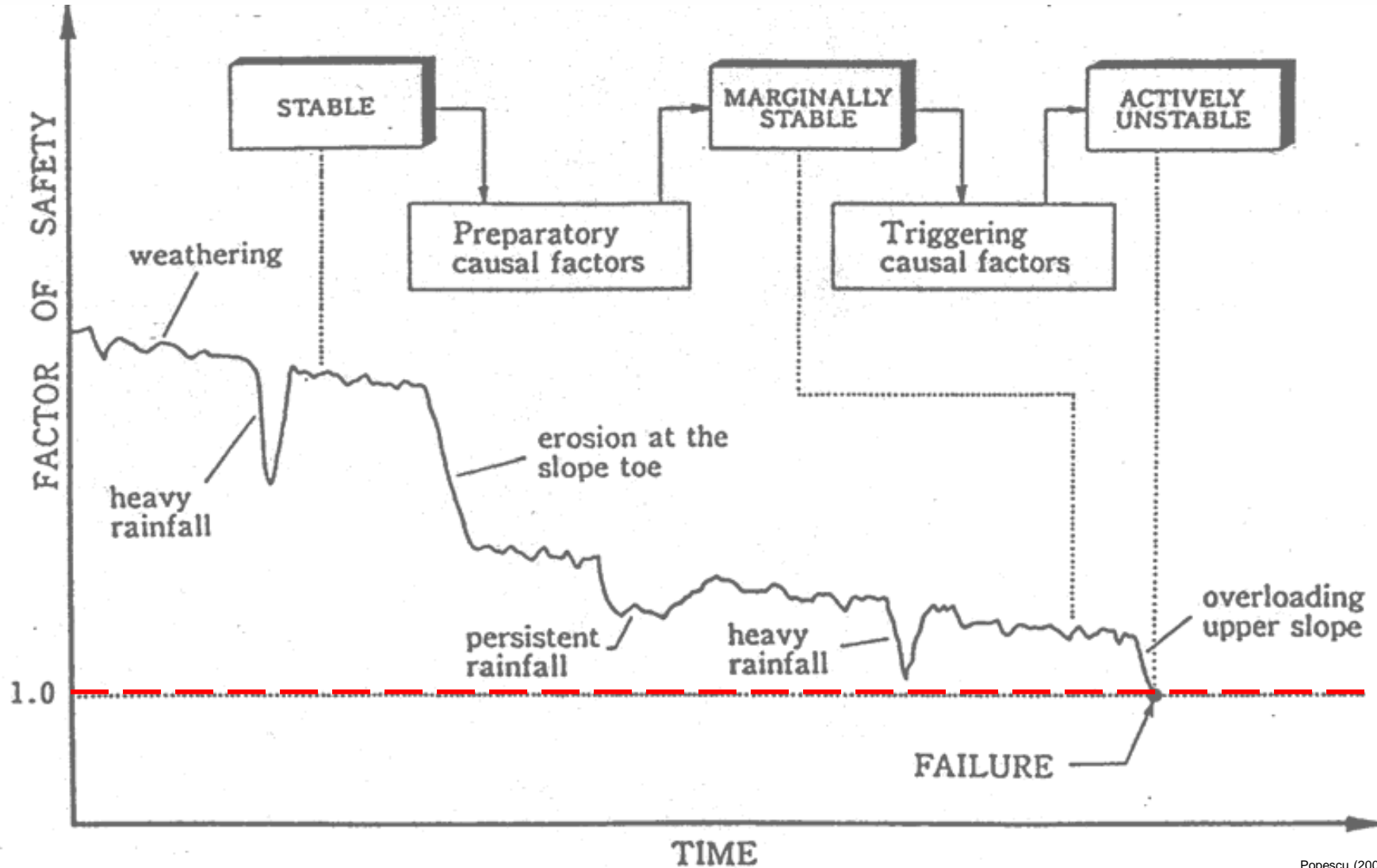
O evento B aconteceu imediatamente após o evento A.
Logo, o evento A é a causa do evento B.

Causa Única x Várias Causas x Conhecimento

Degradação do FS com o tempo

“Calling the final factor the cause is like calling the match that lit the fuse that detonated the dynamite that destroyed the building the cause of the disaster”

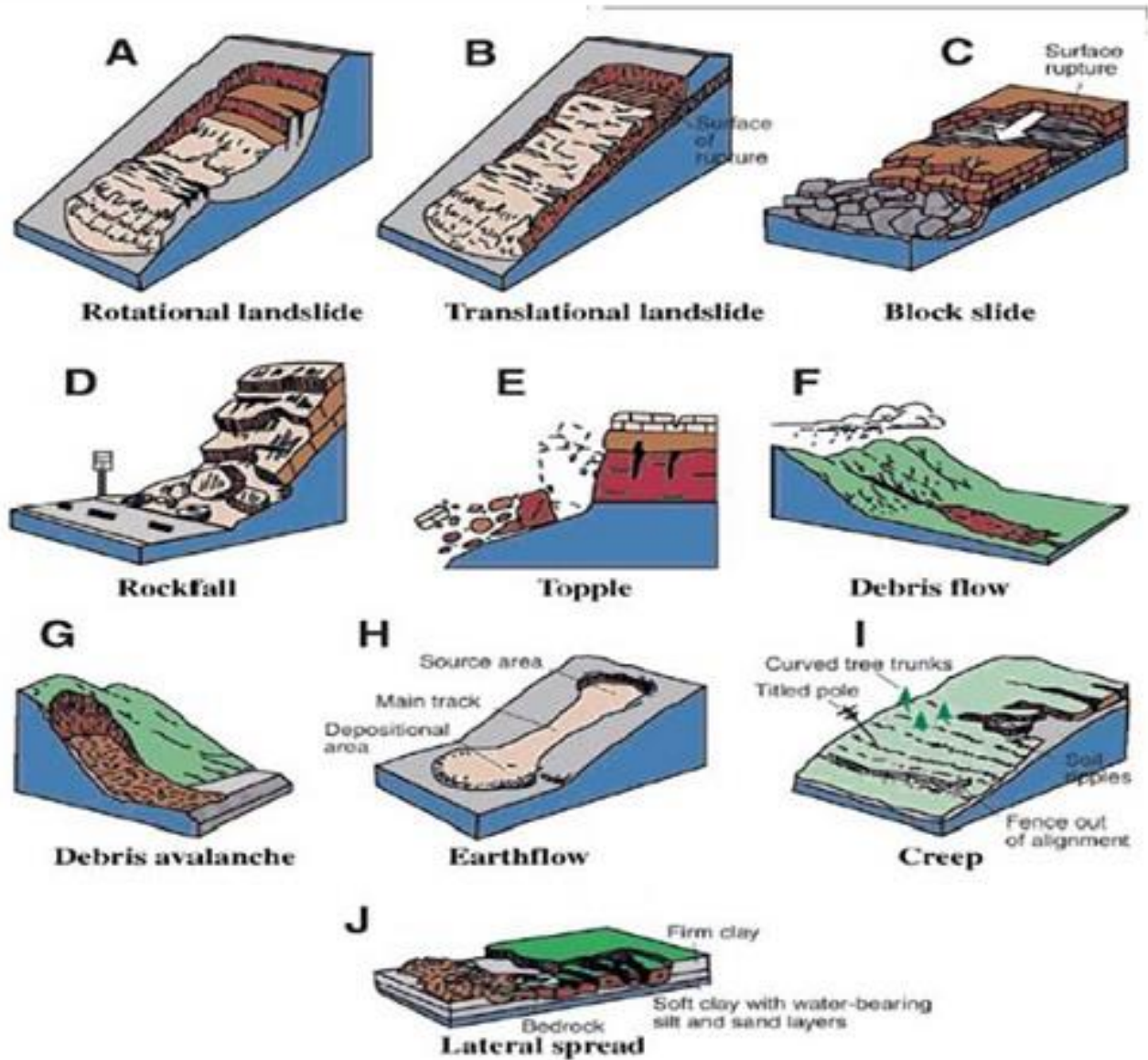
Sowers (1979).





**A Natureza Trabalha com um Fator de
Segurança Pouco Acima de 1**

Mecanismos de Ruptura



Combinação de Fatores

Chuva

Inclinação

Declividade

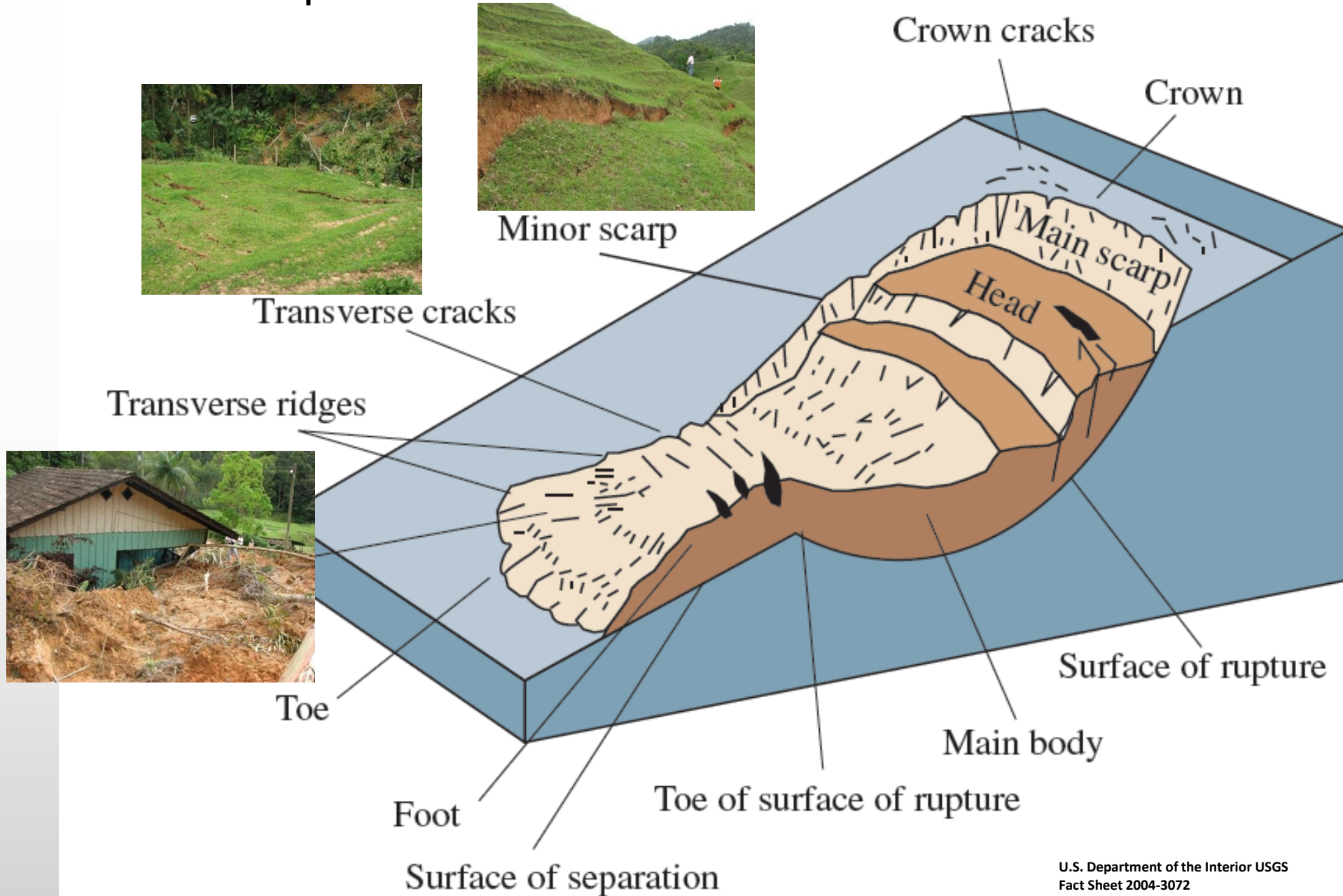
Área da bacia

Altura da encosta

Uso e ocupação

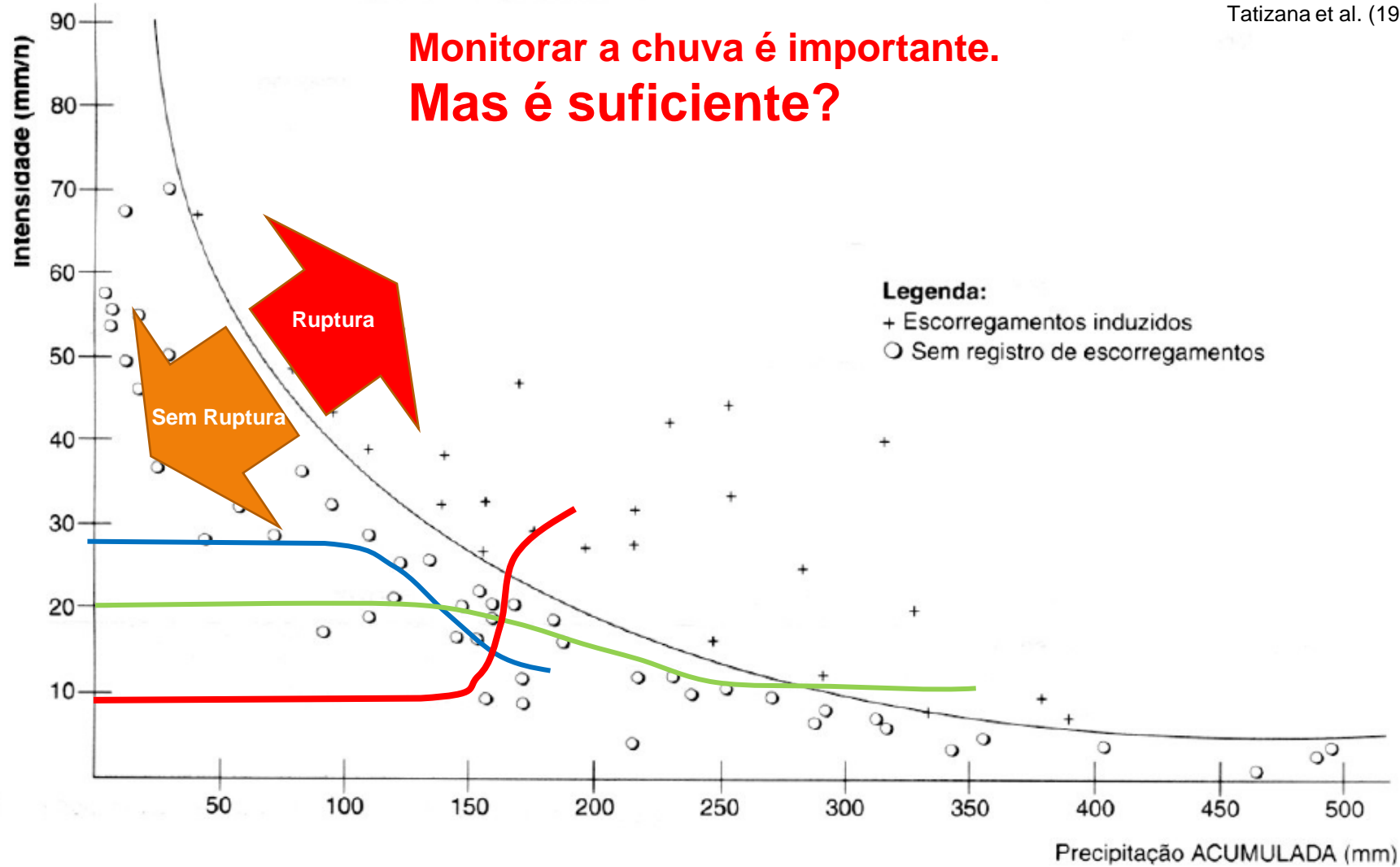
Aspectos geológicos e Geotécnicos

Mecanismos de Ruptura

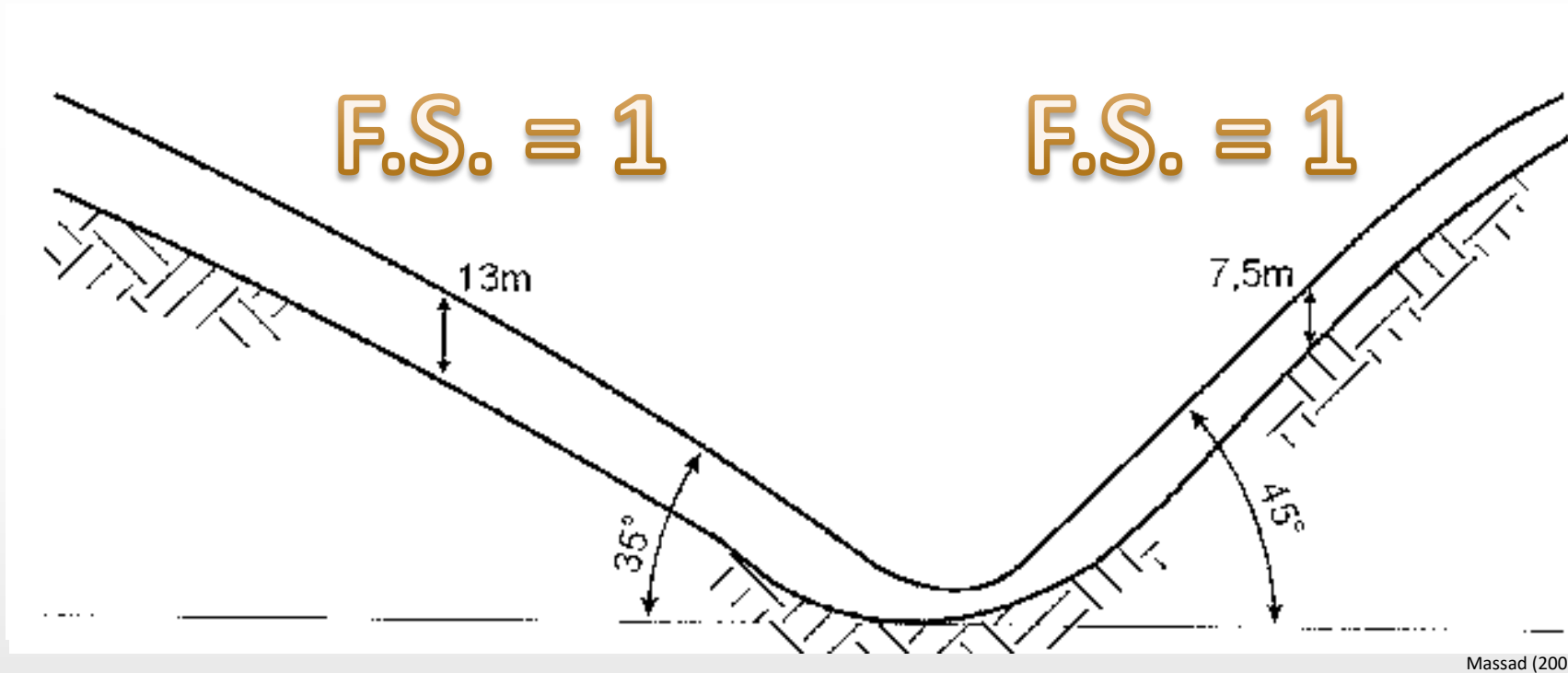


Causas de Ruptura

Tatizana et al. (1987)



Qual o talude mais estável?



$$F.S. = \frac{2c'}{\gamma H \sin 2\alpha} + \frac{\operatorname{tg} \phi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

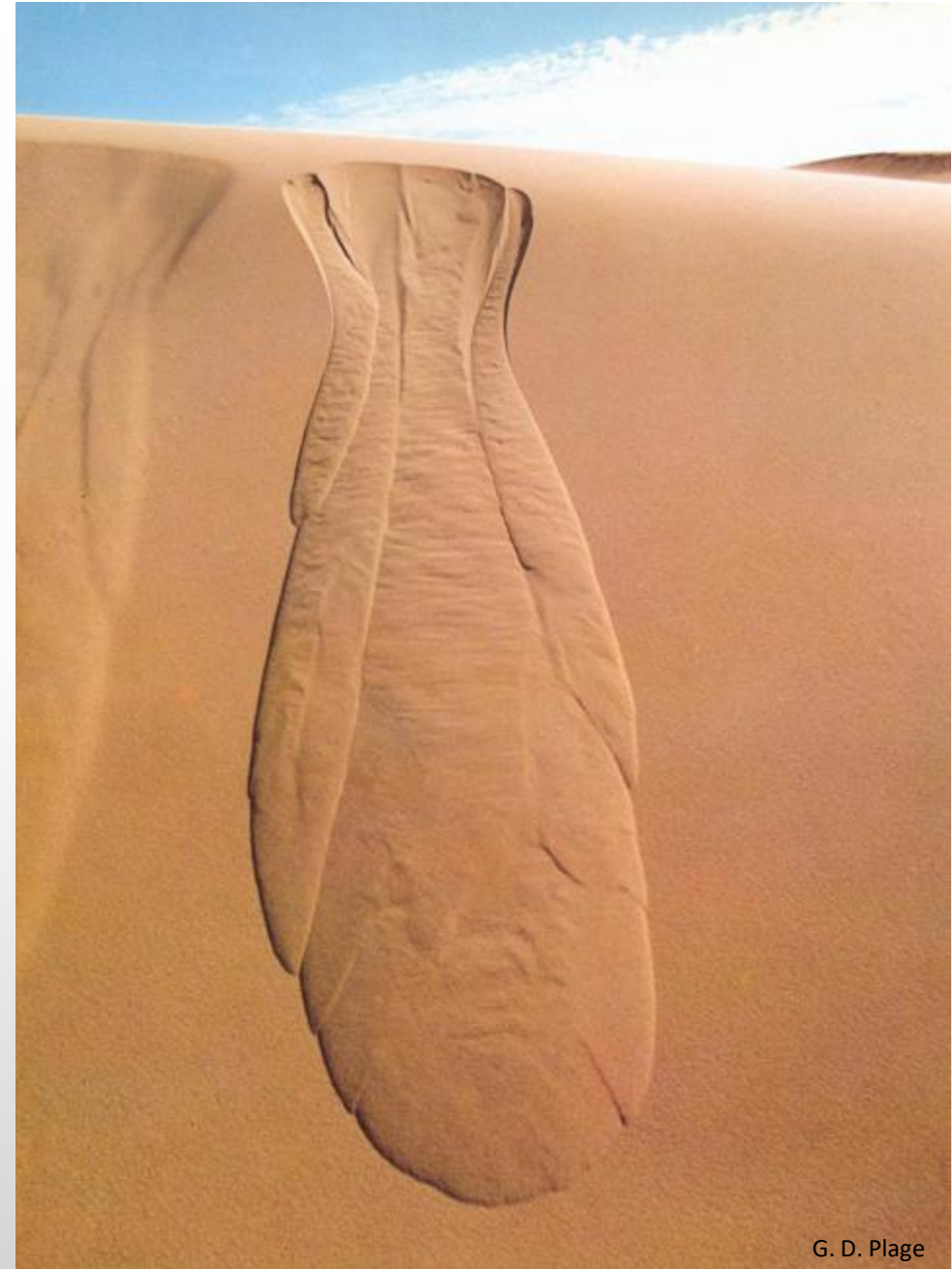
Princípios de Mecânica dos Solos

Para se obter um bom projeto ou uma análise de ruptura adequada é necessário se ter uma correta compressão do problema, e o mesmo deve ser adequadamente formulado.

Para que estas simples condições sejam atendidas é necessário:

- Conhecer profundamente os princípios de mecânica dos solos
- Conhecer a geologia e as condições do local
- Conhecer as propriedades dos solos do local

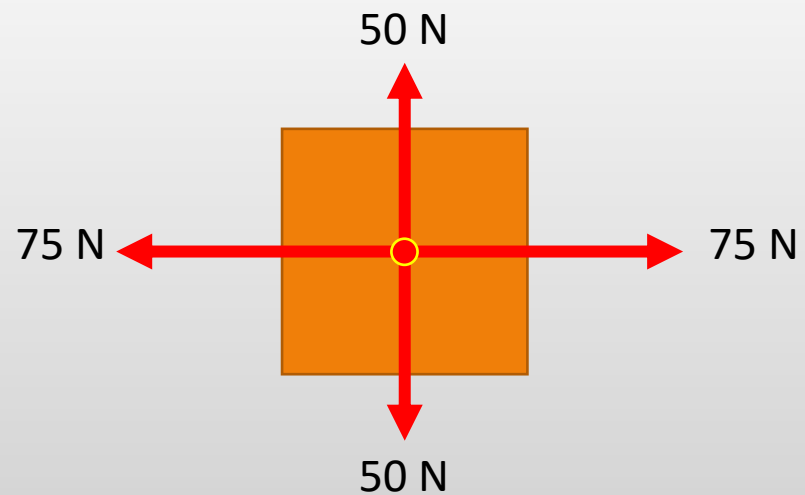
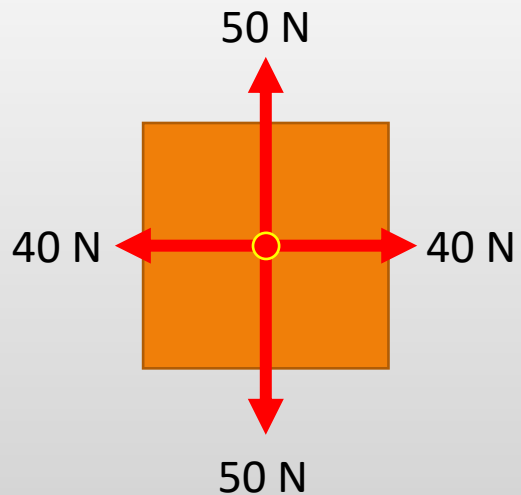
Escorregamento de areia seca



Equilíbrio Estático

- Quando todas as forças que agem sobre um determinado objeto estão “balanceadas” o objeto está no estado de equilíbrio.
- As forças estão “balanceadas” quando as forças da direita estão compensadas pelas forças da esquerda e as forças que atuam na parte superior estão compensadas pelas forças que atuam na parte inferior do objeto.
- Isto não significa que todas as forças sejam numericamente iguais.

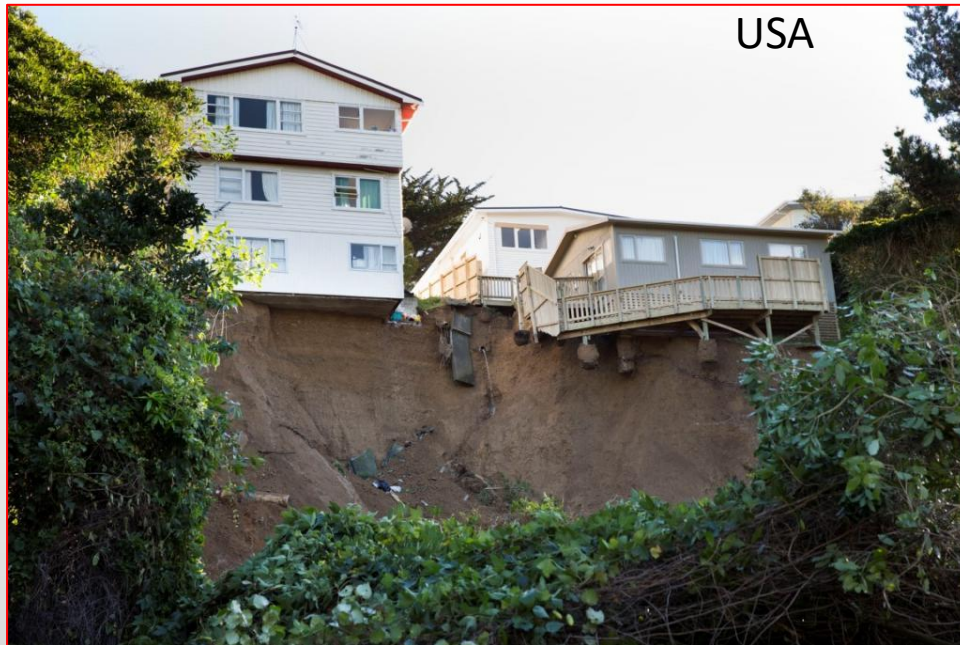
- ✓ Os dois objetos abaixo estão em equilíbrio porque as forças nas duas direções estão “balanceadas”.
- ✓ A força líquida é zero e a aceleração é zero.
- ✓ Objetos em equilíbrio têm que ter aceleração nula. (Primeira lei de Newton)



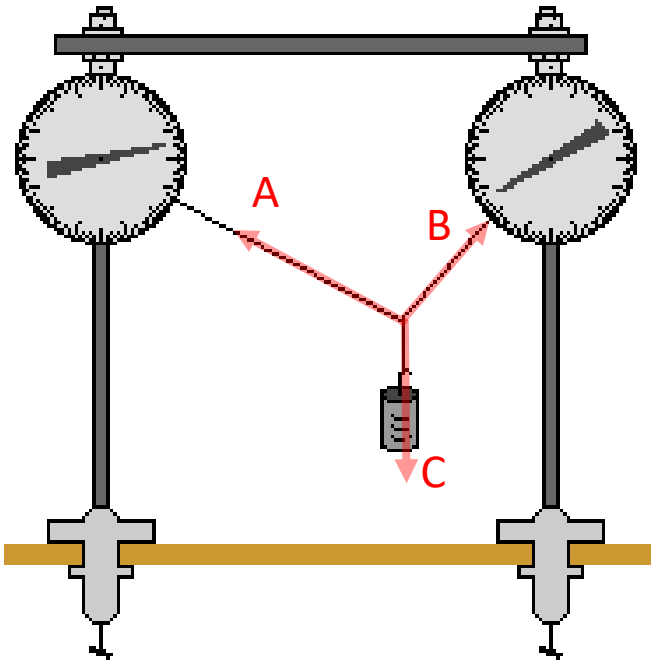
Equilíbrio Estático

Primeira lei de Newton

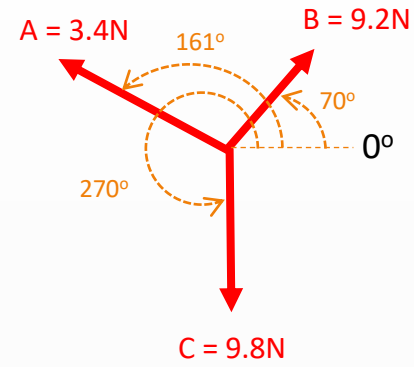
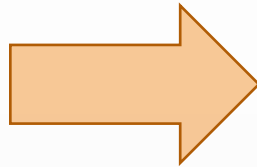
Um objeto em repouso permanece em repouso e um objeto em movimento permanece em movimento com velocidade constante e na mesma direção a menos que passe a atuar nele uma força que elimine o balanço de forças atuantes.



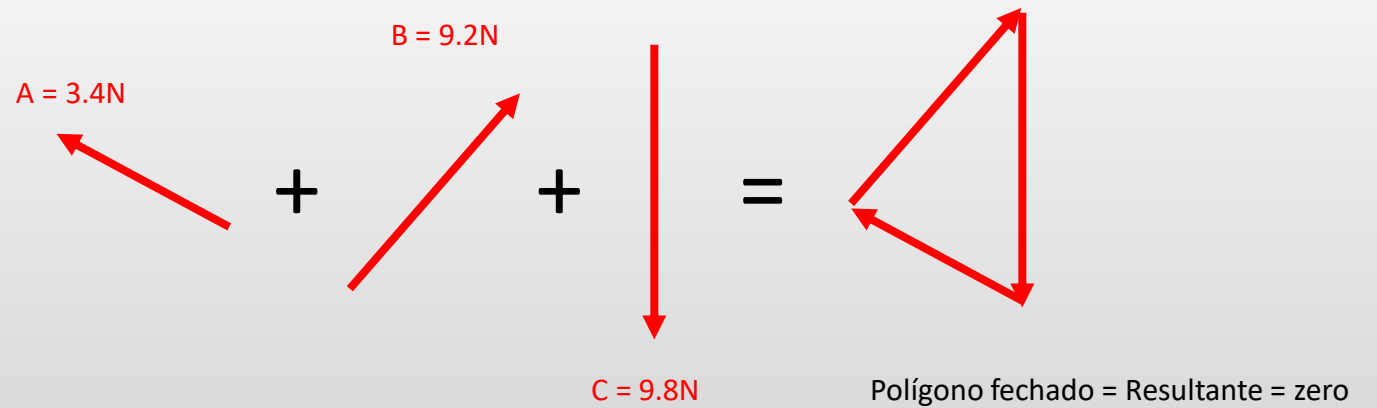
Equilíbrio Estático



<http://www.physicsclassroom.com/class/vectors/Lesson-3/Equilibrium-and-Statics>

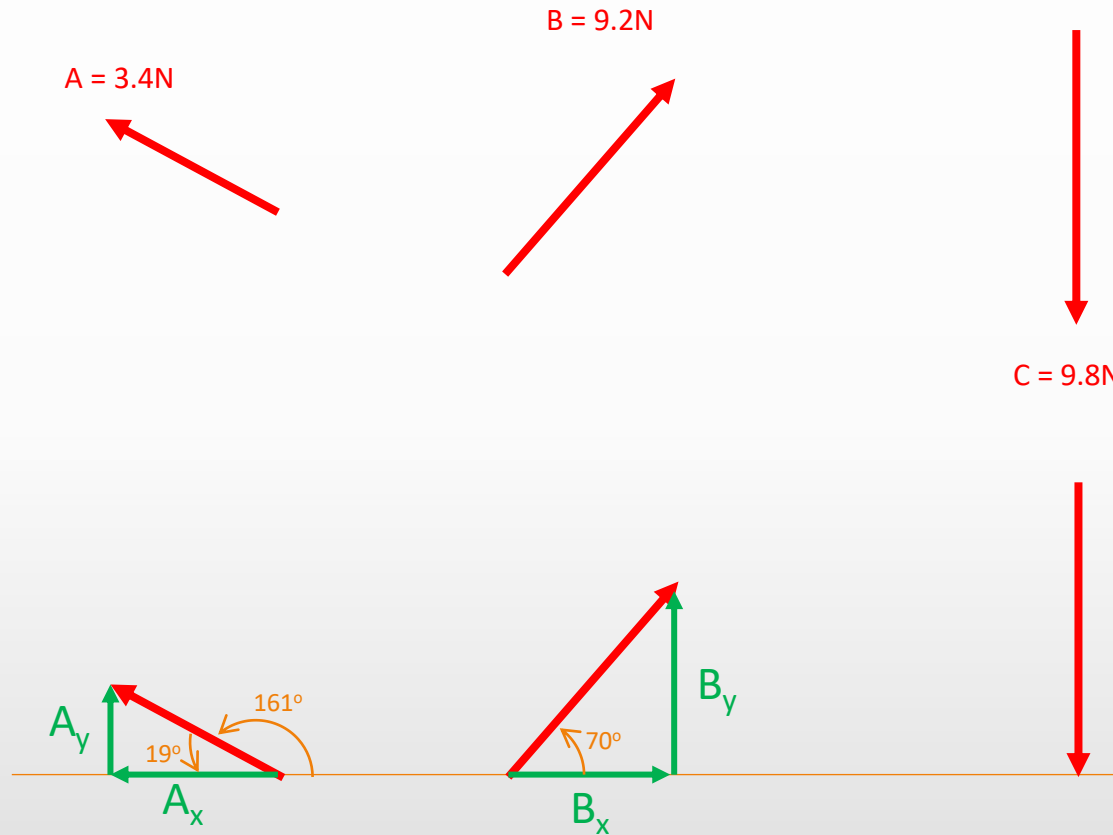


Colocando em escala temos:



Equilíbrio Estático

Usando trigonometria para resolver o equilíbrio de forças



$$A_y = 3.4 * \text{sen}19^\circ = 1.1N$$

$$B_y = 9.2 * \text{sen}70^\circ = 8.6N$$

$$C_y = -9.8N$$

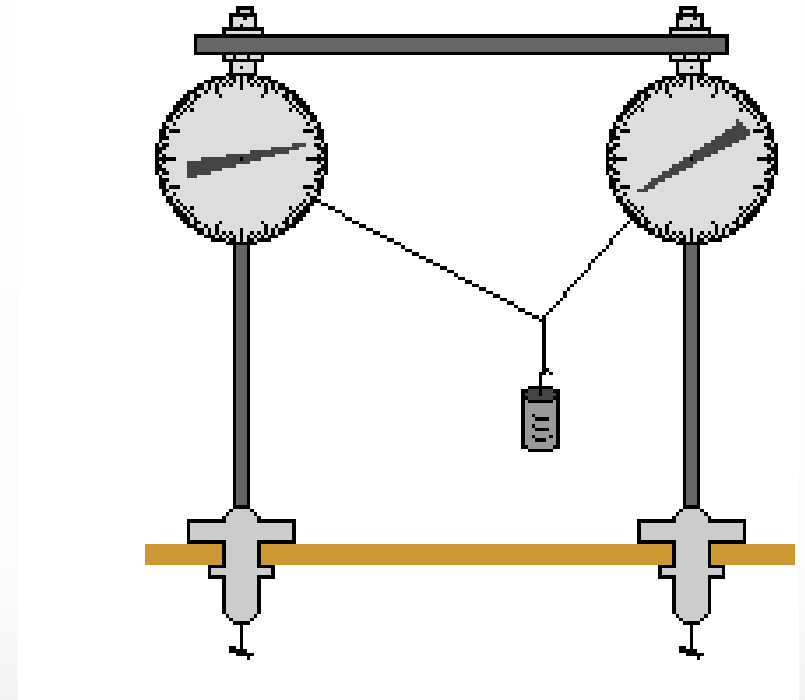
$$A_y + B_y + C_y \cong 0$$

$$A_x = -3.4 * \text{cos}19^\circ = -3.2N$$

$$B_x = 9.2 * \text{cos}70^\circ = 3.1N$$

$$C_x = 0N$$

$$A_x + B_x + C_x \cong 0$$



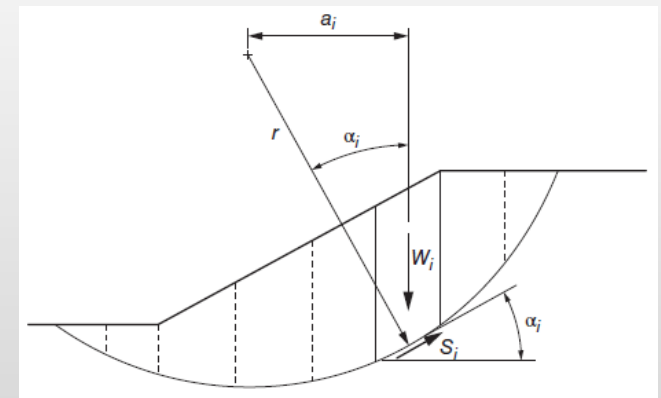
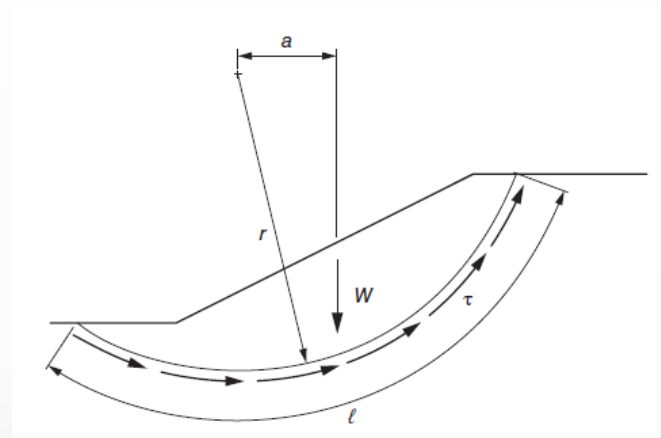
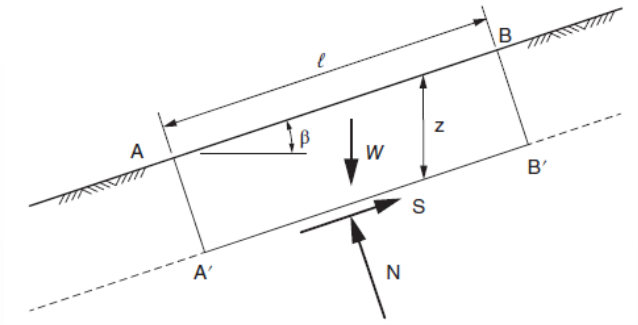
<http://www.physicsclassroom.com/class/vectors/Lesson-3/Equilibrium-and-Statics>

Condições de Equilíbrio Estático

Duas abordagens

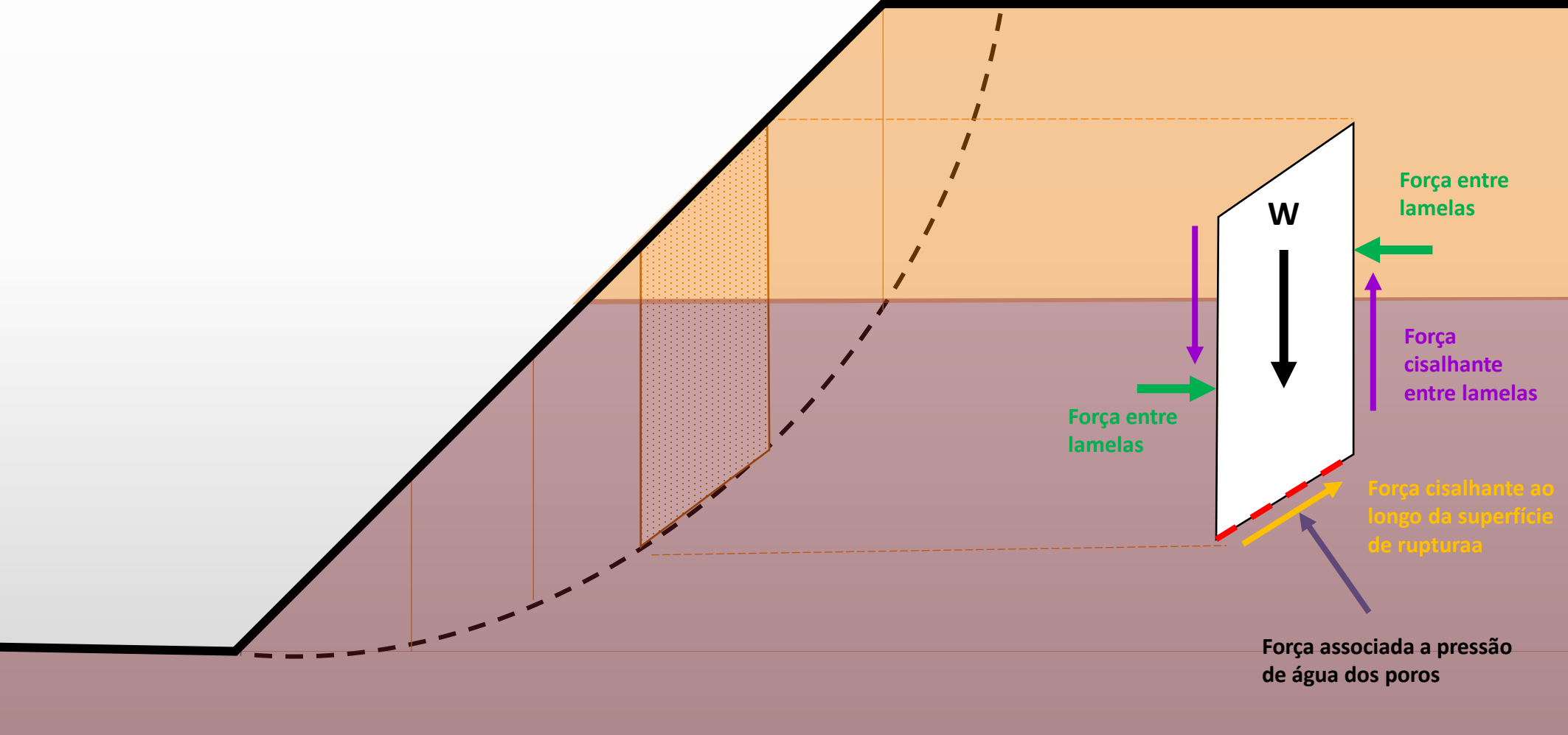
- Equilíbrio de toda a massa de solo acima de uma superfície adotada.
- Um corpo único é considerado.
- O procedimento de talude infinito e o método Suíço são exemplos deste procedimento

- No outro procedimento a massa de solo é dividida em fatias verticais e as equações de equilíbrio são escritas para resolver o equilíbrio de cada fatia (lamela).
- Este procedimento é chamado de métodos das lamelas.
- Exemplos : Método de Bishop simplificado e Spencer dentre outros.



Método de Equilíbrio Limite

Métodos baseados em equilíbrio estático das forças entre lamelas e/ou de momentos



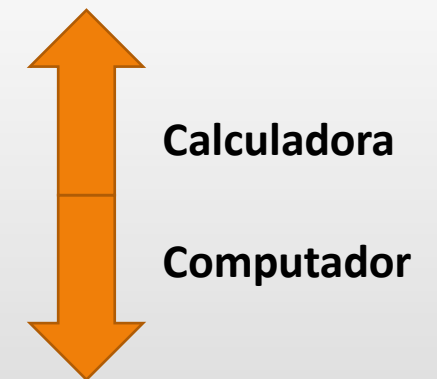
Condições de Equilíbrio Estático

Três condições de equilíbrio estático devem ser satisfeitas

1. Equilíbrios das forças verticais
2. Equilíbrio das forças horizontais
3. Equilíbrio de momentos em relação a algum ponto

Alguns métodos (procedimentos) utilizam e satisfazem todas as equações de equilíbrio outros apenas algumas.

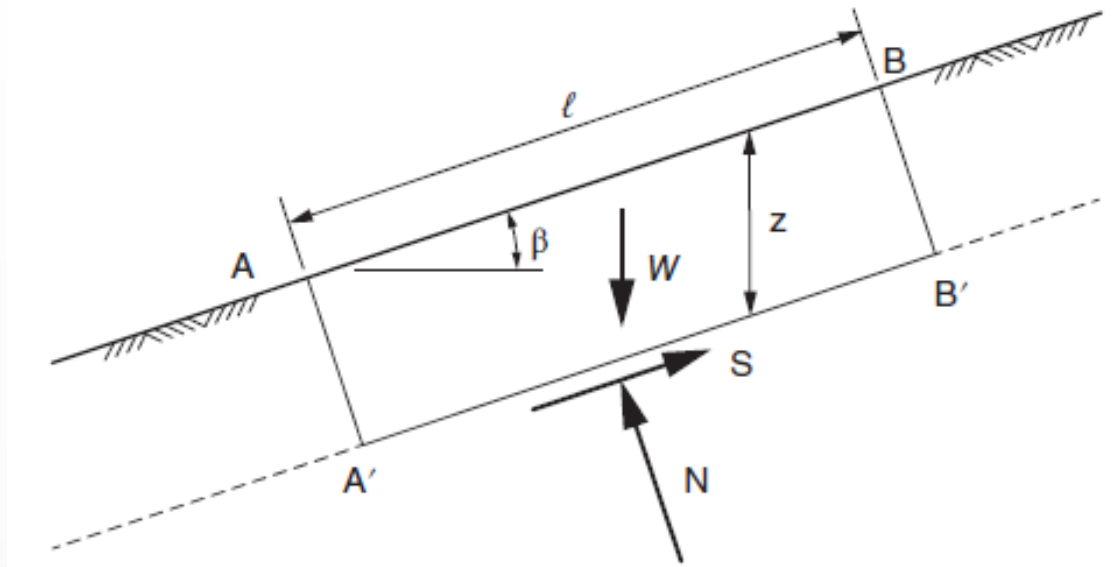
Método	Equação de Equilíbrio	Superfície
Bishop	Momento	Circular
Jambu	Forças horizontais	Não circular
Morgenstern-Price	Momento e forças	Qualquer forma
Spencer	Momento e forças	Qualquer forma
Sarma	Momento e forças	Qualquer forma



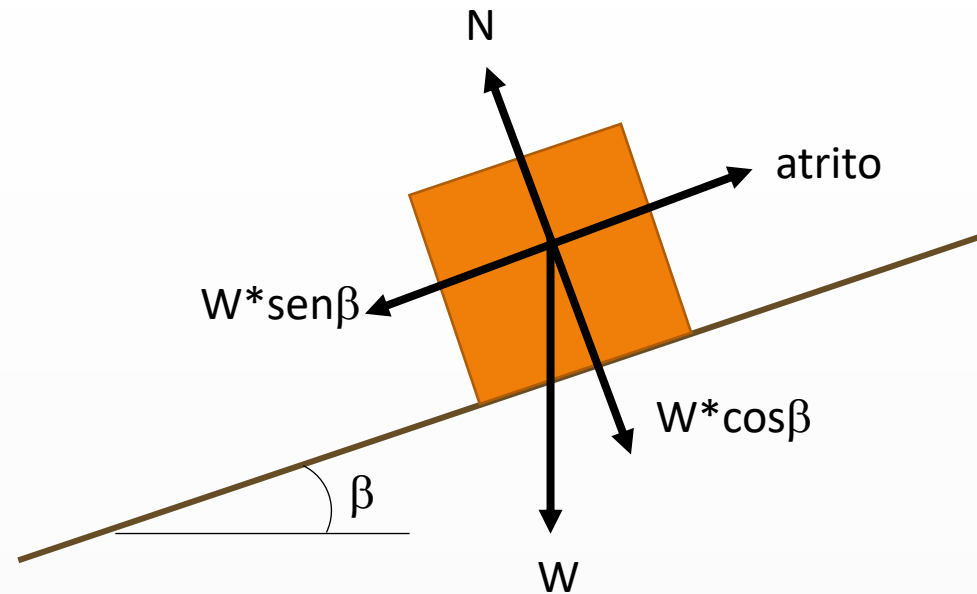
Escorregamento translacional



Procedimento de Talude Infinito



Duncan et al (2013)



Forças

$$S = W \sin \beta \quad \Rightarrow \quad W = \gamma l z \cos \beta \quad \Rightarrow \quad S = \gamma l z \cos \beta \sin \beta$$

$$N = W \cos \beta \quad \Rightarrow \quad N = \gamma l z \cos^2 \beta$$

Tensões

$$\sigma = \gamma z \cos^2 \beta$$

$$\tau = \gamma z \cos \beta \sin \beta$$

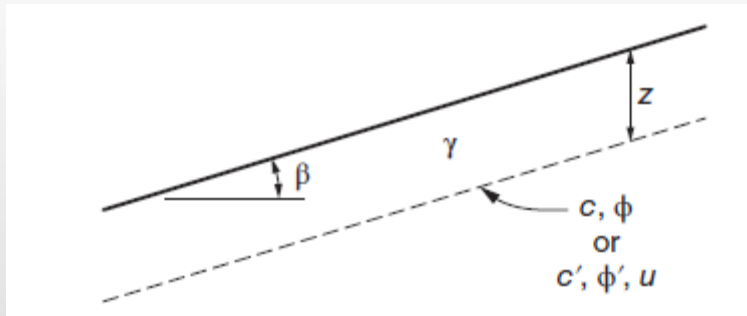
$$\tau = \frac{c + \sigma * \tan \varphi}{FS}$$

$$FS = \frac{c + \gamma z \cos^2 \beta * \tan \varphi}{\gamma z \cos \beta \sin \beta}$$

Procedimento de Talude Infinito

Em termos de tensões efetivas:

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - u) * \tan \phi'}{\gamma z \cos \beta \sin \beta}$$



Total Stresses: $s = c + \sigma \tan \phi$

Subaerial (not submerged) slopes:

$$F = \frac{c}{\gamma z \sin(2\beta)} + [\cot \beta] \tan \phi$$

Submerged slopes ($\phi = 0$ only):

$$F = \frac{c}{(\gamma - \gamma_w)z \sin(2\beta)}$$

Effective Stresses: $s = c' + \sigma' \tan \phi'$

General case (subaerial slope):

$$F = \frac{c'}{\gamma z \sin(2\beta)} + \left[\cot \beta - \frac{u}{\gamma z} (\cot \beta + \tan \beta) \right] \tan \phi'$$

Submerged slopes—no flow:

$$F = \frac{c'}{(\gamma - \gamma_w)z \sin(2\beta)} + [\cot \beta] \tan \phi'$$

Subaerial slope—seepage parallel to slope face:

$$F = \frac{c'}{\gamma z \sin(2\beta)} + \left[\cot \beta - \frac{\gamma_w}{\gamma} (\cot \beta) \right] \tan \phi'$$

Subaerial slope—horizontal seepage:

$$F = \frac{c'}{\gamma z \sin(2\beta)} + \left[\cot \beta - \frac{\gamma_w}{\gamma} (\cot \beta + \tan \beta) \right] \tan \phi'$$

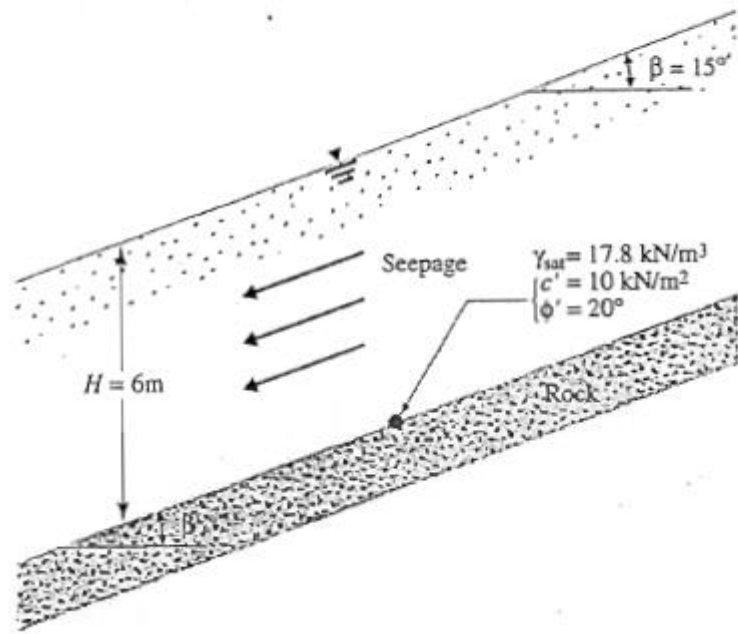
Subaerial slope—pore water pressures defined by a constant value of $r_u = \frac{u}{\gamma z}$:

$$F = \frac{c'}{\gamma z \sin(2\beta)} + [\cot \beta - r_u (\cot \beta + \tan \beta)] \tan \phi'$$

Talude Infinito

Exercício

An infinite slope is shown in Figure 14.4. There is ground water seepage, and the ground water table coincides with the ground surface. Determine the factor of safety, F_s .



Das (2006)

$$FS = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - u) \tan \phi'}{\gamma z \cos \beta \sin \beta}$$

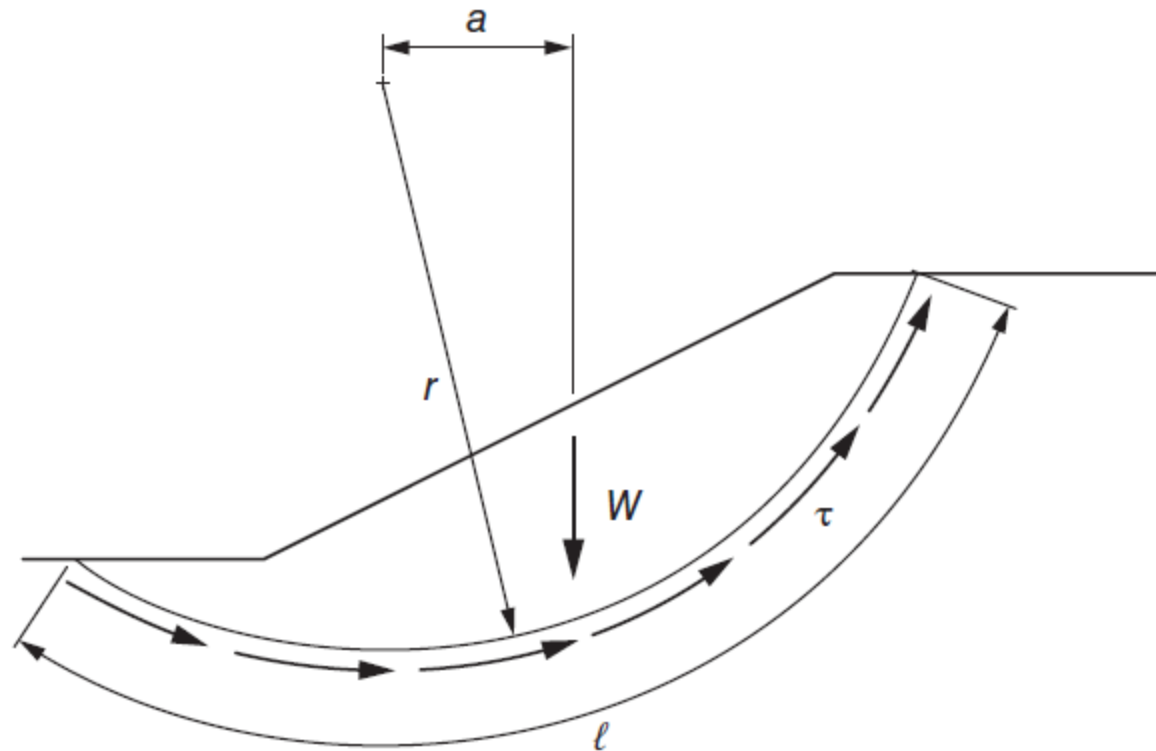
Método Sueco ($\phi = 0$)

O momento que **induz** a rotação do solo em relação ao centro círculo vale:

$$M_d = Wa$$

O momento que **resiste** a rotação do solo é fornecido pela resistência ao cisalhamento (τ) que age ao longo da superfície circular e vale:

$$M_r = \tau lr$$



Duncan et al (2013)

Para que haja o equilíbrio (FS = 1):

$$FS = \frac{S}{\tau} \quad Wa = \tau lr \quad \tau = S_u \quad \longrightarrow \quad Wa = \frac{clr}{FS}$$

Coesão não drenada

$$FS = \frac{clr}{Wa}$$

Momento resistente disponível

Momento indutor

Para calcular o braço do momento é necessário definir o centro de gravidade da massa de solo acima da superfície de ruptura.

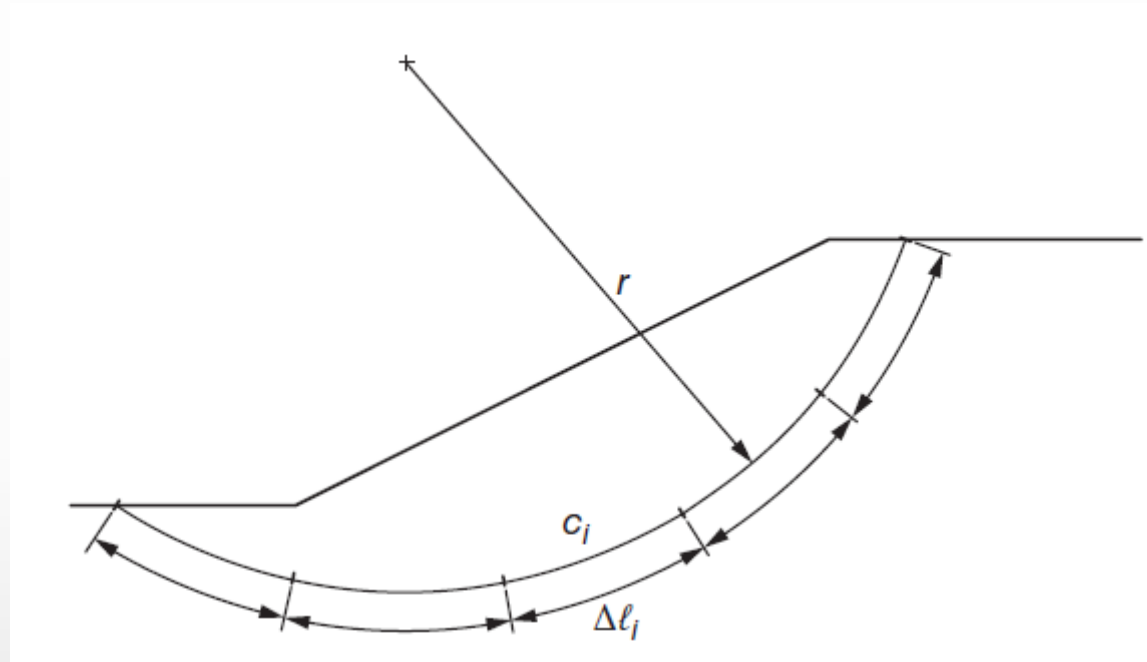
Método Sueco ($\phi = 0$)

A coesão não drenada pode variar ao longo da superfície.

Neste caso o momento que resiste ao movimento vale:

$$M_r = \frac{\sum(c_i \Delta l_i) r}{FS}$$

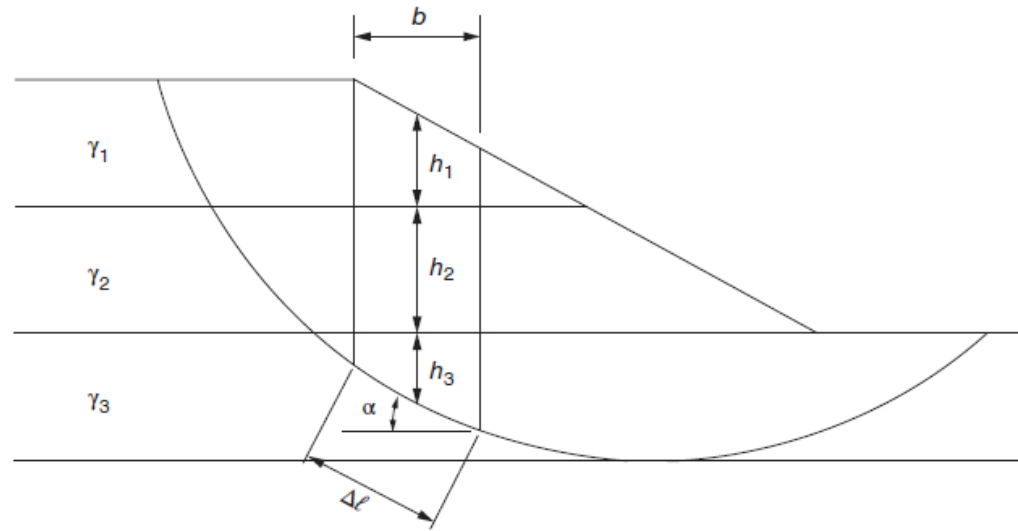
$$FS = \frac{r \sum(c_i \Delta l_i)}{M_r}$$



Duncan et al (2013)

Método Sueco ($\phi = 0$)

Planilha de cálculo



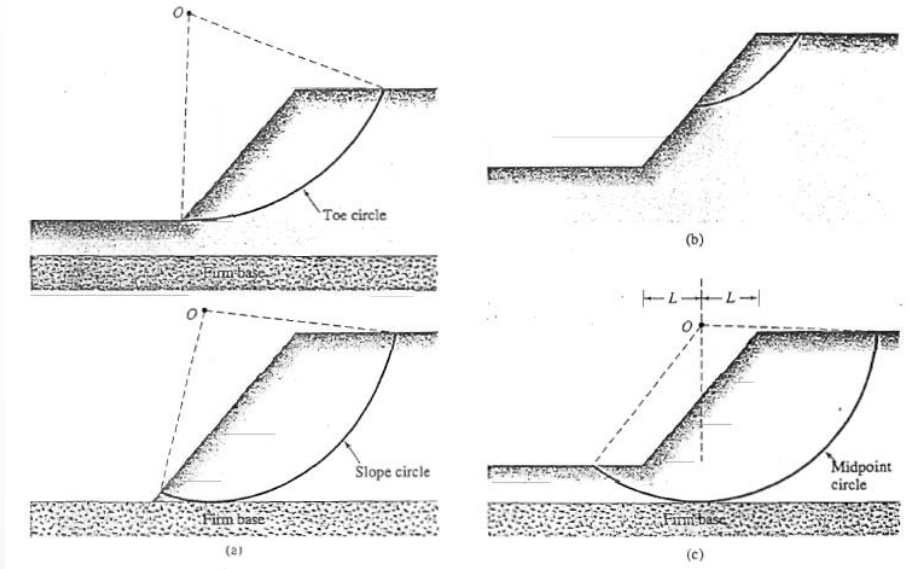
Slice No.	b	h_1	γ_1	h_2	γ_2	h_3	γ_3	$W^{(1)}$	α	$\Delta l^{(2)}$	c	$c \Delta l$	$W \sin \alpha$
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
Summation:													

⁽¹⁾ $W = b \times (h_1\gamma_1 + h_2\gamma_2 + h_3\gamma_3)$

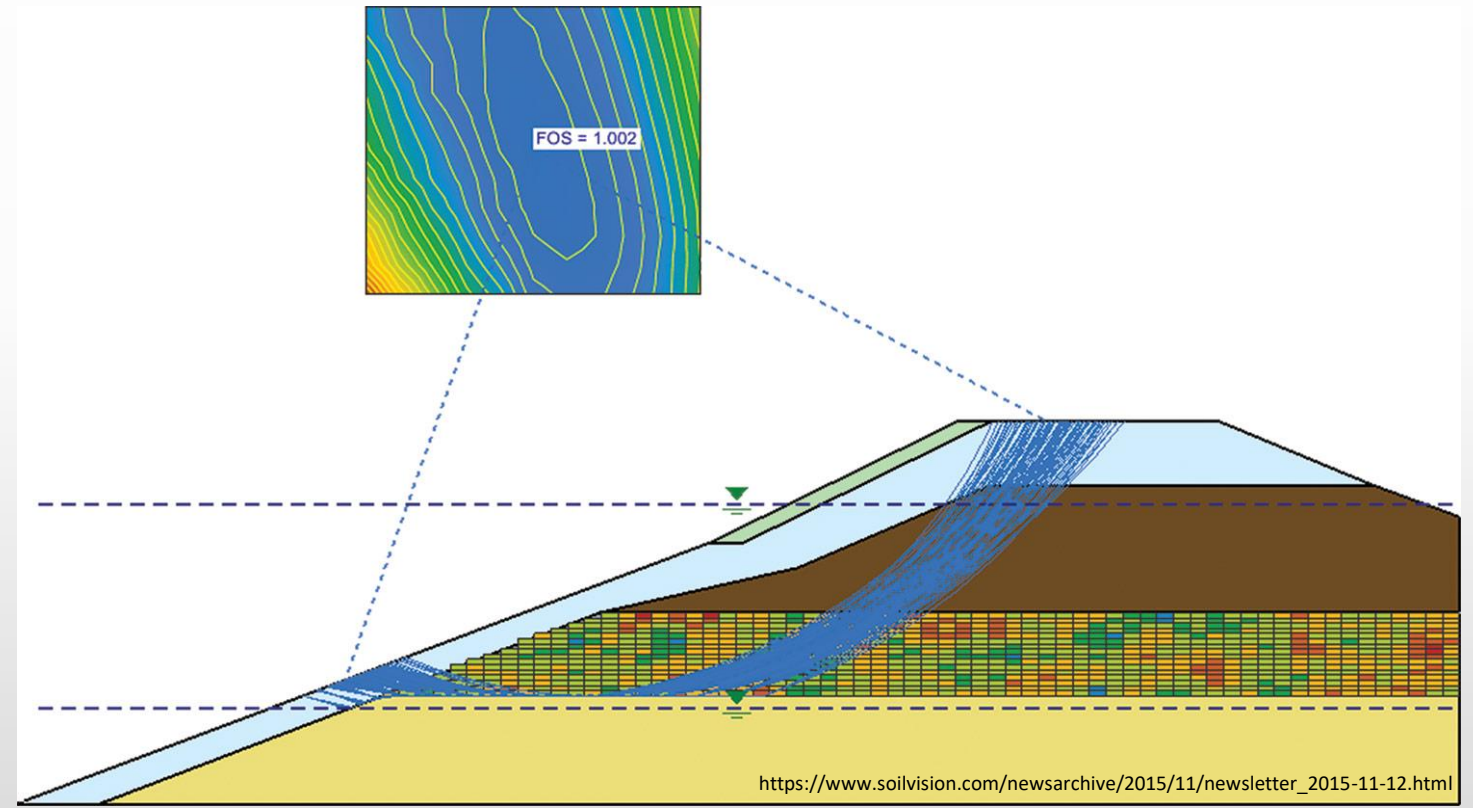
⁽²⁾ $\Delta l = b / \cos \alpha$

$$F = \frac{\sum c \Delta l}{\sum W \sin \alpha}$$

Qual superfície Escolher?

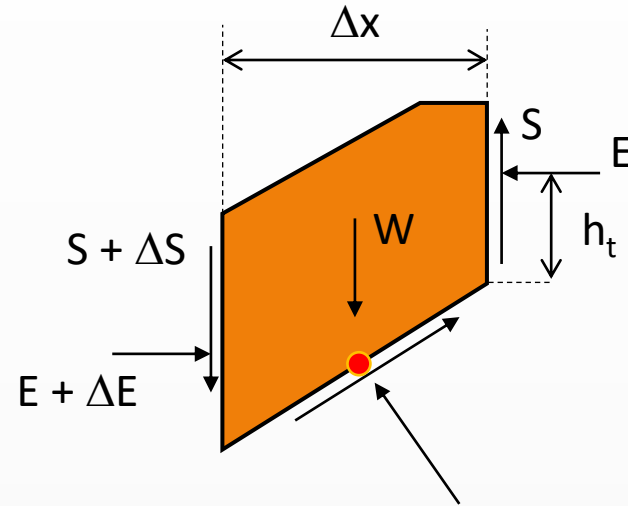
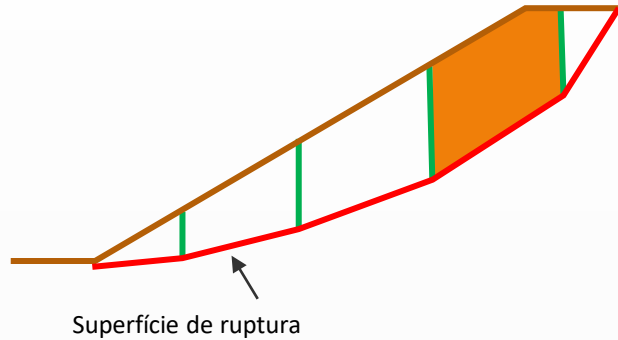


Das (2006)



Problema estaticamente determinado

Problema estaticamente indeterminado



Cada Lamela possui 3 equações:

$$\sum H = 0$$

$$\sum V = 0$$

$$\sum \vec{M} = 0$$

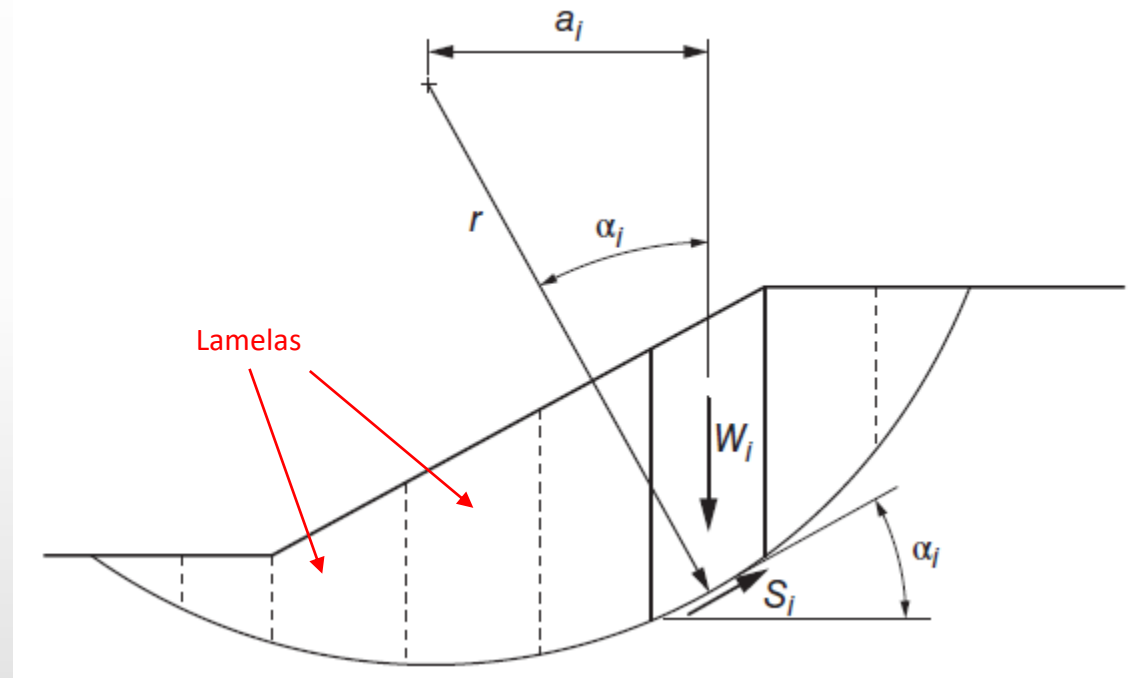
Grandezas desconhecidas	Total
F (relacionado com T)	1
N	n
E	n-1
S	n-1
h_t	n-1
TOTAL	4n-2



Isto exige o estabelecimento de algumas hipóteses sobre as forças entre lamelas

Método das Lamelas

A superfície pode ser circular ou qualquer



Duncan et al (2013)

Método das Lamelas

Superfície Circular – $\phi = 0$

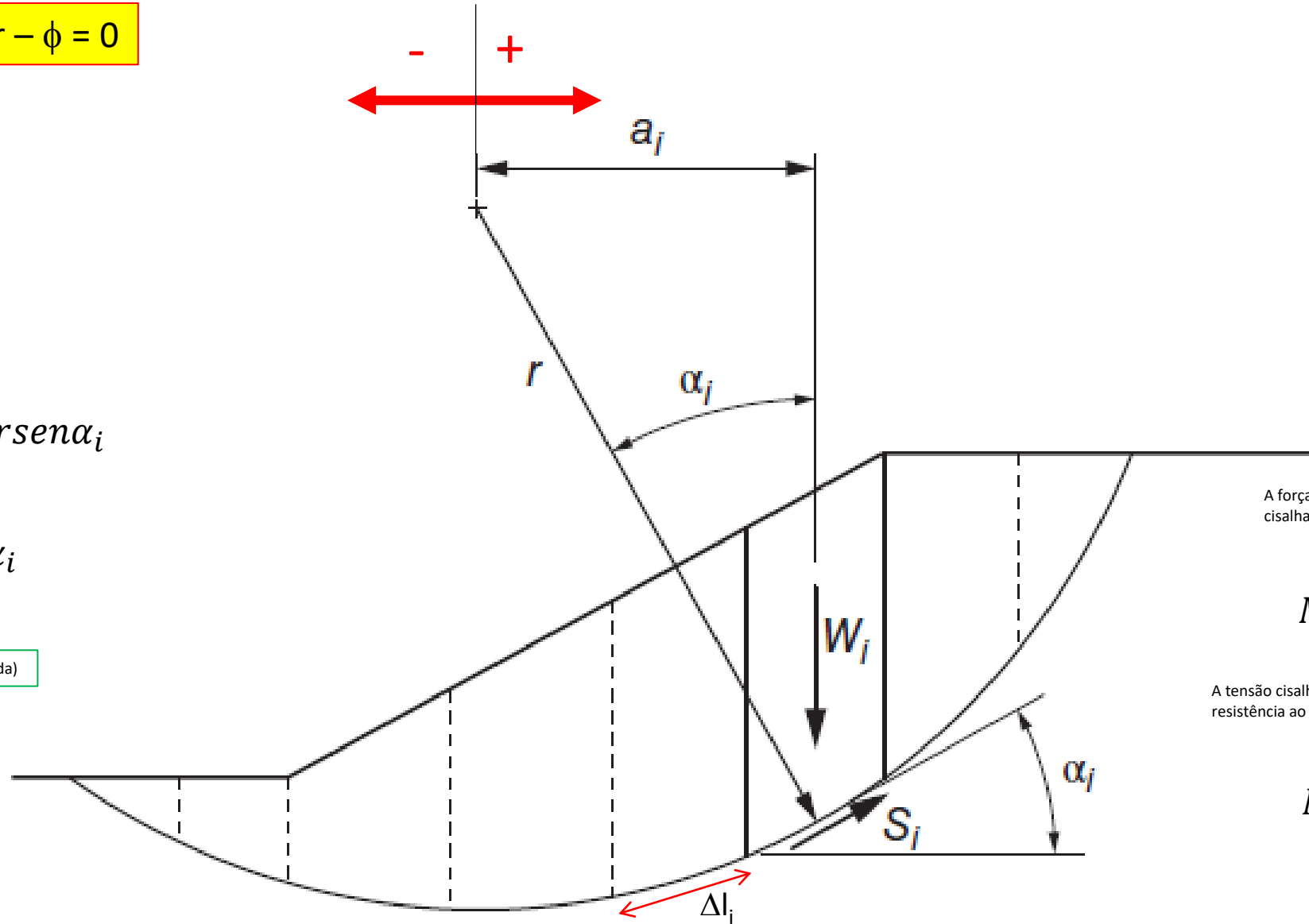
Momento Atuante

$$M_d = \sum W_i a_i$$

$$a_i = r \operatorname{sen} \alpha_i$$

$$M_d = r \sum W_i \operatorname{sen} \alpha_i$$

Constante (uma dada superfície de ruptura assumida)



Momento Resistente

$$M_r = r \sum S_i$$

Força cisalhante em cada lamela

A força cisalhante é o produto da tensão cisalhante (τ) pela área da base da lamela ($\Delta l_i * 1$)

$$M_r = r \sum \tau_i \Delta l_i$$

A tensão cisalhante pode ser expressa em termos de resistência ao cisalhamento e fator de segurança.

$$M_r = r \sum \frac{s_i \Delta l_i}{FS}$$

Método das Lamelas

Superfície Circular – $\phi = 0$

$$M_d = r \sum W_i \text{sen} \alpha_i$$

$$M_r = r \sum \frac{s_i \Delta l_i}{FS}$$

$$FS = \frac{\sum s_i \Delta l_i}{\sum W_i \text{sen} \alpha_i}$$

$$s_i = S_{ui}$$

- Para $\phi = 0$, o método Sueco e o das lamelas fornecem o mesmo FS
- Nenhuma hipótese sobre forças entre lamelas é necessária já que a resistência não varia com a tensão normal.

Método das Lamelas

Superfície Circular

$$\varphi \neq 0$$



$$s = c + \sigma \tan \varphi$$

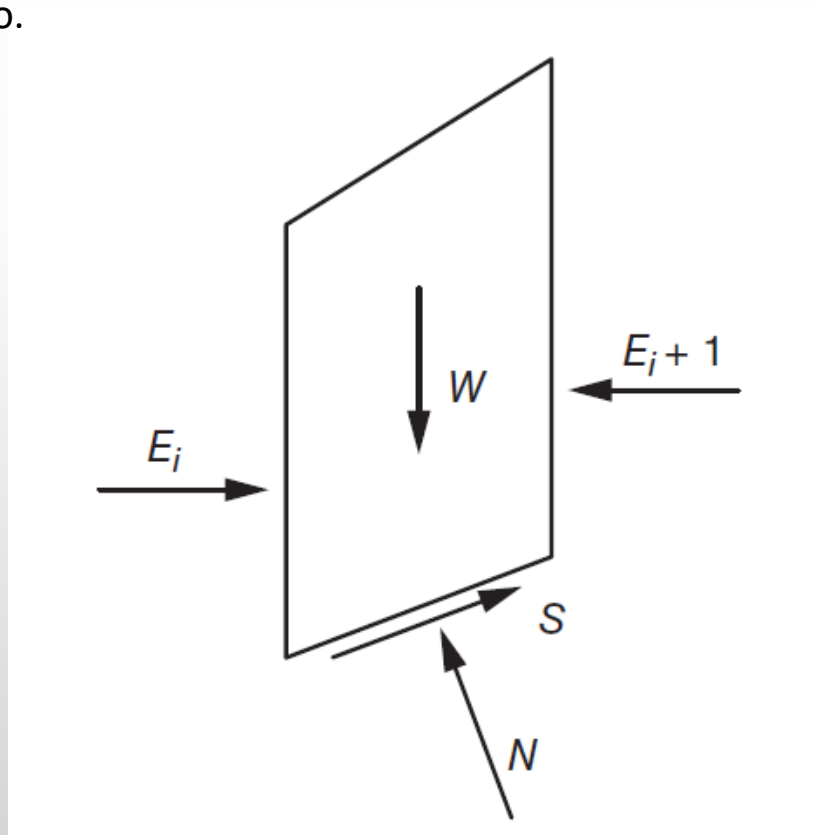
$$FS = \frac{\sum (c + \sigma \tan \varphi) \Delta l}{\sum W \operatorname{sen} \alpha}$$

Problema estaticamente indeterminado

Método de Bishop Simplificado

Superfície Circular

- Satisfaz o equilíbrio de momentos em relação ao centro do círculo.
- O equilíbrio de forças é considerado apenas na direção vertical.
- Assume que as forças entre lamelas são horizontais.
- Quando se tem $\phi=0$, o método fornece o mesmo resultado do método sueco.



Direção vertical

$$N \cos \alpha + S \sin \alpha - W = 0$$

Resistência ao cisalhamento mobilizada

$$S = \tau \Delta l$$

Resistência disponível

$$S = \frac{s \Delta l}{F}$$

$$s = c + \sigma \tan \phi$$

Para a resistência ao cisalhamento expressa em termos de tensão efetiva com a envoltória de Mohr-Coulomb temos:

$$S = \frac{1}{F} [c' \Delta l + (N - u \Delta l) \tan \phi']$$

Combinando com a primeira equação temos:

$$N = \frac{W - \left(\frac{1}{F}\right)(c' \Delta l + (N - u \Delta l) \tan \phi') \sin \alpha}{\cos \alpha + \left(\frac{\sin \alpha * \tan \phi'}{F}\right)}$$

A tensão normal efetiva na base da lamela é:

$$\sigma' = \frac{N}{\Delta l} - u$$

Método de Bishop Simplificado

Superfície Circular

Combinando as duas últimas equações e introduzindo elas nas equações de equilíbrio de momento temos:

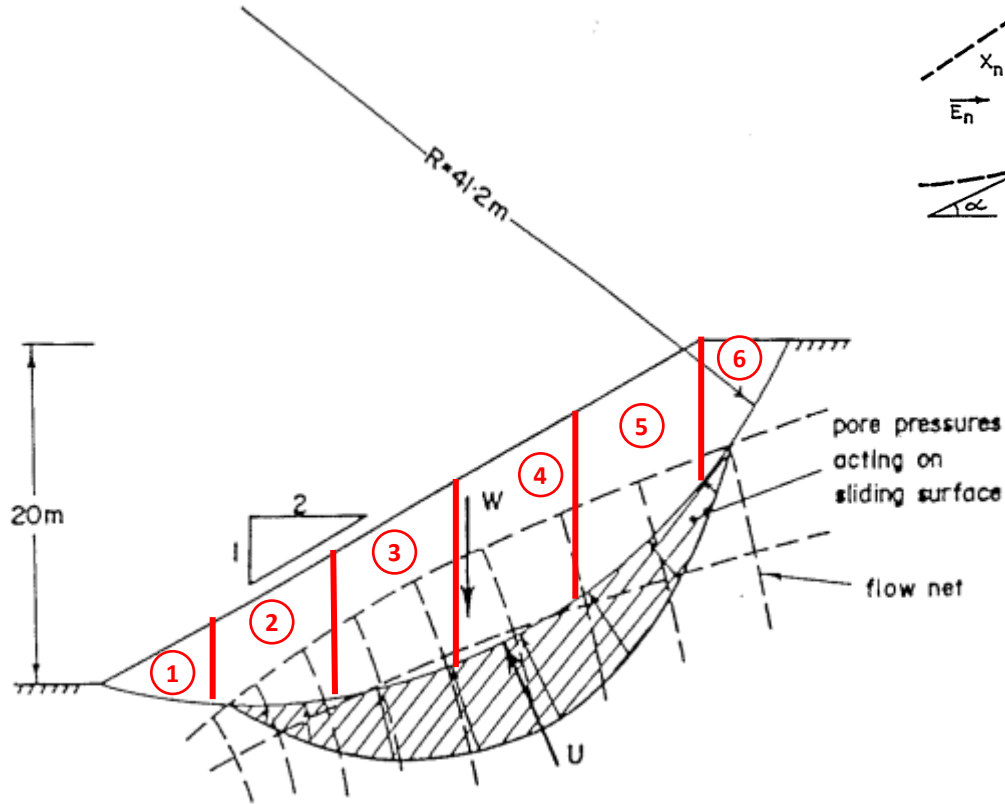
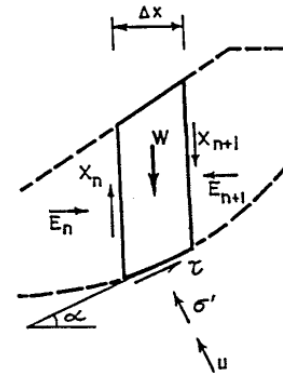
$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' \Delta l \cos \alpha + (W - u \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + (\text{sen} \alpha * \tan \phi') / FS} \right]}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

Para solo saturado e carregamento não drenado temos:

$$FS = \frac{\sum c \Delta l}{\sum W \text{sen} \alpha}$$

Método de Bishop Simplificado

Exemplo



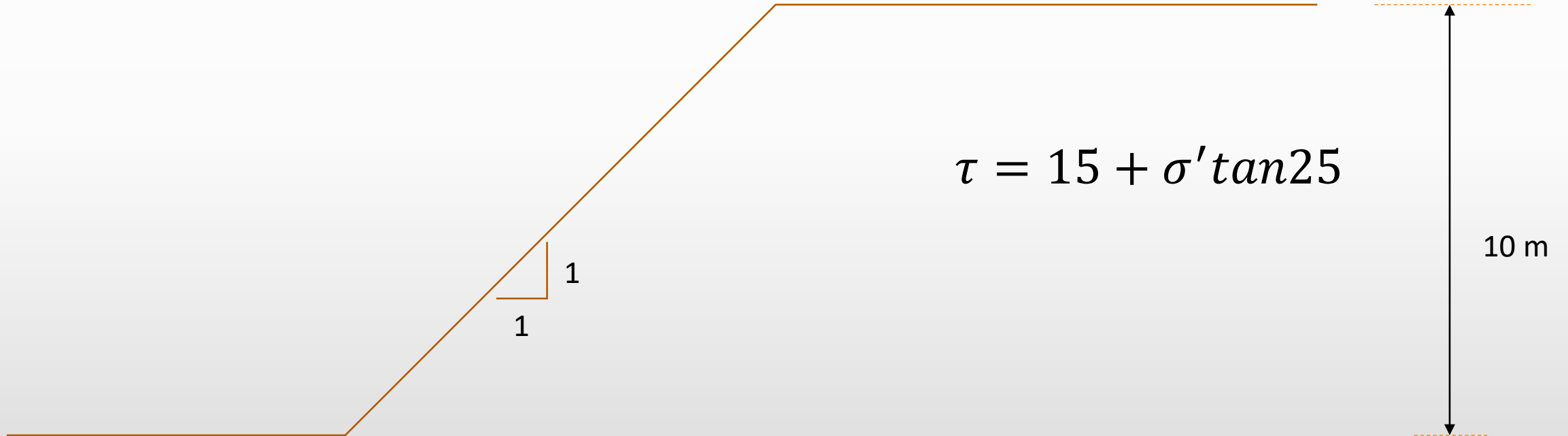
Slice	1	2	3	4	5	6			
						M_α		$\frac{\text{col. (5)}}{\text{col. (6)}} - \text{kN}$	
						trial (1) F = 2.0	trial (2) F = 1.85	trial (1) F = 2.0	trial (2) F = 1.85
	Slice Width (ΔX) m	Weight of Slice (W) kN	Pore Pressure u kN/m ²	$W \sin \alpha$ kN	$c \Delta X + (W - u \Delta X) \tan \phi'$ kN				
1	8	450	0	-50	500	.96	.96	520	520
2	8	1118	18.7	54	799	1.01	1.01	790	790
3	8	1590	45.1	384	950	1.03	1.03	920	920
4	8	1742	50.0	760	1015	1.02	1.03	995	985
5	8	1590	32.4	1000	1010	.97	.98	1042	1030
6	6	570	2.0	442	502	.86	.87	585	576
Totals				2590				4852	4821

Método de Bishop Simplificado

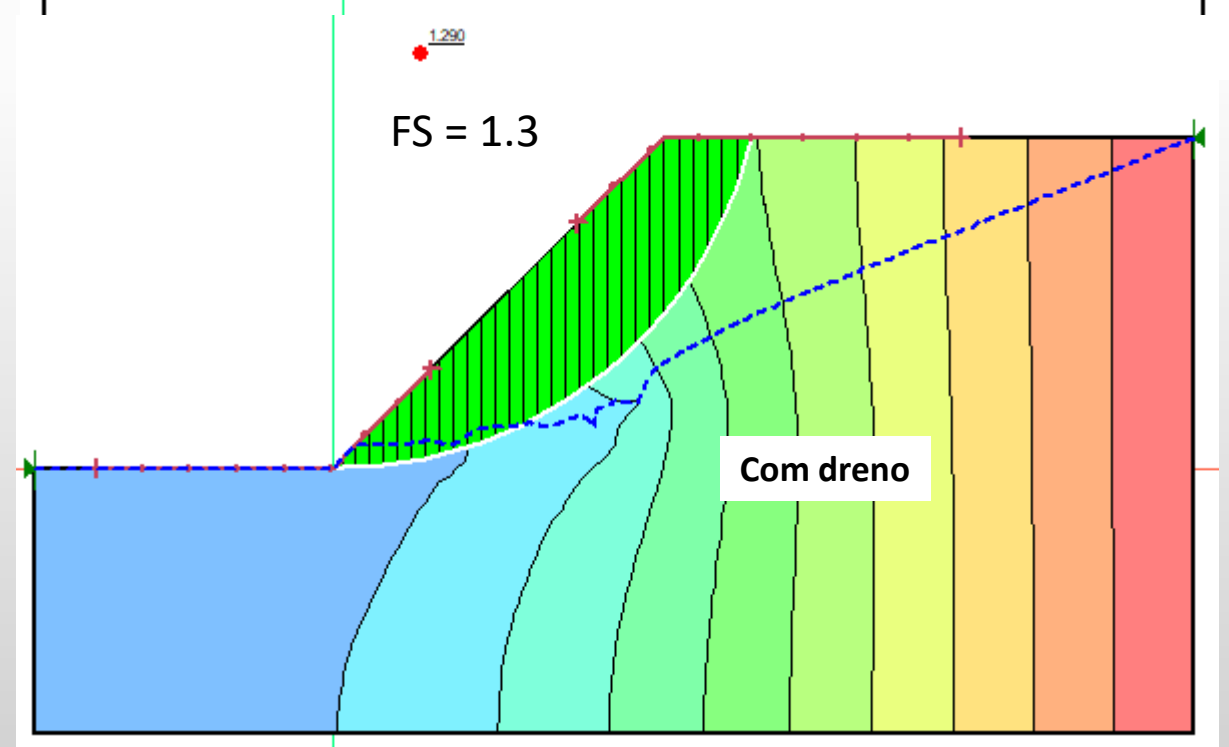
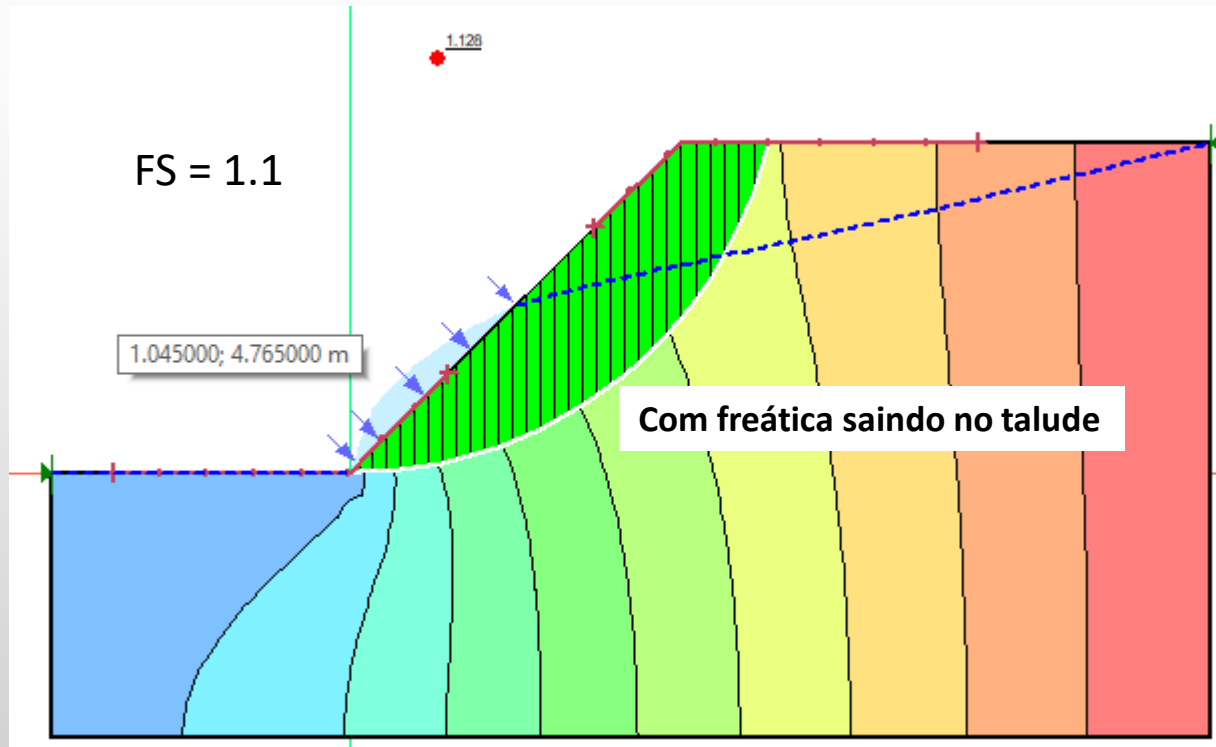
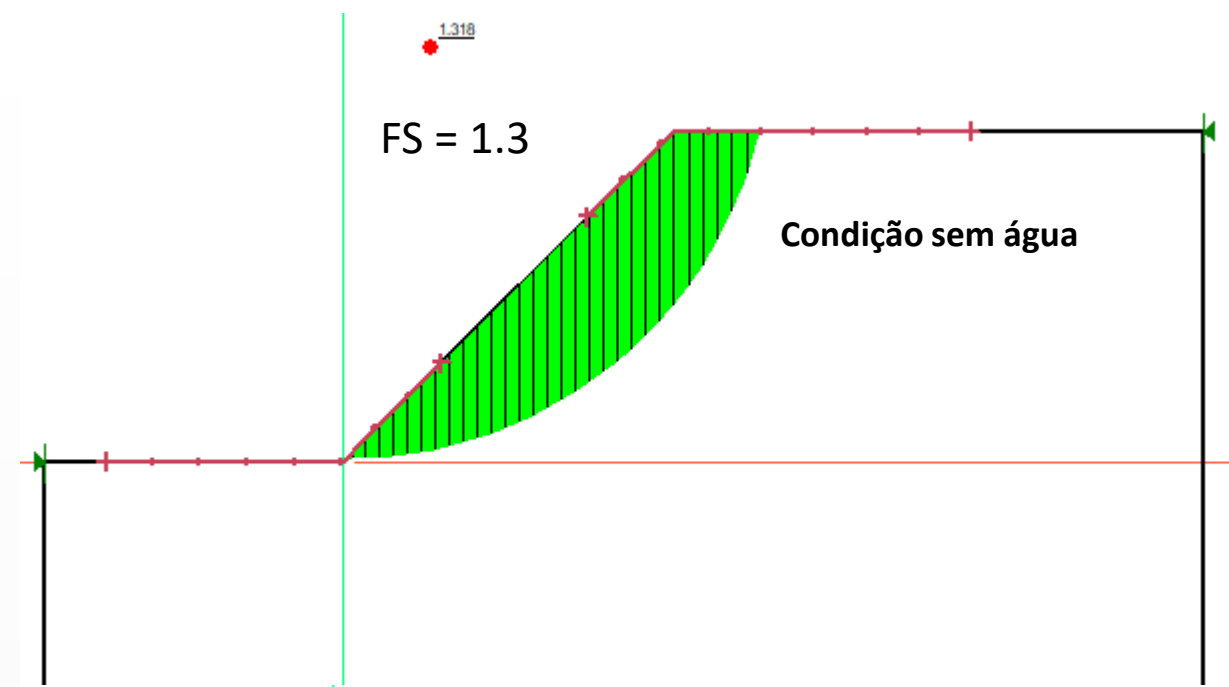
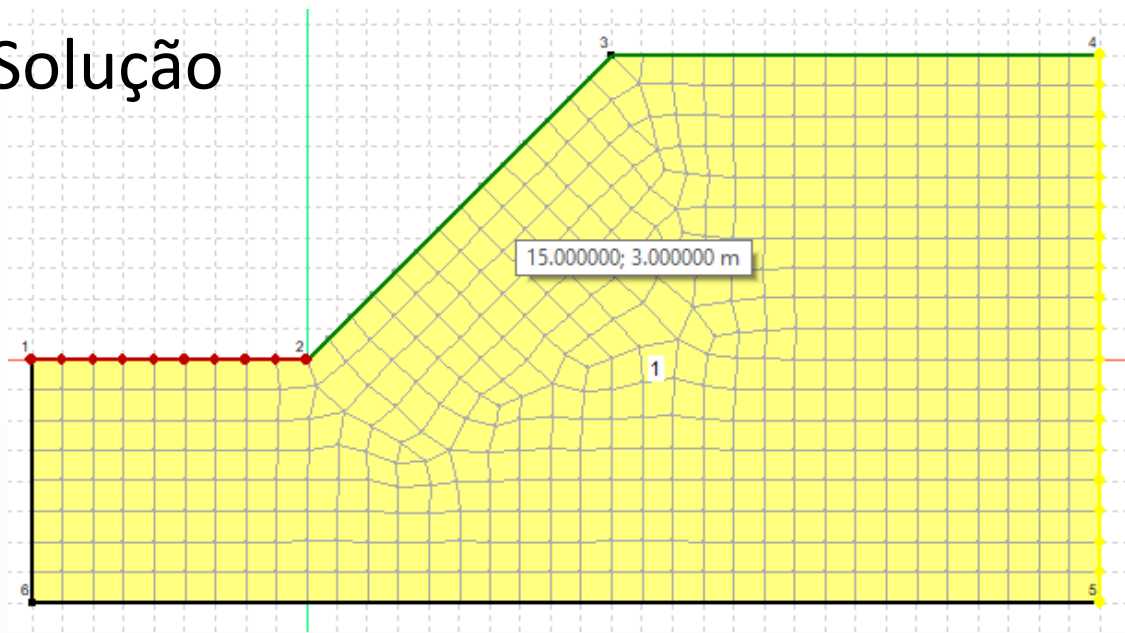
Superfície Circular

Exercício

Usando um software estabeleça qual o nível freático que leva este talude a um FS = 1



Solução



Parâmetros de Resistência

Description	ϕ Values in degrees when soil compaction is		
	Loose	Medium	Dense
Non-plastic silt	26–30	28–32	30–34
Uniform fine to medium sand	26–30	30–34	32–36
Well graded sand	30–40	34–40	38–46
Sand and gravel	32–36	36–42	40–48

Terzaghi and Peck (1967)

Table 11.1 Experimental Values Measured for ϕ^b

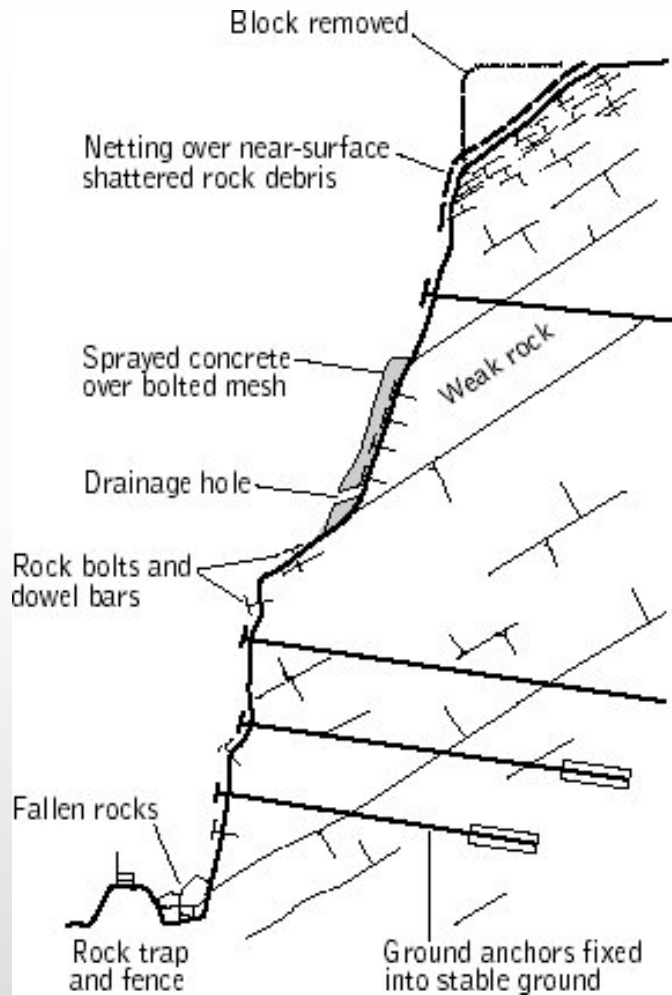
Soil Type	c' (kPa)	ϕ' (deg)	ϕ^b (deg)	Test Procedure	Reference
Compacted shale; $w = 18.6\%$	15.8	24.8	18.1	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Boulder clay; $w = 11.6\%$	9.6	27.3	21.7	Constant water content triaxial	Bishop et al. (1960)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	37.3	28.5	16.2	Consolidated drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	20.3	29.0	12.6	Constant drained triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1580 \text{ kg/m}^3$	15.5	28.5	22.6	Consolidated water content triaxial	Satija (1978)
Dhanauri clay; $w = 22.2\%$, $\rho_d = 1478 \text{ kg/m}^3$	11.3	29.0	16.5	Constant water content triaxial	Satija (1978)
Madrid grey clay; $w = 29\%$	23.7	22.5 ^a	16.1	Consolidated drained direct shear	Escario (1980)
Undisturbed decomposed granite; Hong Kong	28.9	33.4	15.3	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Undisturbed decomposed rhyolite; Hong Kong	7.4	35.3	13.8	Consolidated drained multistage triaxial	Ho and Fredlund (1982a)
Tappen-Notch Hill silt; $w = 21.5\%$, $\rho_d = 1590 \text{ kg/m}^3$	0.0	35.0	16.0	Consolidated drained multistage triaxial	Krahn et al. (1989)
Compacted glacial till; $w = 12.2\%$, $\rho_d = 1810 \text{ kg/m}^3$	10.0	25.3	7–25.5	Consolidated drained multistage direct shear	Gan et al. (1988)

^a Average value.

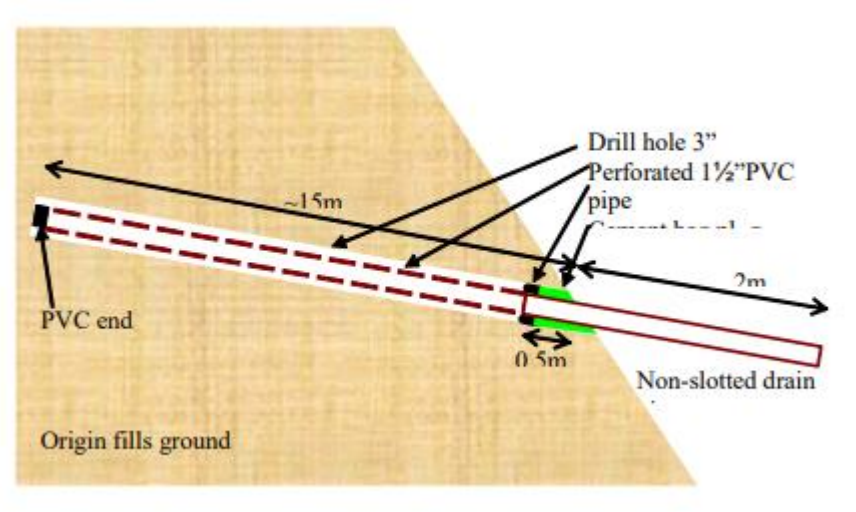
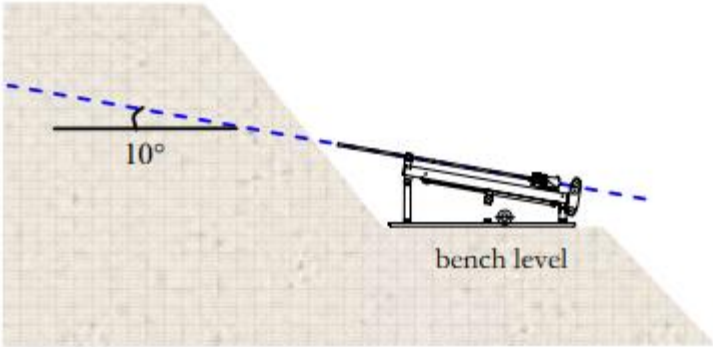
Fredlund et al. (2012)

O que fazer para evitar ou controlar os problemas em taludes ?

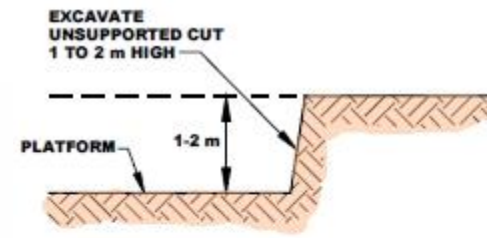
Exemplos (tirantes)



Exemplos (drenos)



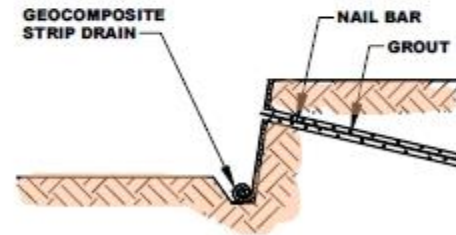
Exemplos (Grampos)



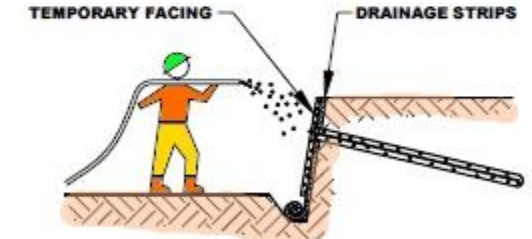
STEP 1. EXCAVATE SMALL CUT



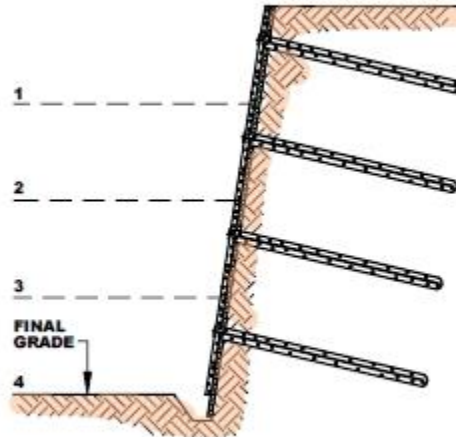
STEP 2. DRILL NAIL HOLE



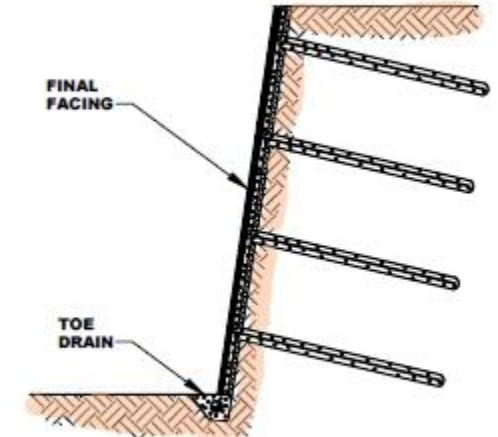
STEP 3. INSTALL AND GROUT NAIL (INCLUDES STRIP DRAIN INSTALLATION)



STEP 4. PLACE TEMPORARY FACING (INCLUDES SHOTCRETE, REINFORCEMENT, BEARING PLATE, HEX NUT, AND WASHERS INSTALLATION)



STEP 5. CONSTRUCTION OF SUBSEQUENT LEVELS



STEP 6. PLACE FINAL FACING ON PERMANENT WALLS (INCLUDES BUILDING OF TOE DRAIN)



<https://www.dsiamerica.com/products/geotechnical-systems/dywidag-soil-nails/construction-of-a-soil-nail-wall/>

Exemplos (Drenagens)



<http://ecotrends-international.com/RSS.htm>



https://www.bca.gov.sg/housing/sp/maintaining/Maint_Newsle



<http://2ge203-2ad2.blogspot.com/2008/01/slope-drainage.html>

Exemplos (Solo reforçado)



Cuidados nas análises

