

VI Encontro Internacional da Casa das Ciências

A exploração de pedreiras: decretos-lei e formas de escavação

Componente Prática

As atividades realizadas nesta componente têm por objetivo expor princípios básicos de natureza física que regem a estabilidade de vertentes naturais e de taludes de origem antrópica. Os movimentos de massa em vertentes naturais são frequentemente despoletados pela atividade antrópica que converge com fatores naturais para a perda do estado de equilíbrio, que é por vezes precário.

As atividades vão cobrir três aspetos:

- 1 – O ângulo de atrito de um material e como influencia o movimento.
- 2 – Como ocorrem deslizamentos planares e os parâmetros que os influenciam.
- 3 – Como a presença de água em excesso pode conduzir à ocorrência de fluxos.

Estas atividades refletem o carácter interdisciplinar no estudo dos movimentos de massa, nomeadamente na interface com a Física e a Matemática, mas essencialmente a importância da Geologia na prevenção e remediação, na identificação da perigosidade potencial e no ordenamento do território.

Definições e fórmulas

Tensão – distribuição de forças por unidade de área (Pascal)

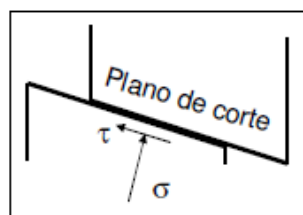
Tensão cisalhante = tensão de corte (Figura 1) $\tau = c + \sigma \tan \phi$

É a força por unidade de área que age **tangencialmente** à área

σ - tensão **normal** ao plano de corte

τ - tensão tangencial (**paralela** ao plano de corte)

ϕ - coeficiente de atrito (ângulo de resistência ao corte)



A tensão neste plano
é independente da
deformação

Figura 1 – Representação esquemática das tensões normal e cisalhante.

Tensão intersticial (=tensão neutra) - pressão na água dos vazios do solo (solo completamente saturado). É isotrópica ou hidrostática (igual em todas as direções) (Figura 2).

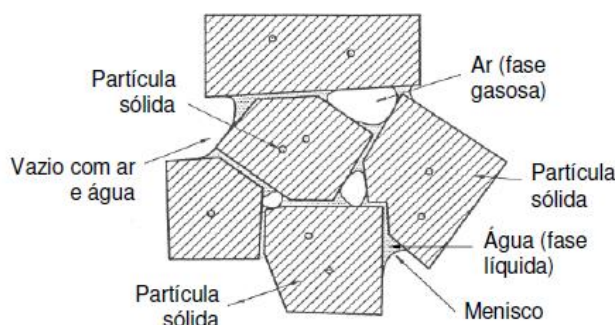


Figura 2 – Representação de um material granular, poroso, com poros parcialmente preenchidos por água, criando adesão entre as partículas sólidas.

As **forças capilares** unem as partículas entre si e, deste modo, aumentam a resistência do solo. Anulam-se quando o solo é completamente saturado, o que explica a perda significativa de resistência observada, por exemplo, na areia saturada.

Ângulo de repouso – é o maior ângulo que um cone de determinado **material solto** faz com o plano horizontal **sem ocorrer deslizamento** à medida que mais material é adicionado ao cone. Corresponde ao ângulo de atrito interno para o caso de pressões de confinamento praticamente nulas, ou ainda, ao ângulo de atrito interno do material depositado em estado completamente solto. Depende da natureza dos materiais.

Fator de segurança - Valor numérico da relação entre a **resistência ao cisalhamento** disponível do solo para garantir o equilíbrio do corpo deslizante e a **tensão de cisalhamento** mobilizada, sob o efeito dos esforços atuantes (Figura 3). O fator de segurança tem que ser >1 para que exista estabilidade.

A **resistência ao cisalhamento disponível**, que se desenvolve ao longo da superfície de rotura pode ser explicitada através das forças resultantes de **coesão e atrito**, c e ϕ respetivamente, que são o produto dos parâmetros de resistência pela área (A) da superfície onde se desenvolve essa resistência.

$$FS = \frac{\text{resisting forces}}{\text{driving forces}}$$

$$FS = \frac{cA + W \cos \psi_p \tan \phi}{W \sin \psi_p}$$

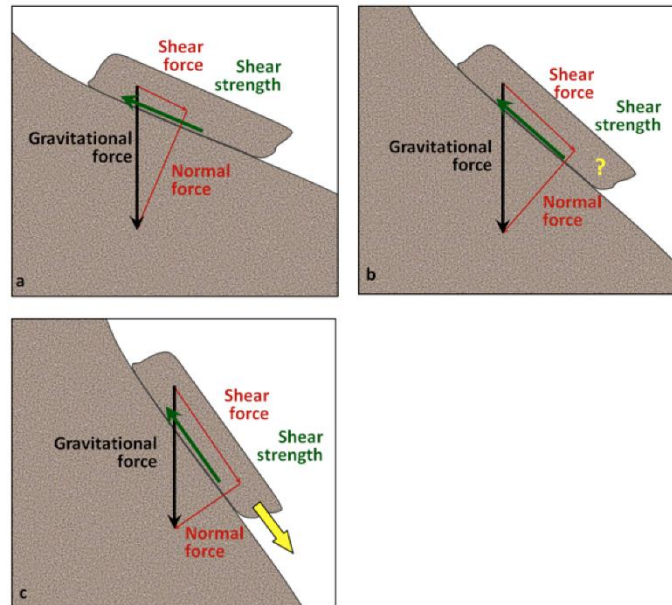


Figura 3 – Representação esquemática das formas atuantes sobre um corpo apoiado numa superfície inclinada.

A inclinação de um plano pode ser expressa em graus (utilizado em geologia) ou percentagem (por exemplo, em estradas) (Figura 4).

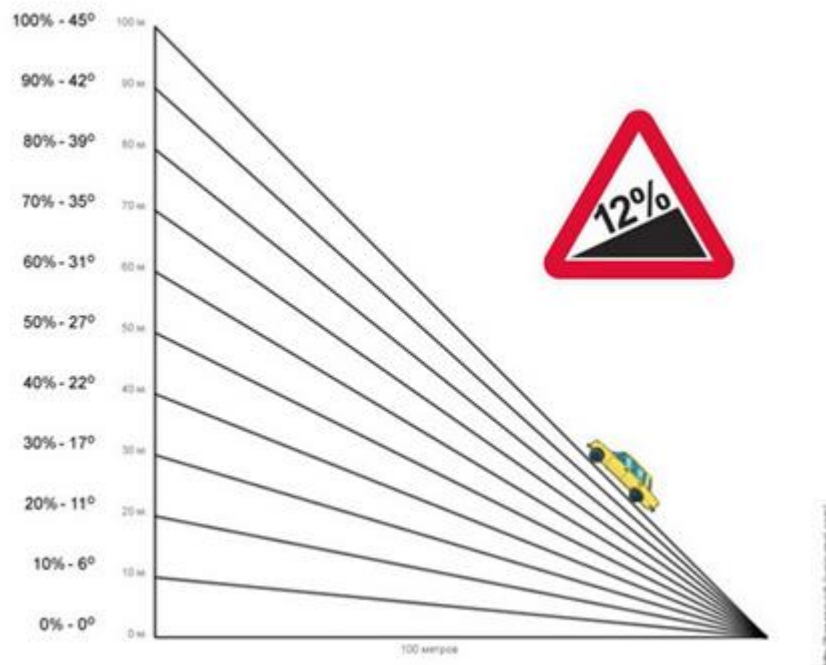


Figura 4 – Representação da inclinação de uma superfície em graus e em percentagem.

1. Experiência 1 – Ângulo de atrito

1.1 Material utilizado

Para a elaboração desta atividade, utilizou-se o seguinte material:

- 8 gobelets de 250 mL;
- 5 crivos de malha em arame:
 - Crivo de 6,7 mm (-2,75 ϕ);
 - Crivo de 4 mm (-2 ϕ);
 - Crivo de 2 mm (-1 ϕ);
 - Crivo de 1 mm (0 ϕ);
 - Crivo de 0,5 mm (-1 ϕ).
- Fundo e tampa dos crivos;
- 4 frações de areia:
 - Areia fina (0,5 – 1 mm/1 ϕ a 0 ϕ);
 - Areia média (2 – 4 mm/-1 ϕ a -2 ϕ);
 - Areão (superior a 4 mm/>-2 ϕ);
 - Brita (superior a 4 mm/>-2 ϕ);
- Esguicho contendo água da torneira;
- Tabuleiro em metal.

1.2 Procedimento

a) Utilizam-se os crivos empilhados sobre a base por ordem decrescente de abertura da malha de cima para baixo, vertendo a amostra de areia no crivo de maior abertura da malha; de seguida, coloca-se a tampa e agita-se manualmente a série de crivos (pode ser realizado num agitador próprio, caso exista, Figura 5) de modo a que a amostra seja separada granulometricamente.



Figura 5 – Exemplo de crivos de arame com diferentes aberturas e série de peneiros em agitador mecânico.

b) Após a separação da amostra, pega-se no crivo de 0,5 mm (-1 ϕ) e enchem-se dois gobelets de 250 mL com o material retido, passando estes a conter a fração granulométrica de areia fina (0,5 – 1 mm/1 ϕ a 0 ϕ)).

Faz-se o mesmo procedimento para cada uma das frações retidas nos diferentes peneiros.

A amostra retida nos crivos de 1 mm (0ϕ) e de 6,7 mm é colocada em recipientes separados e guardada para outras experiências.

Obtêm-se assim 2 gobelets de 250 mL para cada uma das seguintes frações:

- areia fina ($0,5 - 1\text{ mm}/1\phi$ a 0ϕ)),
- areia média ($2 - 4\text{ mm}/-1\phi$ a -2ϕ),
- areão (superior a $4\text{ mm}/>-2\phi$).

Os excessos são colocados em recipientes à parte e guardados.

Os últimos 2 gobelets de 250 mL enchem-se com a brita de dimensão superior a $4\text{ mm}/>-2\phi$.

c) Para cada uma das frações de areia (areia fina, areia média e areão) e de brita, humedece-se a amostra contida num dos gobelets, de modo a que as partículas fiquem húmidas, mas não completamente saturadas em água.

c) Despeja-se no centro do tabuleiro um dos gobelets de 250 mL, de modo a que a amostra seja empilhada em forma de pirâmide. Recorrendo a uma aplicação de telemóvel, que permita medir inclinações, obtém-se a inclinação da pirâmide de amostra. Despeja-se o tabuleiro de volta para o gobelet de 250 mL.

Repete-se esta atividade para cada 1 dos 8 gobelets preenchendo-se a seguinte tabela:

ϕ		Material seco	Material húmido
		Ângulo de atrito	Ângulo de atrito
1	Areia fina		
0	Areia média		
-2	Areão		
-2	Brita		

2. Experiência 2 – Deslizamento planar

2.1 Material utilizado

Para a elaboração desta atividade, utilizou-se o seguinte material:

- 2 transferidores
- 2 blocos prismáticos de calcário, de superfícies lisas;
- 2 seixos de formas irregulares
- 1 placa de calcário, de superfície lisa;
- 2 meias canas de PVC
 - Uma com superfície limpa
 - Uma sobre a qual foram colados grãos de areia fina para simular a rugosidade das discontinuidades.
- 1 bloco construído em rofo mate com desenho de duas famílias de diaclases (simula o maciço rochoso)
 - Um fio de corte
 - Agulhas
 - Blocos de calcário

2.2 Procedimento

a) Coloca-se um bloco de calcário sobre cada uma das superfícies e regista-se o ângulo de inclinação para o qual o bloco se desloca.

b) Coloca-se um segundo bloco sobre o primeiro para verificar a ação do aumento da tensão normal sobre a resistência ao corte.

c) No bloco diagrama, no qual foram destacados 3 volumes simulando o deslizamento planar e o deslizamento em cunha (Figura 6).

- Por colocação de um volume, observa-se o efeito do aumento de carga no topo do talude.

- Por aplicação de pequenas pancadas, simula-se o efeito de vibrações sobre a estabilidade do talude.

- Por colocação de agulhas com orientações tais que intersectem as superfícies de descontinuidade, simula-se o efeito de pregagens.

- Por colocação de blocos de calcário, simula-se a aplicação de muros de suporte.

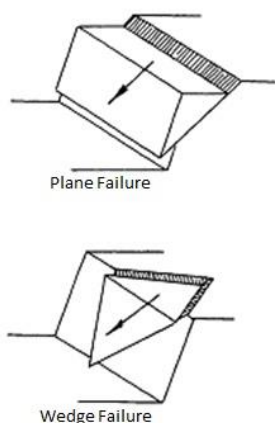


Figura 6 – Representação esquemática de deslizamento planar e em cunha.

	Superfície de calcário	PVC liso	PVC rugoso
1 Bloco de calcário			
2 Blocos de calcário			

Aplicando o bloco na vertical sobre a placa de calcário, pode ainda verificar-se o efeito da forma do bloco e da inclinação do plano sobre o tipo de movimento (Figura 7). Repete-se o procedimento para as partículas de seixo.

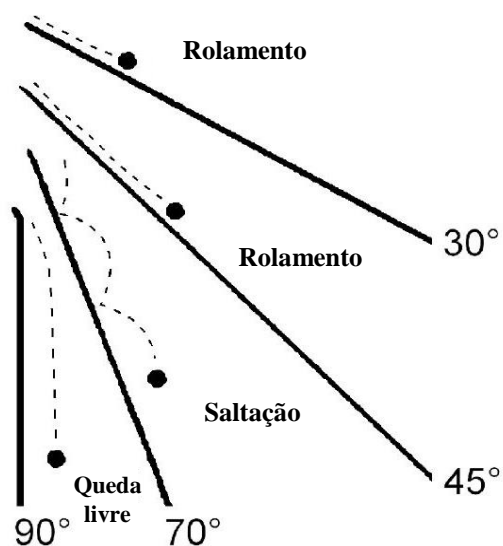


Figura 7 – Representação esquemática do movimento de um bloco dependendo da inclinação do plano no qual se apoia (Conceição, 2019).

3. Experiência 3 – Fluxo de detritos

3.1 Material utilizado

Para a elaboração desta actividade, utilizou-se o seguinte material:

- 1 transferidor
- 2 placas de roofmate
- 1 serrote
- 1 x-ato
- Cola (que não contenha solvente)
- Acetona
- Tinta em spray (que não contenha solvente)
- Peças em plástico para simular barragens
- Garrações de água
- 1 porção de areia de dimensão 2-4 mm/-1φ a -2φ
- 1 porção de areia de dimensão 6,7-11,2 mm/-3.5 a -2.75

3.2 Procedimento

As placas de roofmate são coladas para criar um volume com cerca de 8 cm de altura. Num dos extremos colocam-se mais 8 cm de roofmate para simular o topo de uma encosta.

Escava-se o leito do rio com o x-ato e com acetona, aplicada suavemente com pincel. Utiliza-se o mesmo processo para fazer o modelado do terreno.

Coloca-se uma camada da fracção de areia mais grosseira ao longo do leito do rio, à qual se sobre põe a fracção de areia mais fina.

A experiência é realizada primeiro sobre o leito com as camadas de areia e a seguir com a inserção de duas barragens, cravadas em sulcos realizados no modelo com x-ato.

Em cada uma das fases, verte-se água abundante desde a cabeceira do vale até ao local em que a morfologia é mais plana.

Verifica-se que se forma um fluxo de material que desce toda a encosta e causa inundação da zona mais plana, a jusante. As barragens ajudam a minimizar os efeitos do fluxo.

Observa-se ainda a inversão da granulometria dos materiais utilizados durante o transporte pela água a grande velocidade.

Exercício sobre FS:

Considere que é necessário escavar um talude para o qual se admite um fator de segurança de 1,3. Existe um bloco de 70 toneladas sobre um plano de 35° de inclinação sobre o qual pode ocorrer deslizamento planar. Os parâmetros determinados para o maciço são coesão nula, ângulo de atrito de 32° e u de 22 toneladas. Determine a força que seria aplicada por uma ancoragem que fizesse 30° com o plano horizontal.

$$FS = \frac{cA + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p + T \sin(\psi_T + \psi_p)) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p - T \cos(\psi_T + \psi_p)}$$

Na sequência desta atividade, sugerimos algumas questões:

1. O maior ângulo para o qual o sedimento (sem aplicação de tensões) é estável designa-se por:
 - ☐ Ângulo de estabilidade
 - ☐ Ângulo de inclinação
 - ☐ Ângulo de segurança
 - ☐ Ângulo de atrito
 - ☐ Ângulo de coesão

2. A adição de água ao material conduz a:
 - ☐ _____ do ângulo de _____devido à existência de _____
e tem efeito igual/diferente em todas as granulometrias.

3. A adição de água em excesso a materiais granulares (areia) leva à diminuição de _____ e possível ocorrência de movimentos de massa.
 - ☐ Ângulo do talude
 - ☐ Resistência ao corte do material
 - ☐ Massa
 - ☐ Conteúdo de areia relativamente à água
 - ☐ Coesão

4. O material desloca-se ao longo de um declive (vertente, talude) quando as forças _____ excedem as forças _____.
 - ☐ De corte; normais
 - ☐ Gravíticas; ângulo
 - ☐ Normal; gravidade
 - ☐ Atrito; de corte

5. Indique 3 fatores que contribuem para o aumento da inclinação de vertentes/taludes.
 - ☐ Impacte da ondulação marinha na base
 - ☐ Excessiva erosão fluvial
 - ☐ Escavação para a construção de uma estrada
 - ☐ Saturação do solo
 - ☐ Remoção da vegetação

6. Que condições atmosféricas podem causar movimentos de massa?
 - ☐ Precipitação mais intensa do que habitual
 - ☐ Precipitação menos intensa do que habitual
 - ☐ Elevadas temperaturas
 - ☐ Condições de congelamento
 - ☐ Seca

7. Quais dos seguintes fatores estão frequentemente na origem de deslizamentos (selecione 4)
- Adição de água
 - Adição de carga
 - Corte da vertente/talude
 - Sismo
 - Colocação de muros na base
 - Drenagem
8. Qual destes tipos de movimentos de massa é tão lento que provoca a inclinação de muros de suporte, vedações, árvores e postes de eletricidade?
- Fluxo de detritos
 - Deslizamento rotacional
 - Creep (reptação)
 - Queda de blocos

Bibliografia e imagens:

Cruden, D. M.; Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. Chapter 3, Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 247:36-75, 59pp.

Dorren, L. K. A. (2003). *A review of a rockfall mechanics and modelling approaches*. Progress in Physical Geography 27, 69-87pp.

IST, https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779573140030/Geo_Fund_3.pdf

Vallejo, L.G; Ferrer, M.; Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingenieria Geologica*. Pearson Educacion, Madrid, 128 pp.