

PEF 3310 – MECÂNICA DOS SOLOS E ROCHAS II (BARRAGENS)

José Jorge Nader

Maurício Abramento

Pedro Wellington

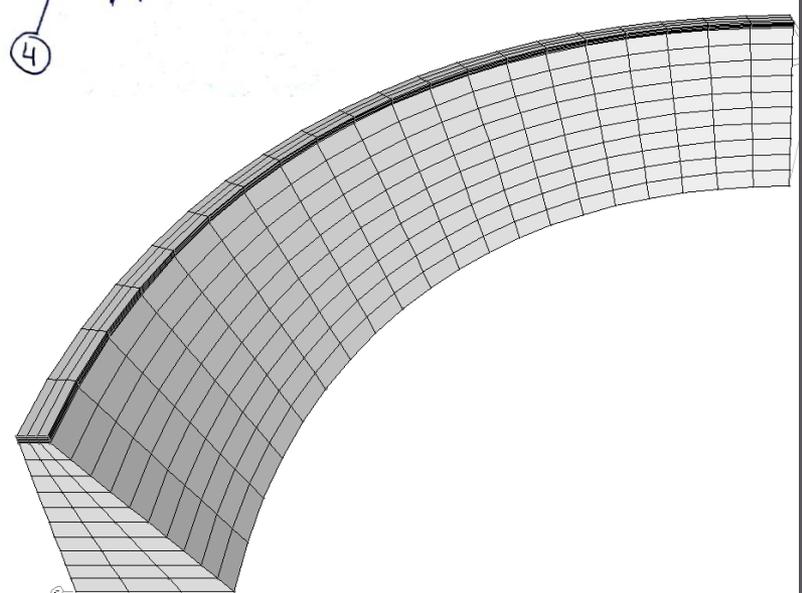
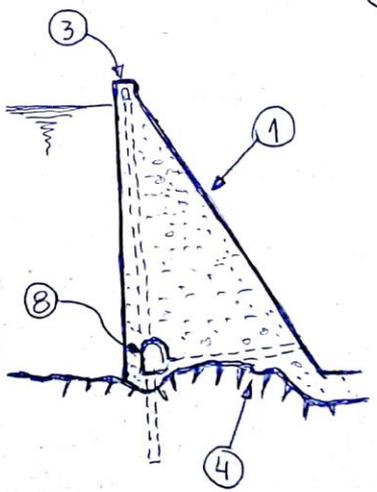
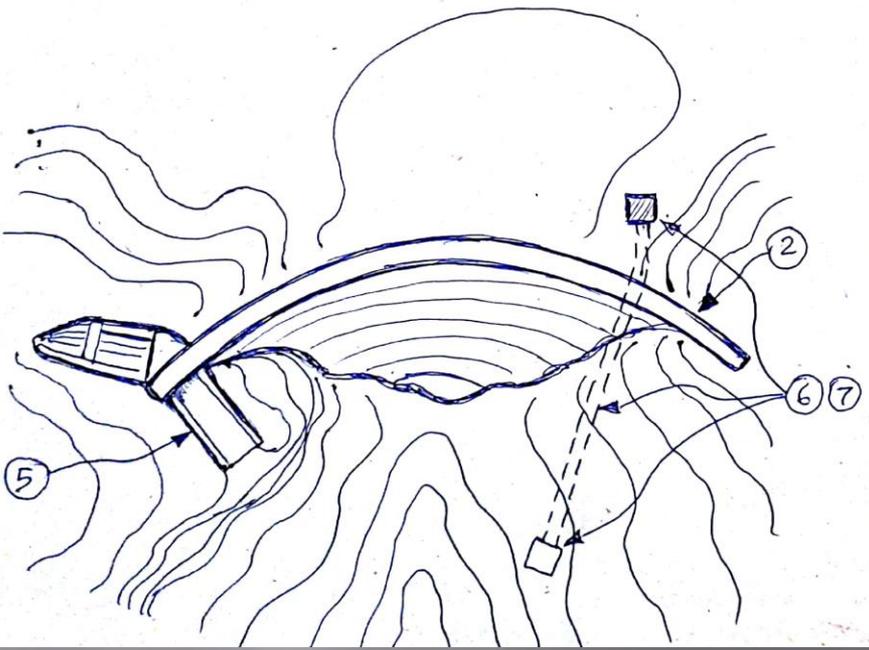
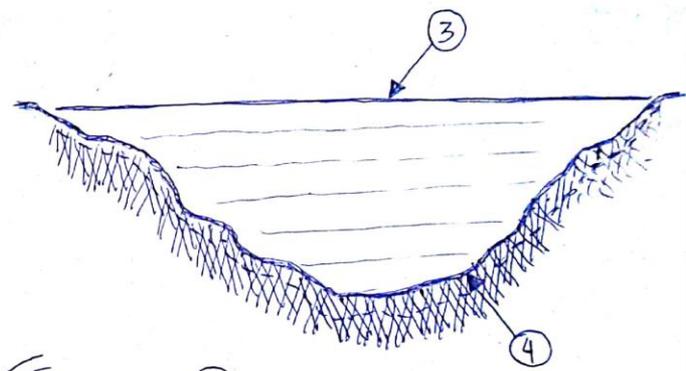
(Com base em apresentações dos professores
Waldemar Hachich, Fernando Marinho e Heloísa
Gonçalves (EPUSP-PEF))

Definição e elementos

- ▣ Barreiras artificiais construídas em determinadas seções de cursos de água, com a finalidade de retenção de grandes volumes de água para:
 - abastecimento humano;
 - geração de energia;
 - perenização de rios;
 - barramento de rejeitos de mineração;
 - outros fins;
- ▣ Elementos da estrutura:
 - Paramento;
 - Encontros ou ombreiras;
 - Fundação;
- ▣ Outros elementos:
 - Vertedouro;
 - Coroamento;
 - Tomada d'água;
 - Comportas;
 - Galerias auxiliares (inspeção, drenagem);

- ① PARAMENTO
- ② ENCONTROS
- ③ CORDAMENTO
- ④ FUNDAÇÃO

- ⑤ VERTEDOURO
- ⑥ TOMADA D'ÁGUA
- ⑦ COMPORTAS
- ⑧ GALERIAS AUXILIARES



Tipos de barragens

- ▣ Concreto
 - Gravidade
 - Contrafortes
 - Arco
 - ▣ Curvatura simples
 - ▣ Dupla curvatura
 - Concreto compactado a rolo
- ▣ Enrocamento com face de concreto
- ▣ Terra
- ▣ Terra-enrocamento
- ▣ Inúmeras outras combinações
- ▣ Raramente tipo único em determinado aproveitamento
- ▣ Todos necessitam de conhecimentos geotécnicos (seja para a própria barragem, seja para a sua fundação)

Fases de um projeto

- ▣ Viabilidade
- ▣ Projeto básico
 1. Geologia estrutural
 2. Hidrogeologia
 3. Aspectos construtivos
 4. Materiais de construção
 5. Equipamentos
 6. Fatores não técnicos e previsão de custos
- ▣ Projeto executivo

Princípios para projeto

- Segurança, estética e funcionalidade – com economia

Garantia de segurança quanto a:

- Transbordamento
- Piping
- Areia movediça
- Ruptura de taludes artificiais de montante e jusante
- Ruptura de taludes naturais das ombreiras adjacentes ao reservatório
- Efeito das ondas, formadas pela ação dos ventos nas superfícies dos reservatórios, que se quebram nos taludes de montantes, podendo provocar sulcos de erosão
- Efeito erosivo das águas das chuvas

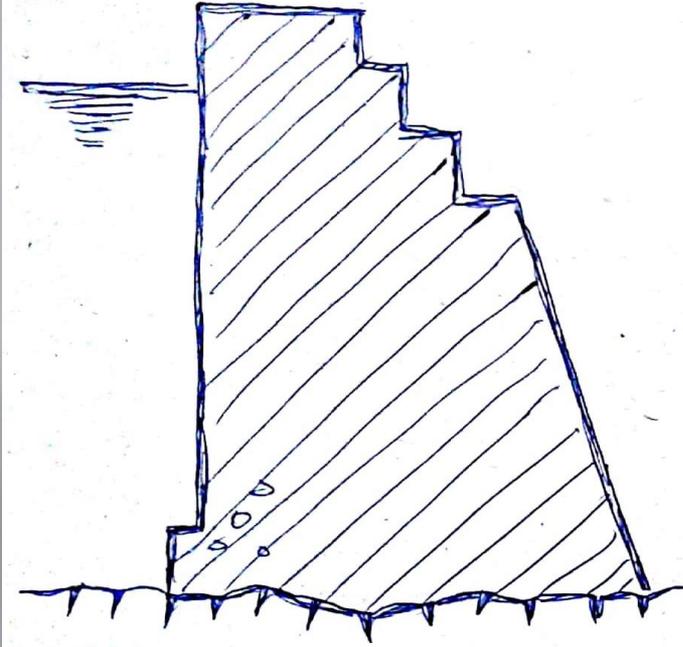
Ações

- ▣ Peso próprio;
- ▣ Empuxos de terra e de água:
 - Pressão no paramento;
 - Subpressão;
 - Silte acumulado a montante;
- ▣ Deformações impostas por:
 - Variação de temperatura;
 - Retração do concreto;
 - Subsidiências;
- ▣ Sismos;
- ▣ Outras;

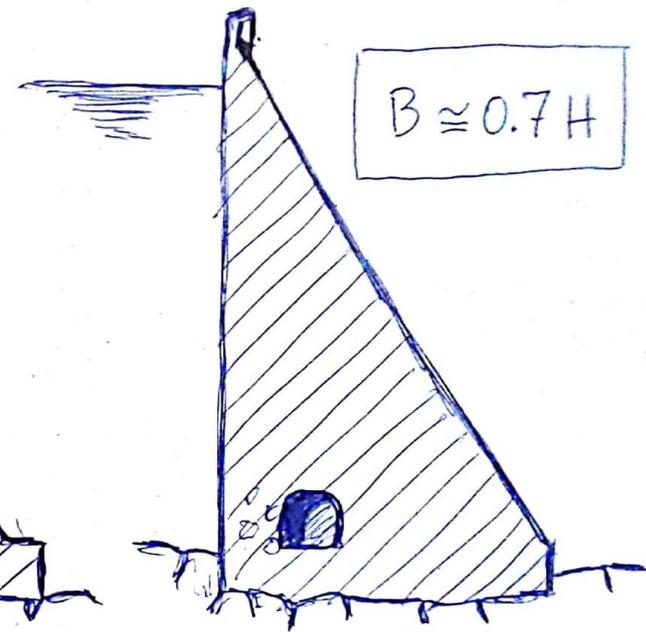
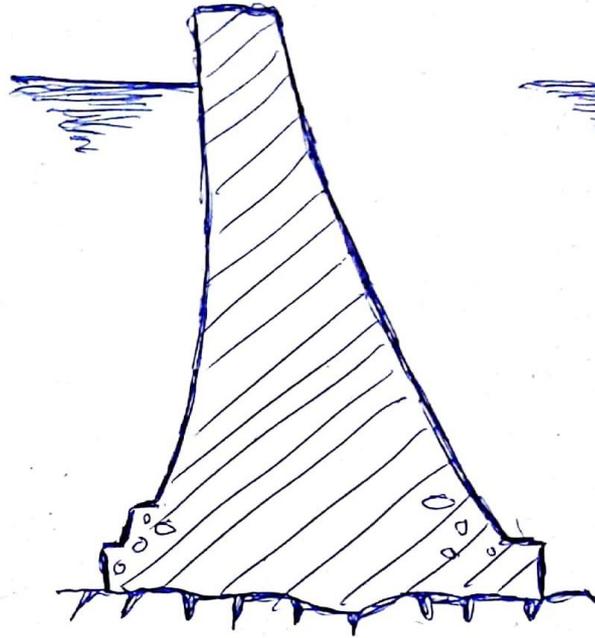
Custo relativo de alguns tipos de barragens, levando em conta só os materiais e volumes (Massad, 2003)

Tipo de barragem	Base	Volume (m ³ /m)	Custo relativo
Terra homogênea	5,5 H	2,75 H ²	1,0
Enrocamento	3,7 H	1,8 H ²	1,5
Aterro hidráulico	10,0 H	5,0 H ²	0,7
Concreto massa	0,8 H	0,4 H ²	5,0 (2,0)

Barragens de gravidade ($0,63H < B < 0,82H$)



ORIGINALMENTE
COM SEÇÃO
TRAPEZOÏDAL

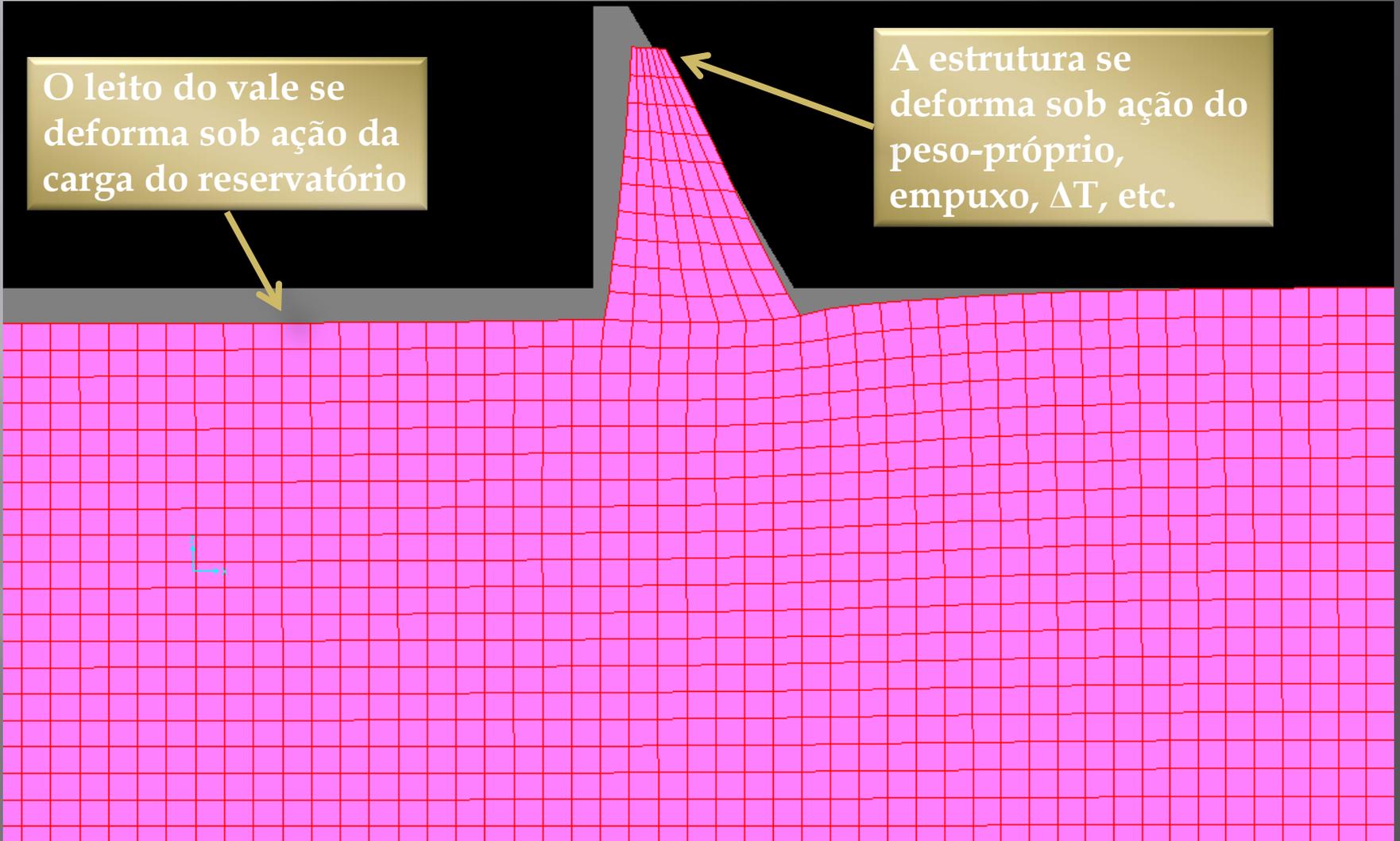


SEÇÃO MAIS USADA
ATUALMENTE É
PRÓXIMA A UMA
CUNHA TRIANGULAR
COM CAVIDADE.

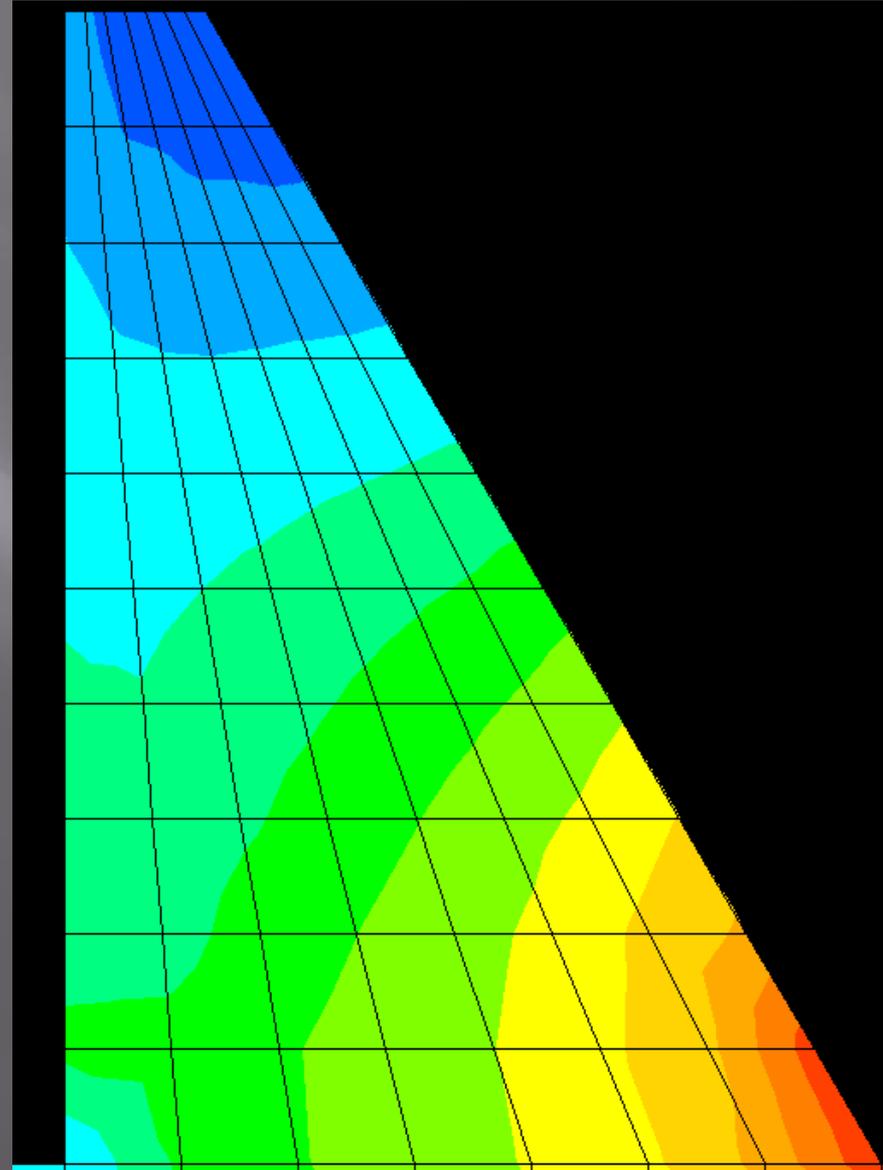
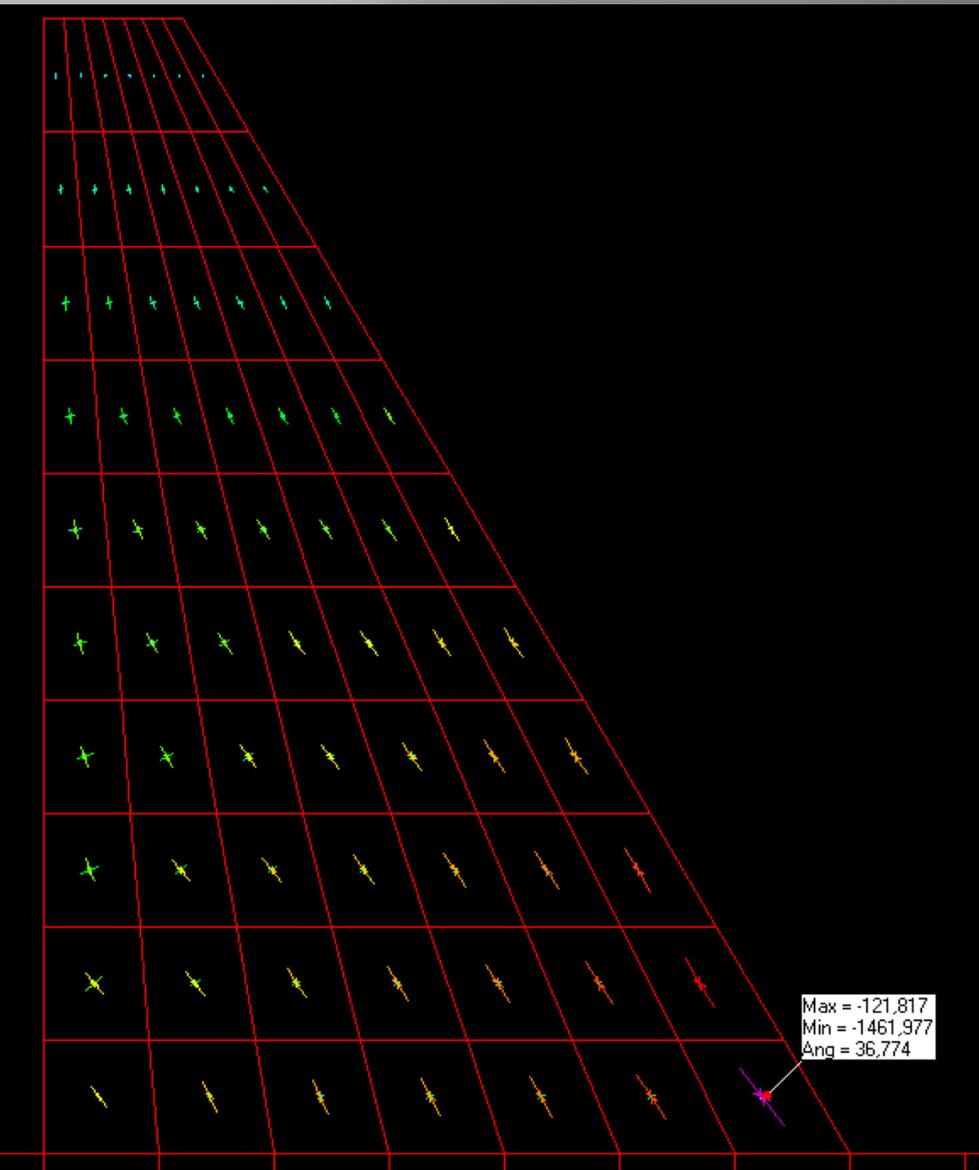
Deformações

O leito do vale se deforma sob ação da carga do reservatório

A estrutura se deforma sob ação do peso-próprio, empuxo, ΔT , etc.



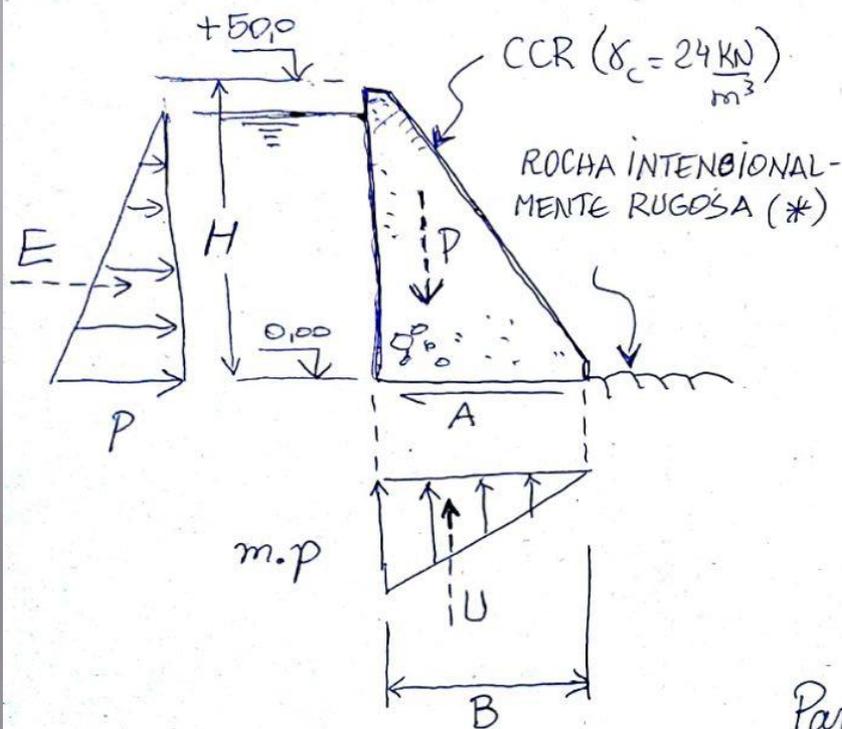
Tensões



Resistência a deslizamento

(Exemplo numérico com cálculo simplificado)

BARRAGEM DE MARRUÁS (PI)



- Com algumas simplificações e hipóteses:

$$P \approx \gamma_c \frac{BH}{2} = 0,6 B \text{ (MN/m)}$$

$$U \approx m \gamma_w \frac{HB}{2} = 0,12 B \text{ (MN/m)}$$

$$E = \frac{\gamma_w H^2}{2} = 12 \text{ MN/m (!)}$$

$$A = 0,1 B \text{ (adesão = 0,1 MPa)}$$

$$\tan \phi = 0,75 \text{ (*)}$$

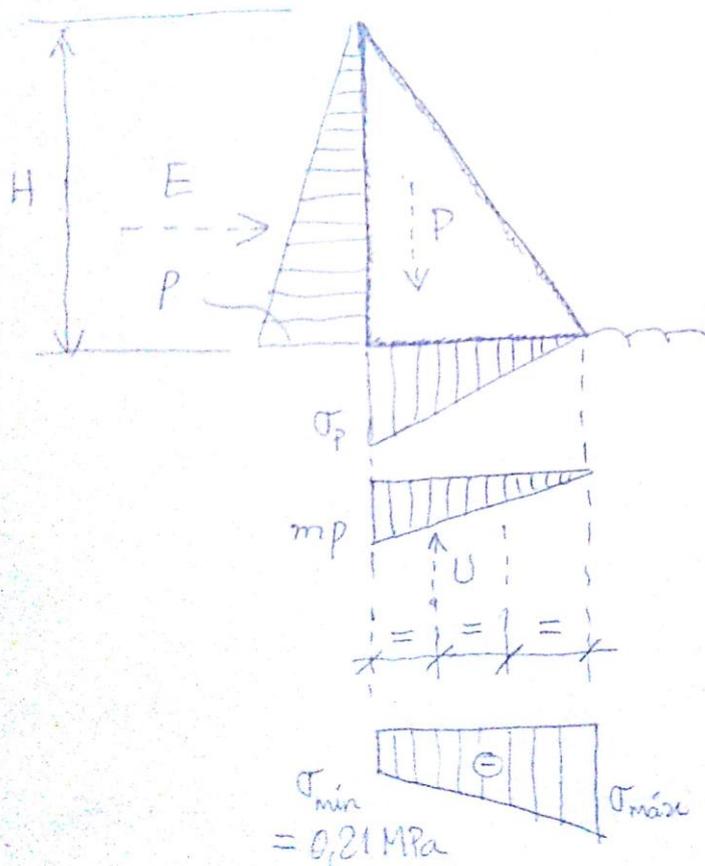
$$FS = \frac{(P-U) \tan \phi}{E-A}$$

Para $1,5 < FS < 2,0$

$$36 \text{ m} < B < 43 \text{ m}$$

Tensões na base

ADMITINDO $B = 40 \text{ m}$ ($0,8H$)



• Com algumas simplificações:

$$P = 24 \text{ MN/m}$$

$$U = 4,8 \text{ MN/m}$$

$$E = 12 \text{ MN/m}$$

$$\frac{E \times H}{3} = (P - U)c$$

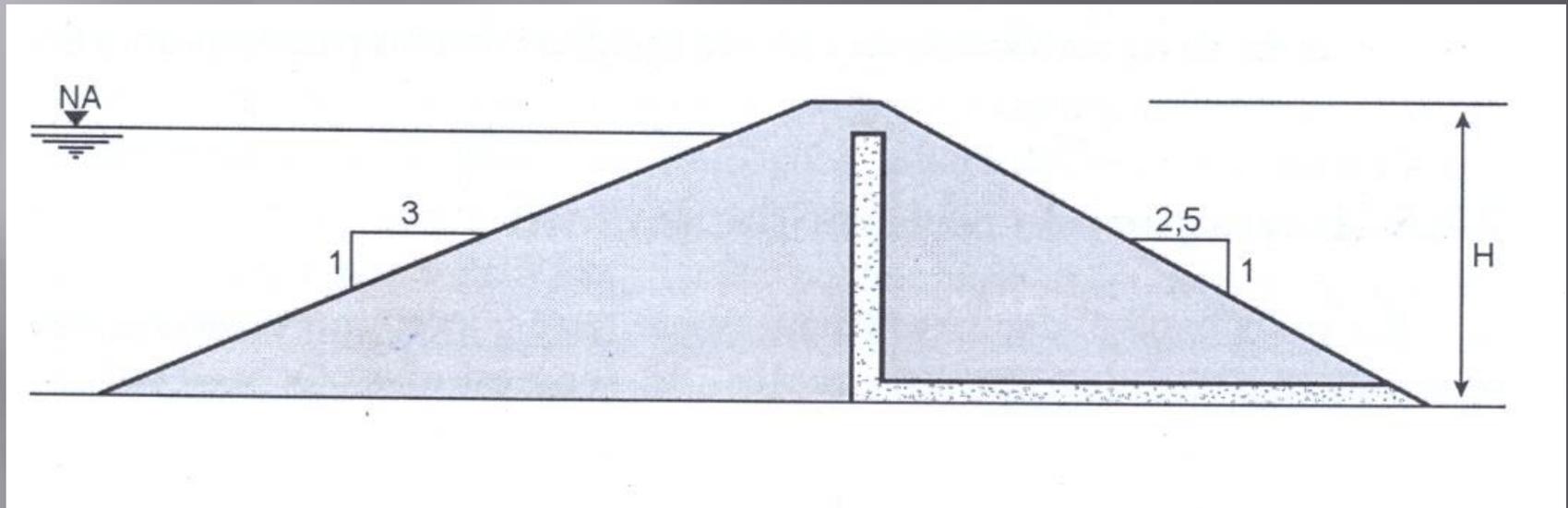
$$c = 10,4 \text{ m} < \frac{B}{3} = 13,3 \text{ m}$$

$$e = c - \frac{B}{6} = 3,75 \text{ m}$$

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{(P - U)}{B} \left(1 \pm \frac{6e}{b} \right)$$

$$= 0,48 (1 \pm 0,56)$$

Barragem de terra homogênea



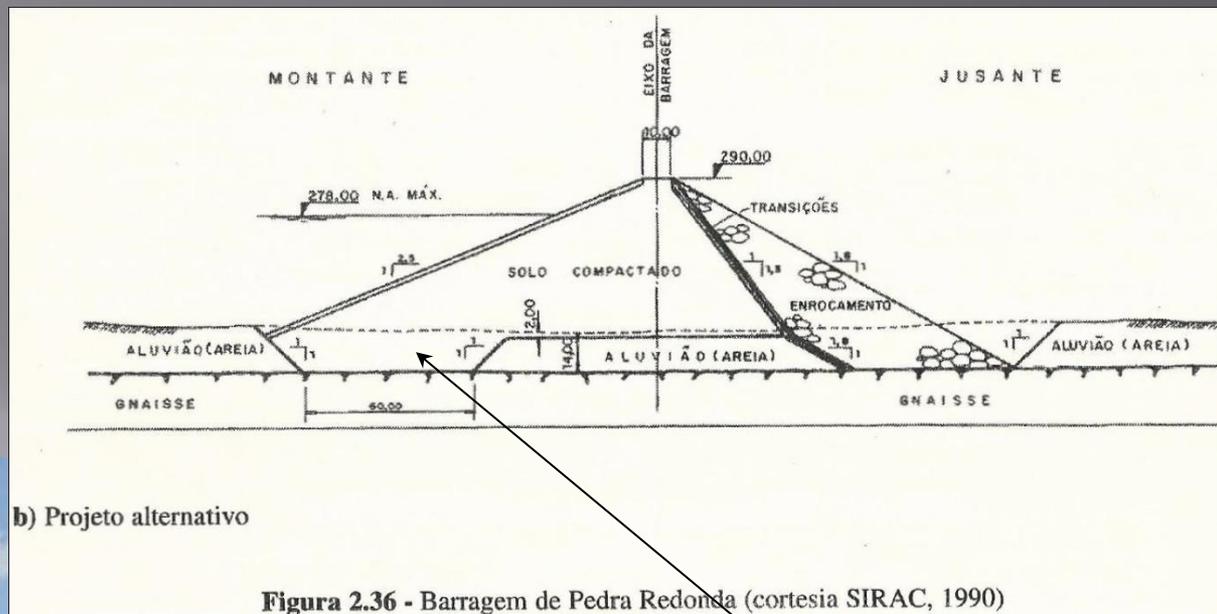
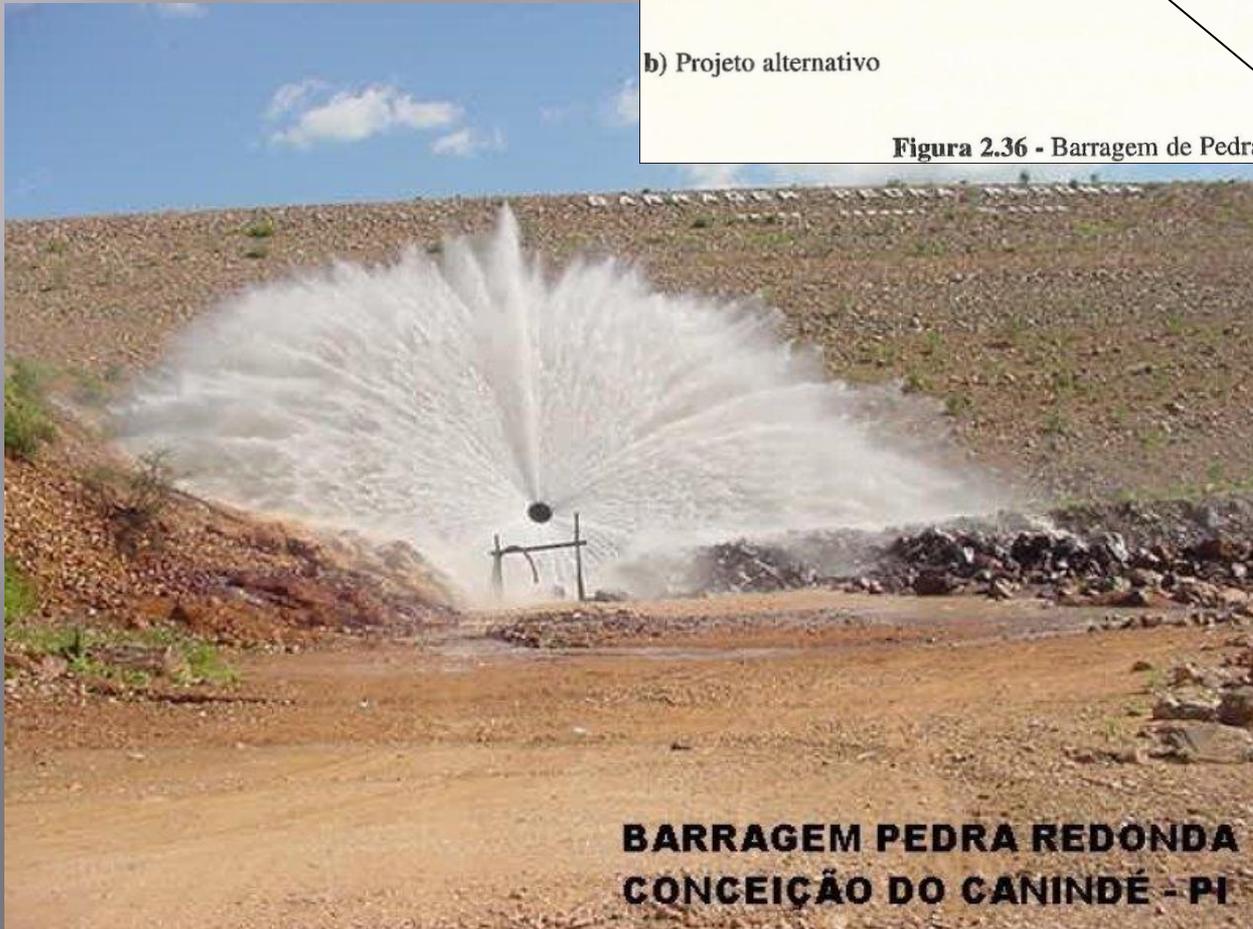


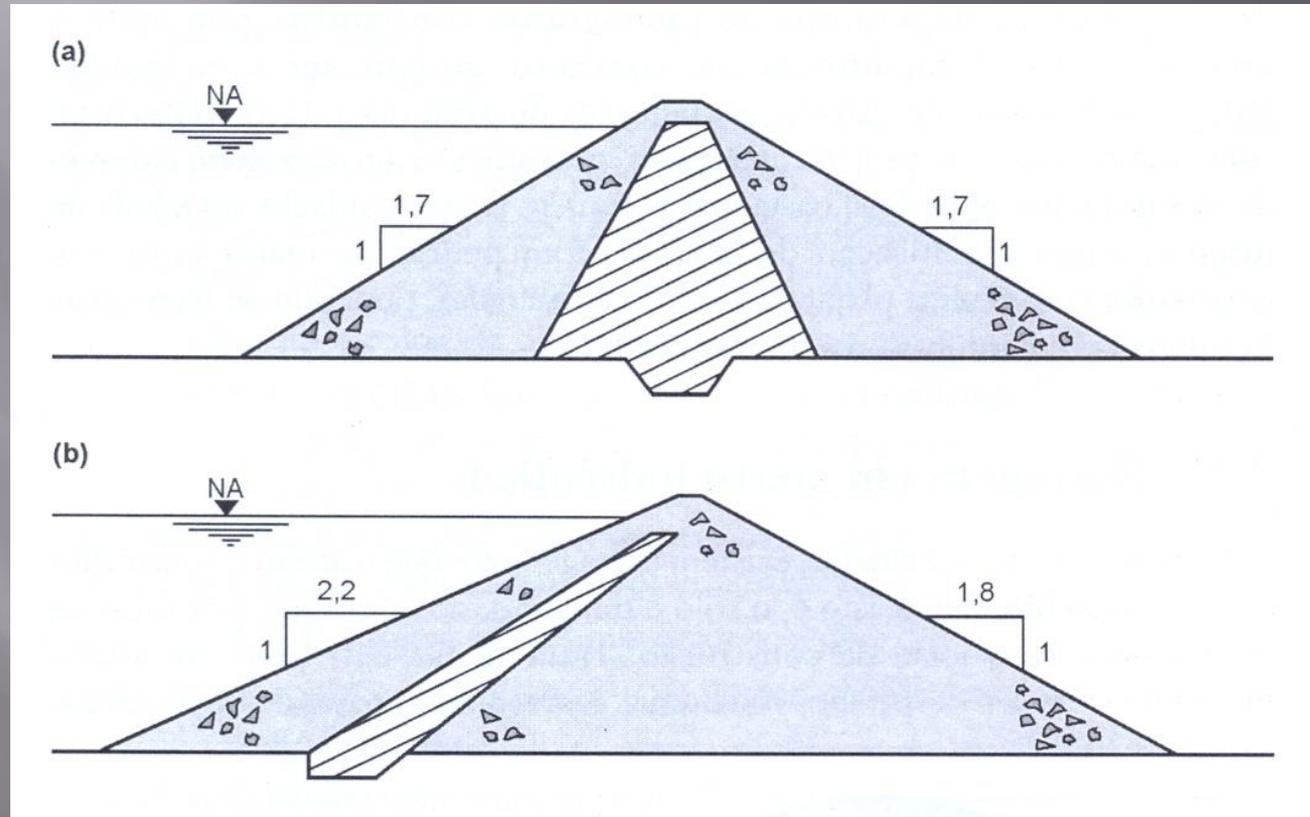
Figura 2.36 - Barragem de Pedra Redonda (cortesia SIRAC, 1990)



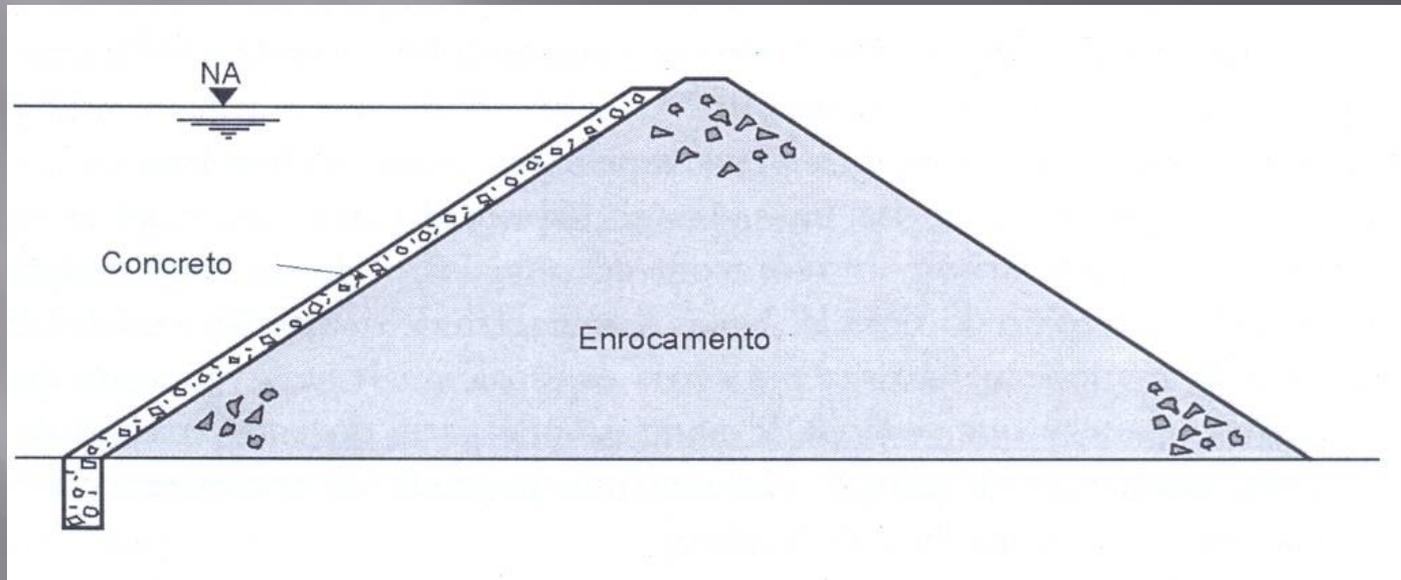
Cutoff

**BARRAGEM PEDRA REDONDA
CONCEIÇÃO DO CANINDÉ - PI**

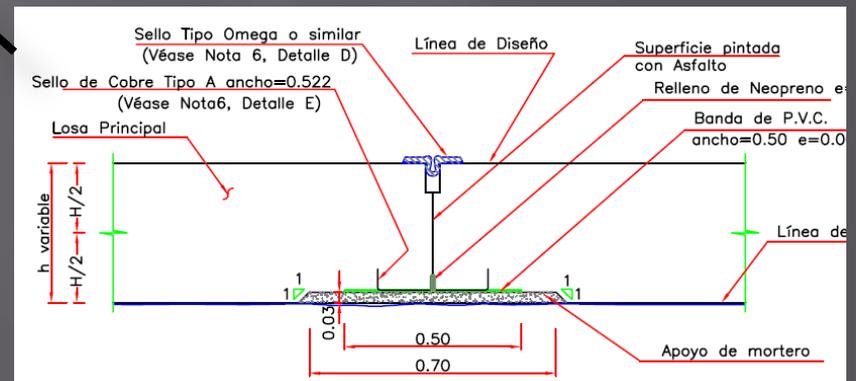
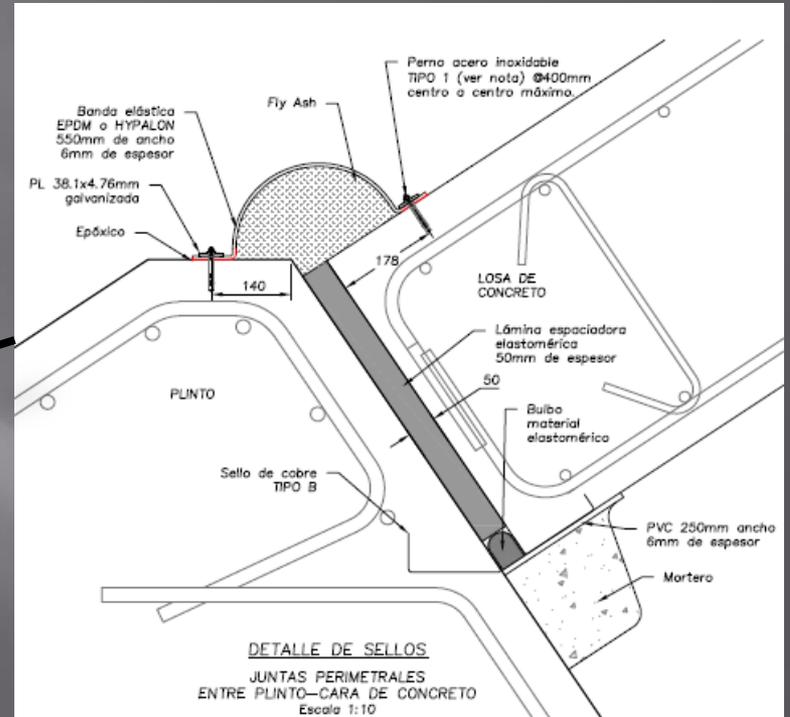
Barragem de terra - enrocamento

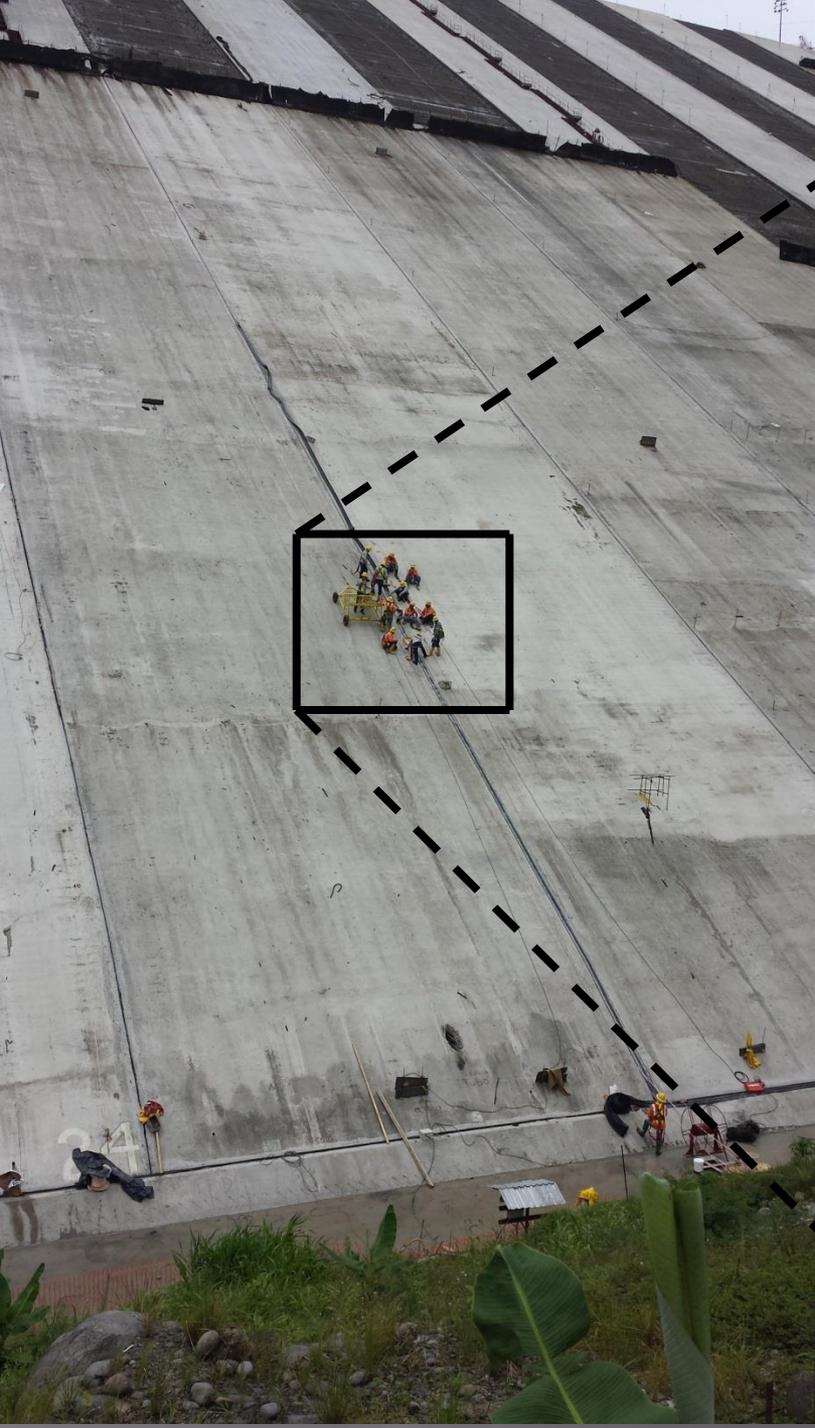


Barragem de enrocamento com membrana de concreto

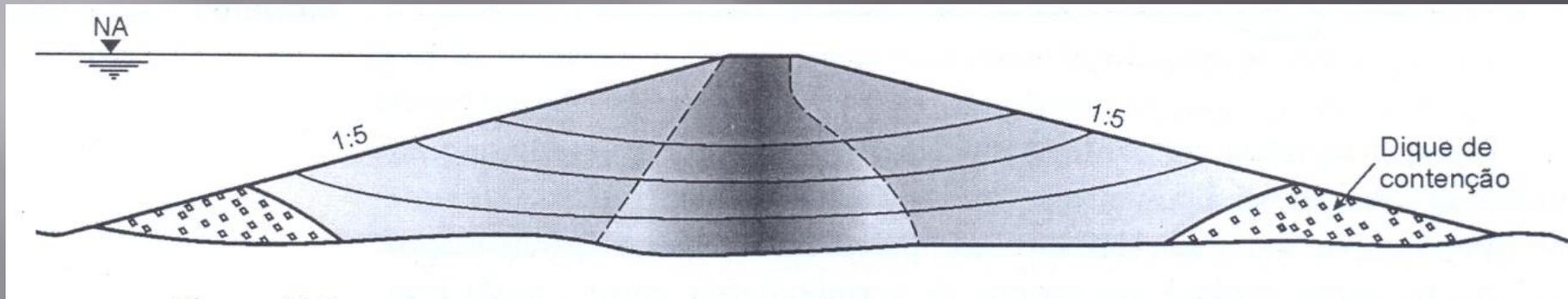


Juntas na face de concreto





Barragem em aterro hidráulico

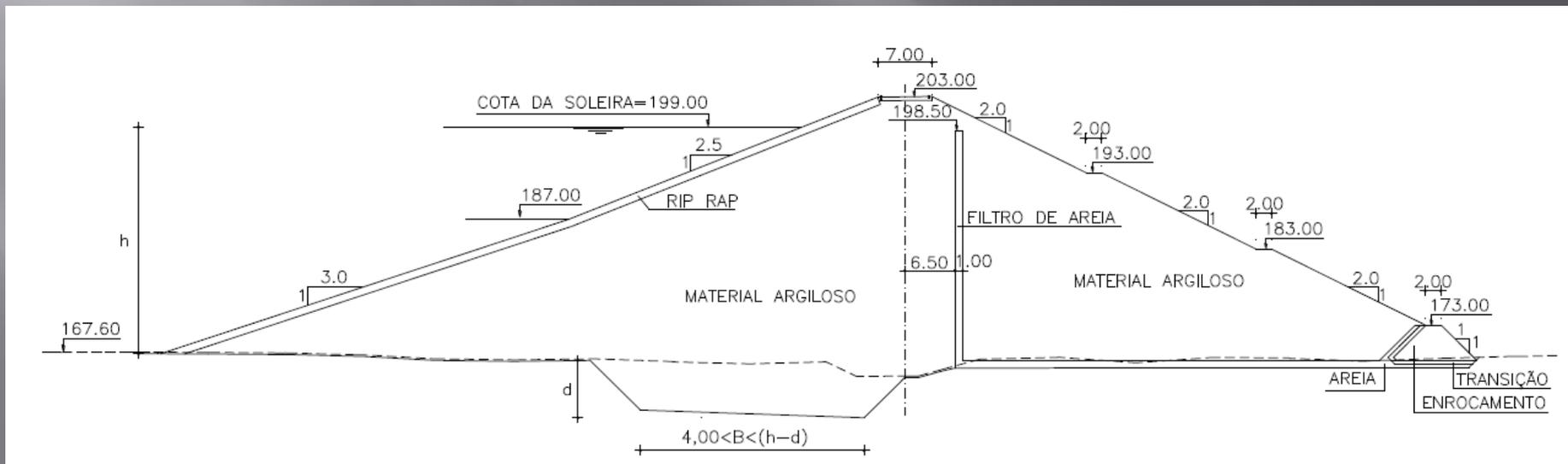


Comparação aproximada Barragem de terra x terra-enrocamento

Como exemplo, serão feitos alguns cálculos preliminares, de pré-dimensionamento, para fins de comparação de uma alternativa à barragem de terra homogênea com filtro vertical.

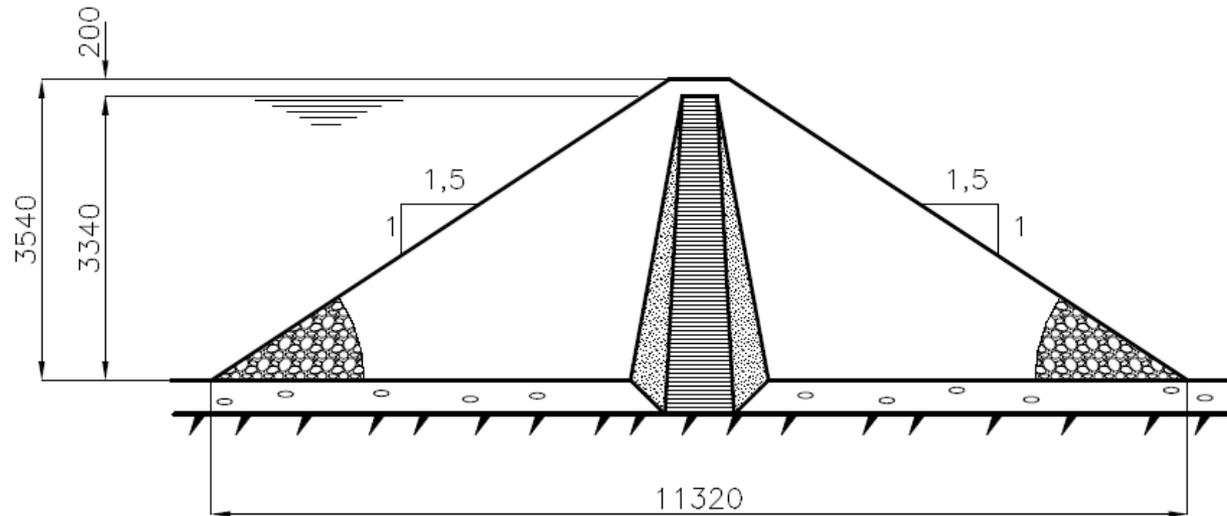
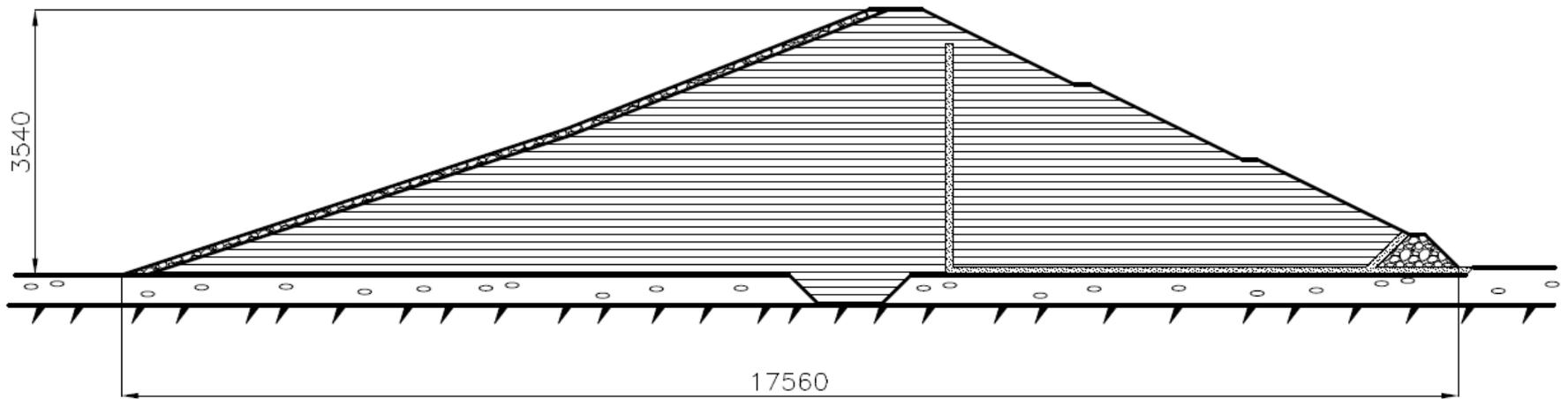
Os cálculos são simplificados.

SEÇÃO ORIGINAL: terra homogênea com filtro vertical

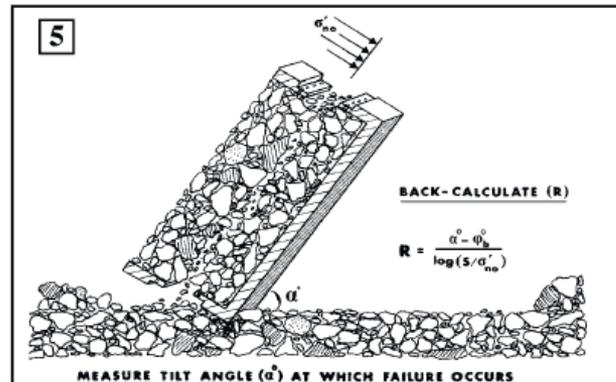
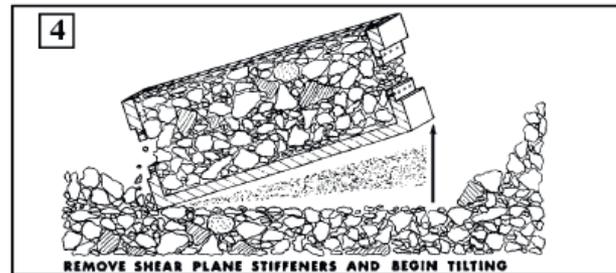
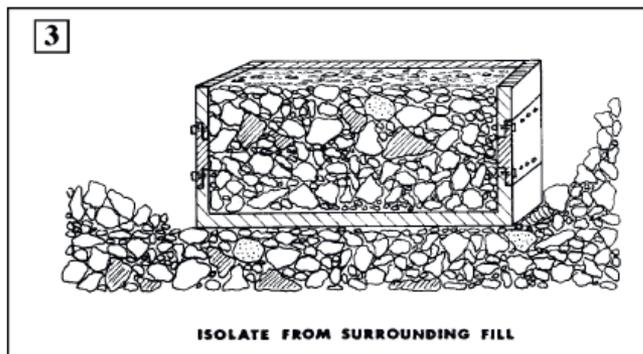
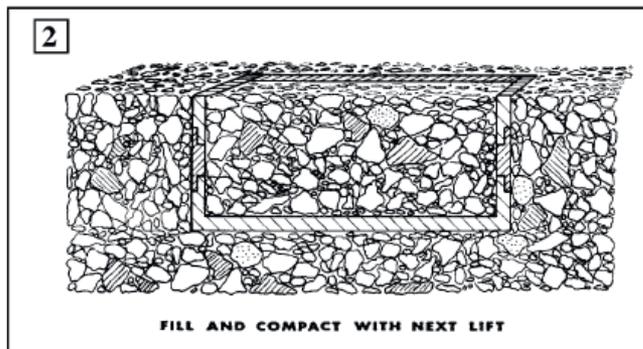
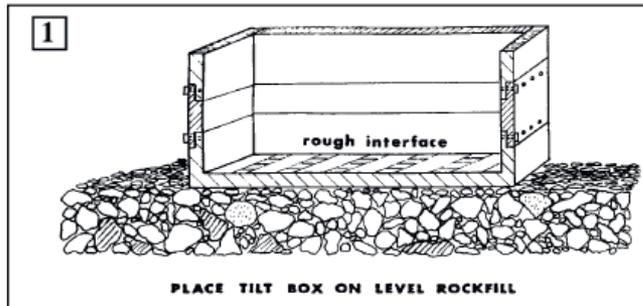


Cortesia Eng. Norbelino Lira

Seção alternativa com enrocamento e núcleo de argila



Propriedades dos materiais



Enrocamento

- Permeabilidade elevada;
- Resistência mecânica elevada;

Núcleo:

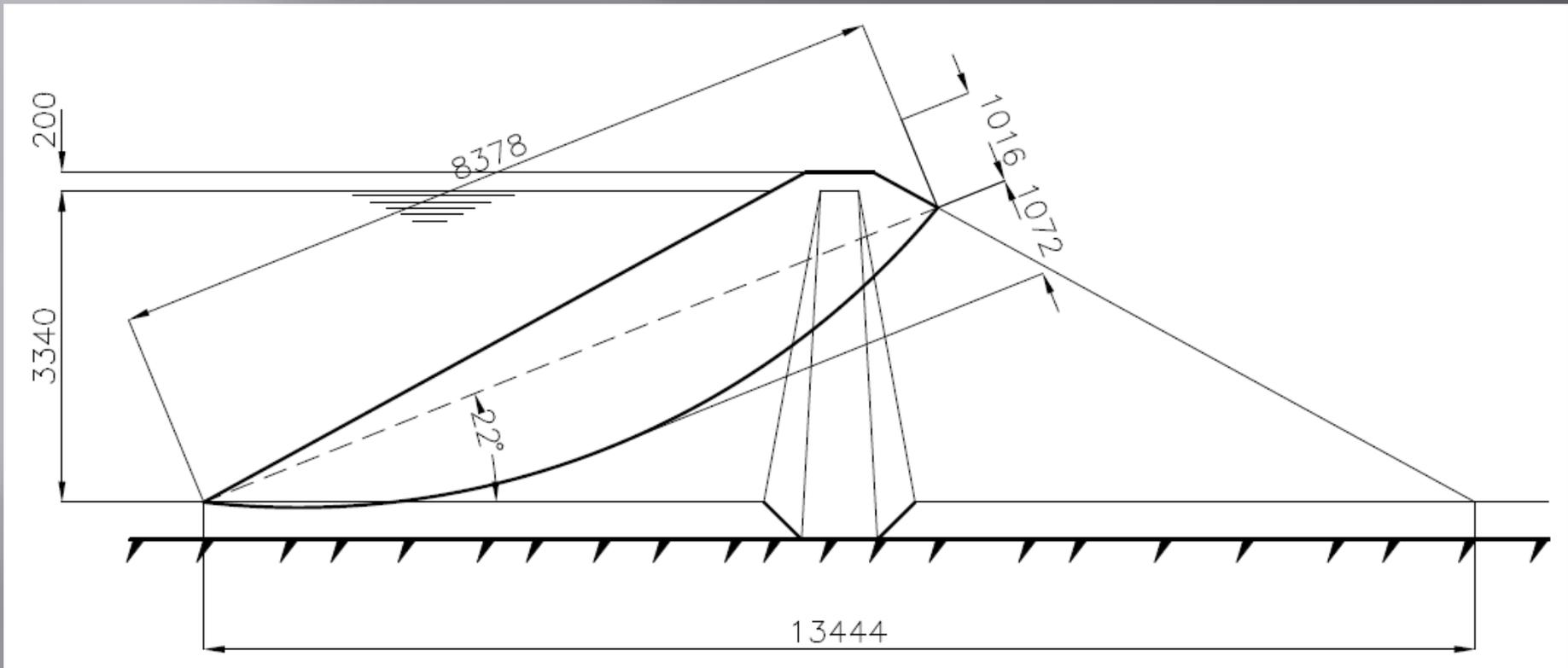
- Permeabilidade baixa;
- Deformabilidade maior que o enrocamento / transição;

Além disso, considerar:

- Transição:
 - Filtros;

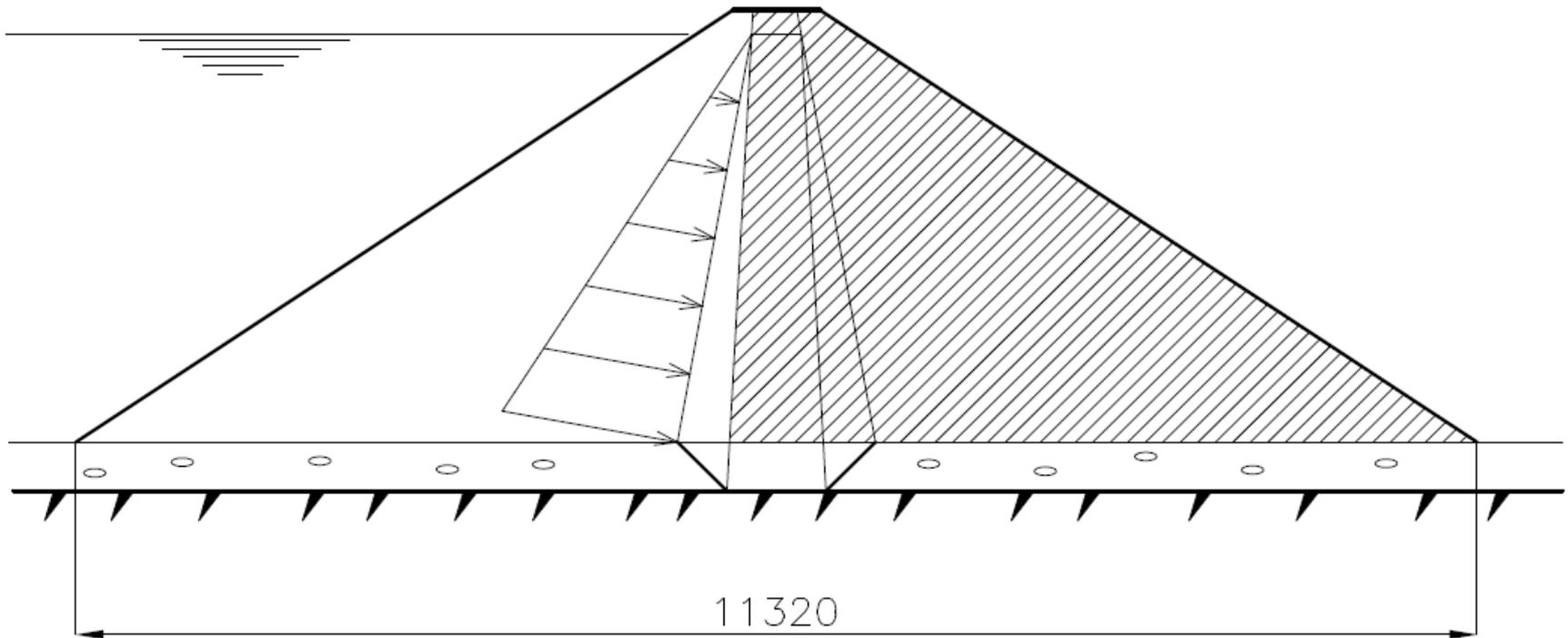
Solo e ou rocha de fundação;

Segurança do talude de montante



- Por exemplo, a superfície indicada ($\gamma=19 \text{ kN/m}^3 : P_{\text{sub}} \sim 9,2 \text{ MN}$);
- Adotando $\Phi_{\text{méd}}=37^\circ$ ($\tan\Phi=0,75$), o FS da superfície de ruptura indicada = 1,61; deve-se pesquisar a de menor FS;
- Devido à elevada permeabilidade do enrocamento, o esvaziamento rápido não deverá ser um problema;

Segurança contra deslizamento

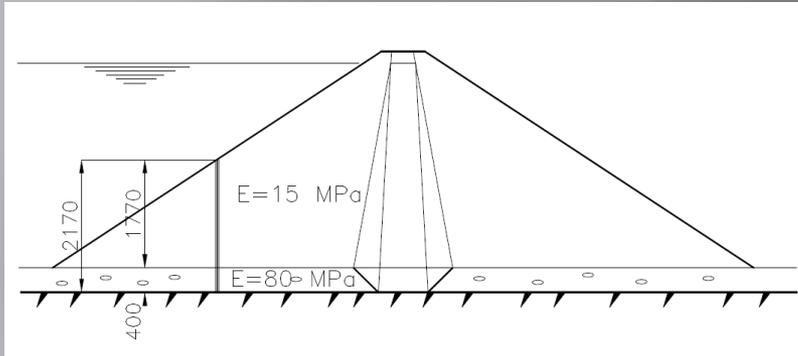


- Por exemplo, a tensão de cisalhamento média na base, com $E_w \sim 5,6 \text{ MN}$, seria de $\sim 0,1 \text{ MPa}$ enquanto a tensão normal média seria de $\sim 0,34 \text{ MPa}$;
- Adotando $\Phi_{\text{méd}} = 37^\circ$ ($\tan \Phi = 0,75$), o FS a deslizamento seria = 2,55;

Efeito de silo

- ▣ Uma porção do peso do núcleo pode ser transferido por cisalhamento para o enrocamento;
- ▣ Isso ocorrerá se o núcleo for mais deformável que a região de transição;
- ▣ O efeito negativo desse efeito silo seria a redução das tensões normais no núcleo e consequente redução da resistência ao cisalhamento;

Deslocamentos



- ▣ Analisando apenas o deslocamento vertical médio da superfície do talude de montante;
 - ▣ Após a construção
 - ▣ $\rho \sim 19 \cdot 21,7^2 / (2 \cdot 15000) = 0,3 \text{ m}$;
- ▣ No projeto devem ser avaliados os deslocamentos horizontais e verticais dos taludes e do núcleo para comparar com valores admissíveis e tomar medidas de execução e de manutenção;

- ▣ Quanto aos recalques, usualmente divide-se em:
 - ▣ Recalques durante a execução;
 - ▣ Recalques por consolidação após a execução do maciço;
- ▣ Fatores afetando os deslocamentos (hor. e vert.):
 - ▣ Nível do reservatório;
 - ▣ Módulo de deformação do maciço;
 - ▣ Módulo de deformação da fundação;
- ▣ Estimativas (ao lado) dos deslocamentos verticais, com fórmulas simplificadas, admitindo:
 - ▣ $E_{\text{enrocamento, montante}} = 15 \text{ MPa}$;
 - ▣ $E_{\text{núcleo}} = 100 \text{ MPa}$;
 - ▣ $E_{\text{filtro de transição}} = 150 \text{ MPa}$;
 - ▣ $E_{\text{solo de fundação}} = 80 \text{ MPa}$;

Incidentes em barragens

Levantamento estatístico feito em 1961 (Espanha) sobre o comportamento de 1620 barragens em operação – cerca de 308 ou 19% sofreram incidentes

- ▣ 40% relacionados com problemas de fundação
- ▣ 23% devido a vertedouros inadequados
- ▣ 12% devido a defeitos construtivos

ICOLD (International Committee on Large Dams) – levantamento, 1973

236 acidentes envolvendo barragens de vários tipos, com 163 referentes a barragens de terra.

As causas dos acidentes foram atribuídas a:

- ▣ Falhas de projeto – 32%
- ▣ Investigações hidrológicas e geológicas – geotécnicas inadequadas – 30%
- ▣ deficiências construtivas – 17%

Acidentes catastróficos

Fort Peck (fins do séc XIX) – aterro hidráulico 70m de altura- taludes 1:5

- Apoiada sobre espessa camada de aluvião (40m), com predominância de areia
- Ruptura (1938) – talude de montante, de areia fofa e saturada, se liquefez ficando com uma inclinação final de 1:20

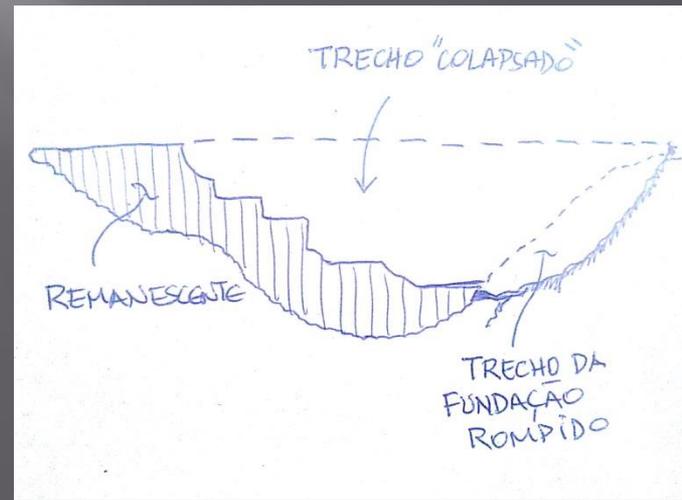
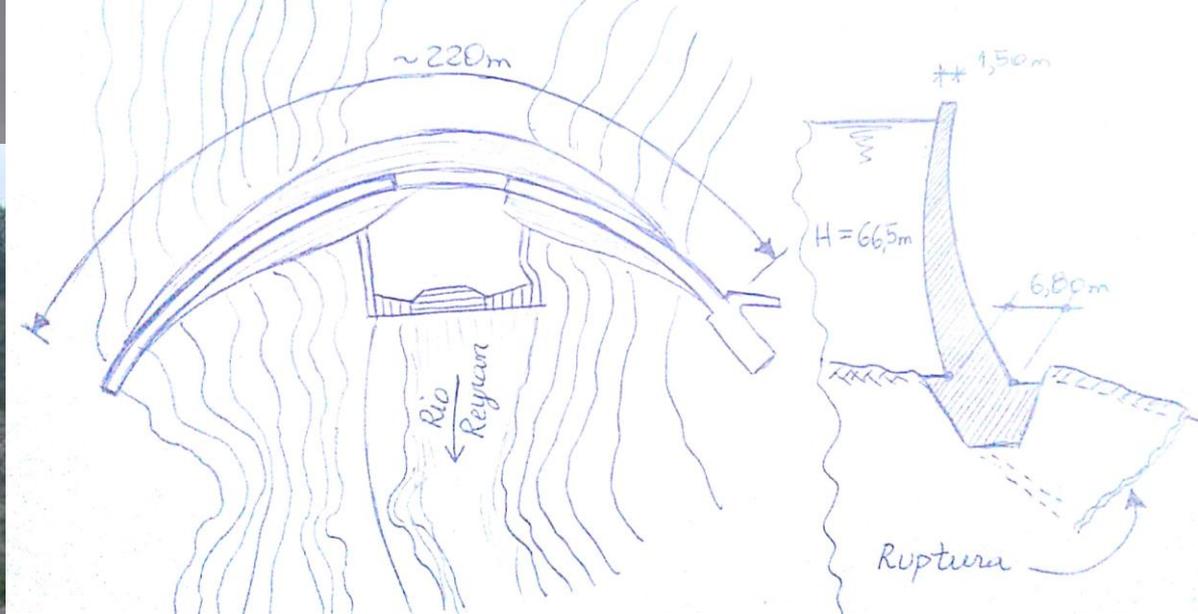
Consequências:

- introdução do conceito de índice de vazios crítico
- os aterros hidráulicos caíram em desuso

Acidentes catastróficos

- Barragem de Malpasset – França – arco de dupla curvatura, com 60m de altura
- Ruptura ocorreu em 1959 por cisalhamento na rocha, segundo um plano preferencial, provavelmente uma junta extensa, ao longo da ombreira esquerda
- A rocha era um gnaisse com fissuramento fino

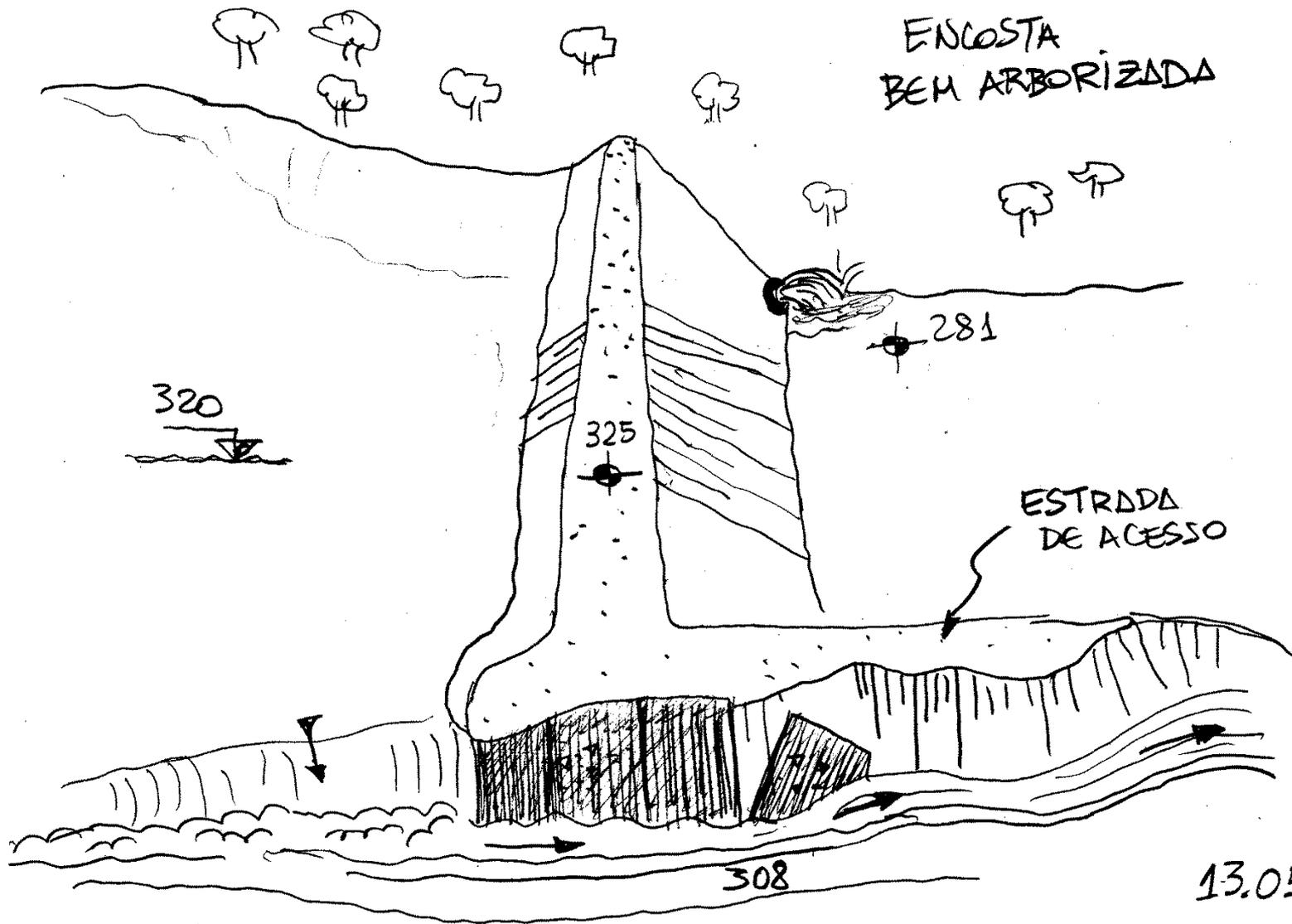
Consequência - maior integração entre as equipes
– criação da Geologia de Engenharia



Acidentes recentes



ENCOSTA
BEM ARBORIZADA



13.05.09

Foco principal: barragens de terra

- ▣ Materiais (investigações de campo)
- ▣ Compactação
- ▣ Resistência
- ▣ Deformabilidade
- ▣ Permeabilidade

Material(is)

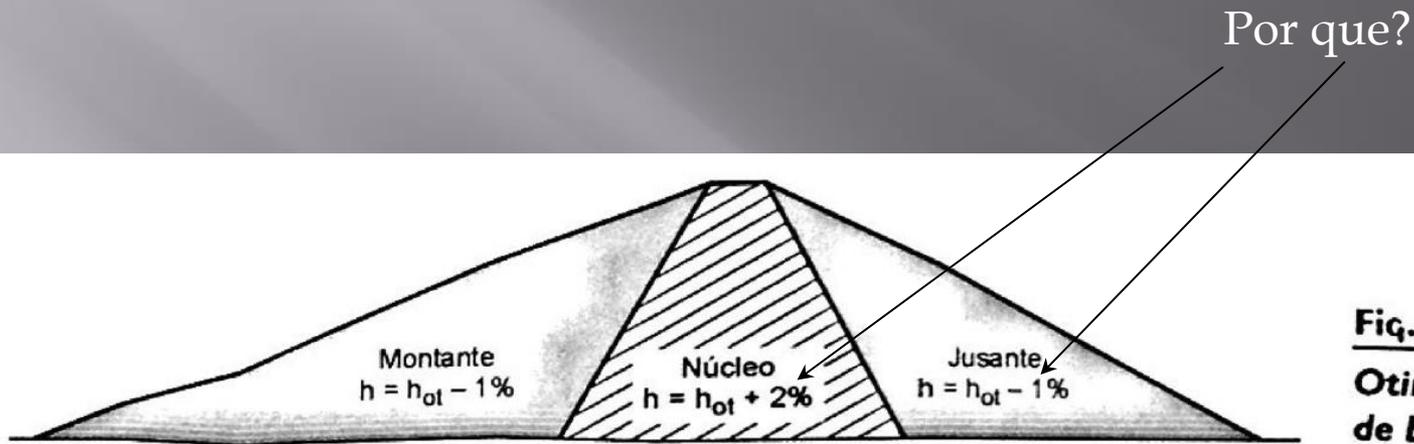


Fig. 6.10
Otimização de seção
de barragem

[Atenção! Faltam filtros-drenos!]

Compactação (revisão)

Qual a diferença na estrutura de duas amostras do mesmo solo, ambas compactadas com a mesma energia e atingindo o mesmo grau de compactação, porém uma no ramo seco da curva de compactação e a outra no ramo úmido?

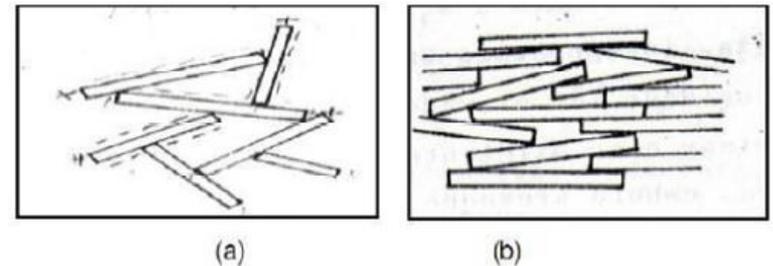
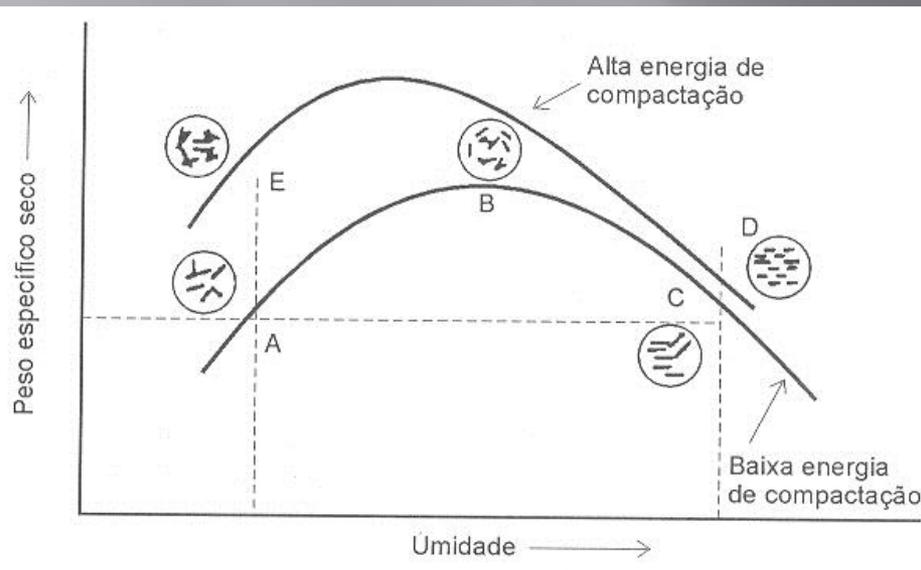


Figura 2.7 – Estrutura dos solos compactados. (a) estrutura floculada e (b) estrutura dispersa (PINTO, 2002).

Ramo seco: estrutura floculada; orientação aleatória das partículas; vazios maiores; menor caminho de fluxo; maior permeabilidade

Ramo úmido: estrutura dispersa; arranjo paralelo das partículas; vazios menores; fluxo mais tortuoso; menor permeabilidade

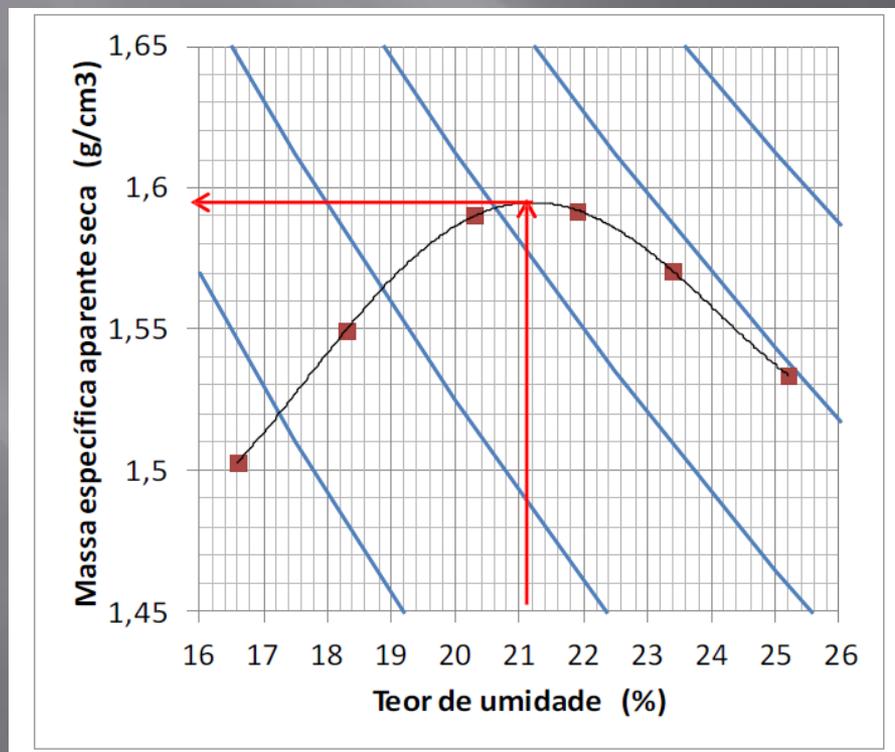
Exercício de compactação (revisão)

- 1) Com uma amostra de argila silto-arenosa de uma encosta, solo esse que será usado para a construção de um aterro compactado, foi realizado, em laboratório, um Ensaio Normal de Compactação (Proctor Normal), sem secagem e sem reuso do material (conforme a Norma), obtendo-se os resultados da tabela abaixo. Sabendo-se que esse solo não apresentou nenhuma fração retida na peneira nº 4 (4,8 mm), determine a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima.

Corpo de prova	Umidade (%)	Massa específica (g/cm ³)	
1	16,6	1,752	
2	18,3	1,833	
3	20,3	1,913	
4	21,9	1,940	
5	23,4	1,938	
6	25,2	1,920	

1) Determinação da umidade ótima e da densidade aparente seca máxima.

Corpo-de-prova	Teor de umidade (%)	Massa específica (g/cm^3)	Massa específica seca (g/cm^3)
1	16,6	1,752	1,503
2	18,3	1,833	1,549
3	20,3	1,913	1,590
4	21,9	1,940	1,591
5	23,4	1,938	1,571
6	25,2	1,920	1,534



Especificação de compactação

- Grau de compactação

$$GC = \gamma_{s \text{ campo}} / \gamma_{s \text{ max laboratório}}$$

Geralmente exige-se um valor numa determinada faixa (entre 95% e 105% , por exemplo)

- Desvio de umidade

$$\Delta W = W_{\text{campo}} - W_{\text{ótima}}$$

Geralmente estipula-se uma variação máxima (Δw entre -2% e +1% , por exemplo)

Exercício de compactação (revisão)

A especificação de compactação da construção do aterro exige **grau de compactação mínimo de 97% e umidade entre $w_{OT}-1,5\%$ e $w_{OT}+1\%$** . Amostras coletadas de uma camada compactada no aterro revelaram, em média, massa específica de $1,89 \text{ g/cm}^3$ e umidade de 22%. A camada compactada pode ser aceita? Justifique. Se não puder, qual a providência a ser tomada?

$$GC = \rho_d / \rho_{dmax}$$

Portanto: $\rho_d \geq 1,547 \text{ g/cm}^3$ e $19,6\% \leq w \leq 22,1\%$

No aterro: $\rho = 1,89 \text{ g/cm}^3$, $w = 22\%$ e $\rho_d = 1,549 \text{ g/cm}^3$ A camada compactada pode ser aceita. Se GC estivesse abaixo do especificado, com umidade quase no limite superior, passadas adicionais do rolo compactador provavelmente não surtiriam efeito, podendo até prejudicar a qualidade do solo compactado (levando a estrutura mais dispersa e eventualmente a um comportamento “borrachudo”).





Resistência de solos compactados

Como varia a resistência de um solo em função da umidade e do grau de compactação?

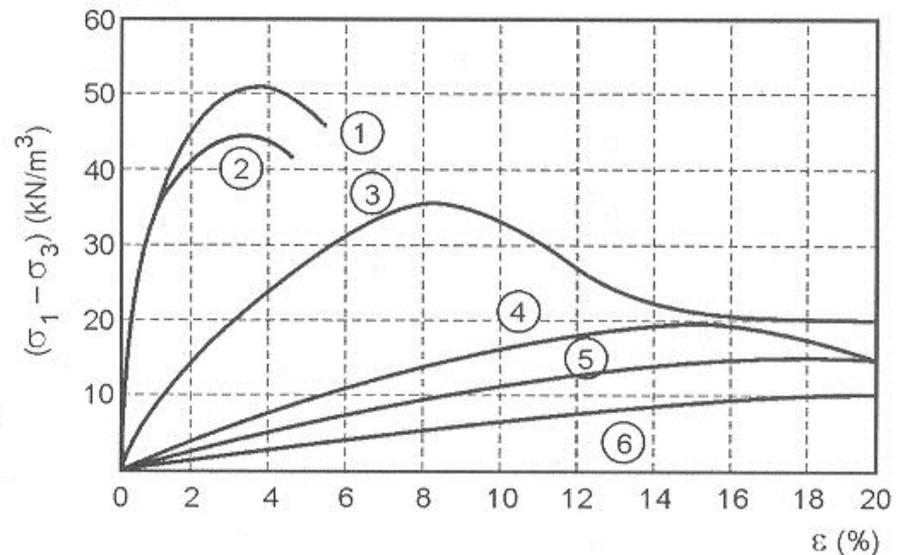
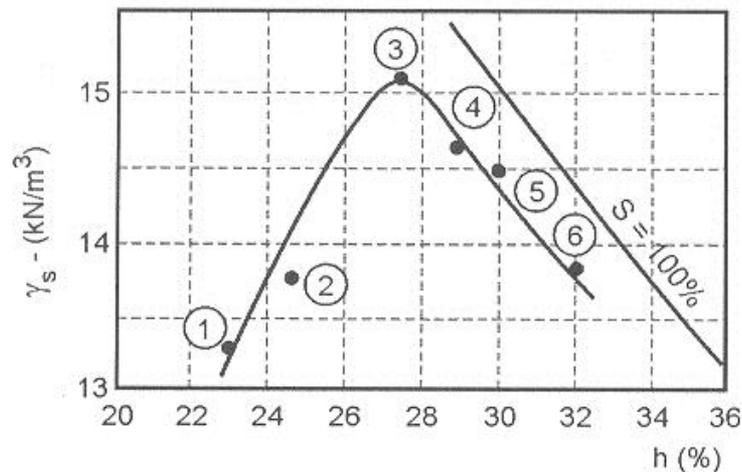
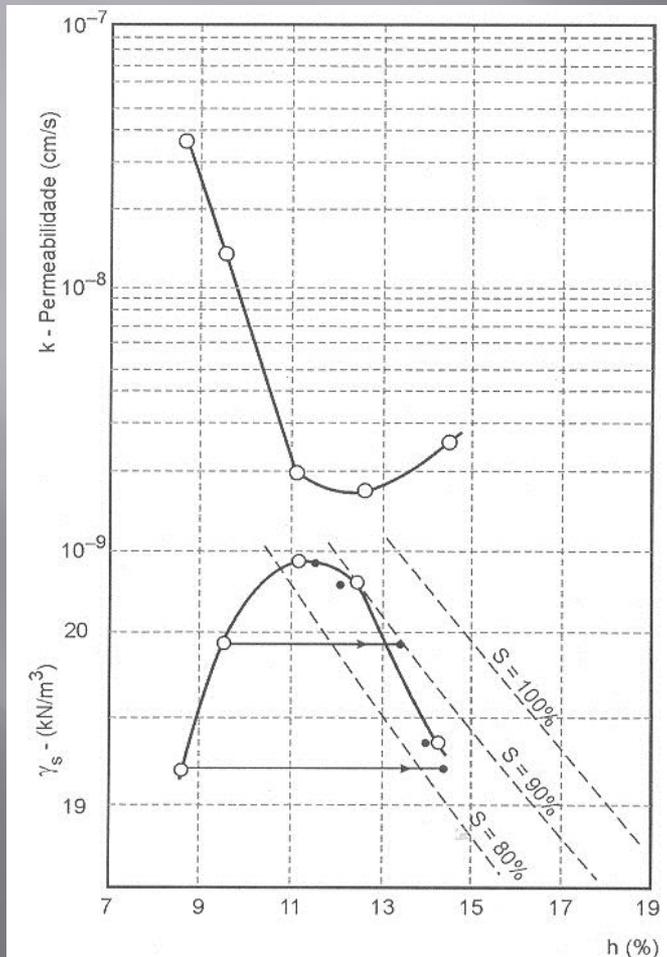


FIGURA 6.9

Como varia a permeabilidade de um solo com a umidade e com o grau de compactação?

significativa diminuição do coeficiente de permeabilidade em função do aumento teor de umidade de compactação no ramo seco até o teor de umidade ótimo. Para umidades mais elevadas, há pouca alteração em relação ao coeficiente de permeabilidade observado no ponto ótimo.

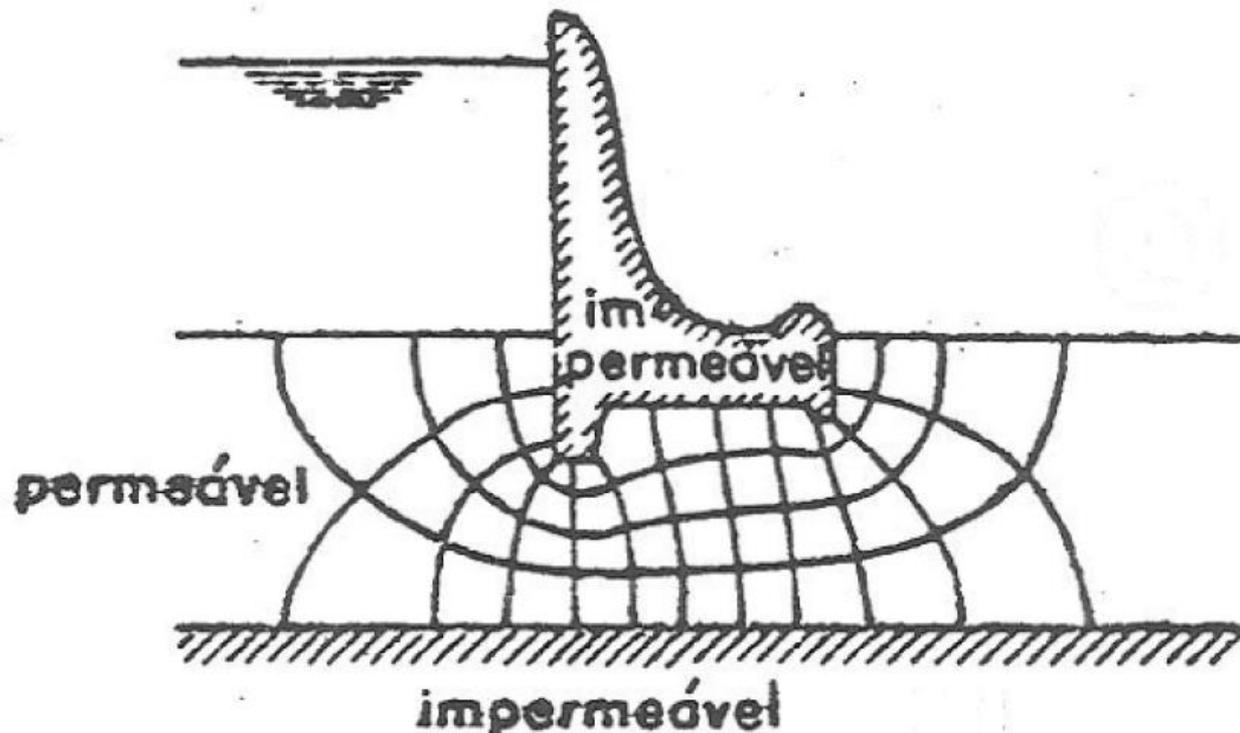


Permeabilidade de solos compactados

Exercício de fluxo (revisão)

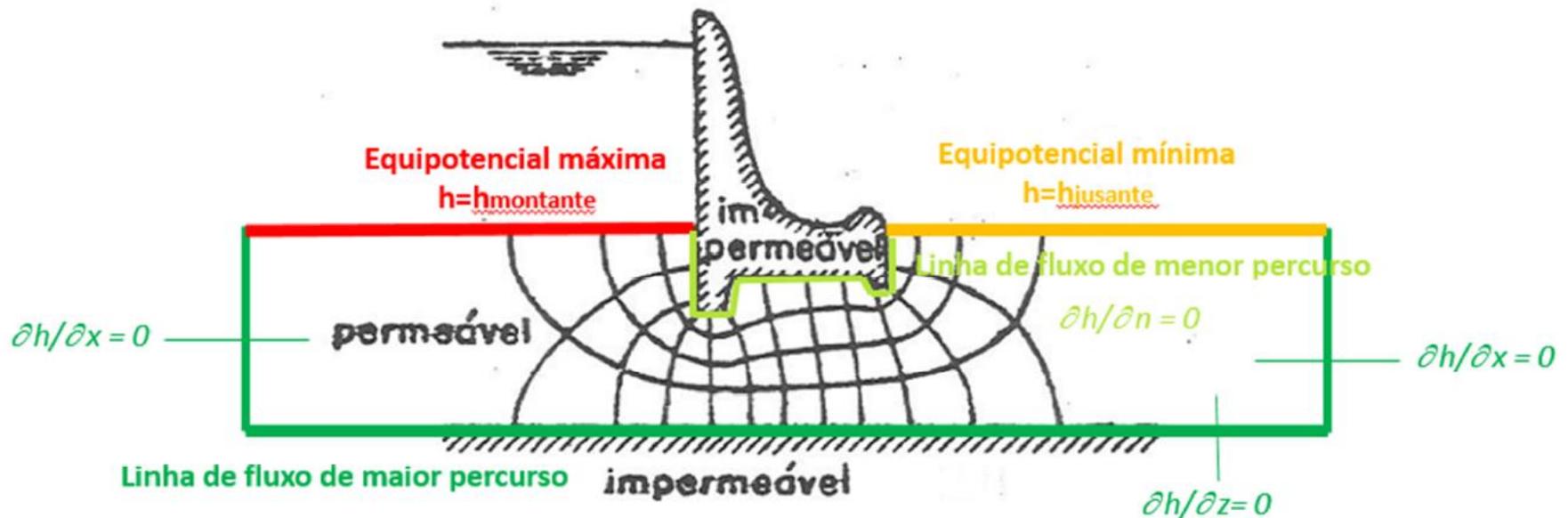
Para a situação 2D da Figura 1, identifique e escreva as expressões das condições de contorno (**todo** o contorno). Relembrando:

- condições de contorno **essenciais**: carga conhecida ($h = h^*$) no ponto da fronteira
- condições de contorno **naturais**: vazão (proporcional à derivada de carga, pela lei de Darcy) conhecida no ponto da fronteira ($\partial h / \partial n = q^*$)



- ✓ condições de contorno **essenciais** são aquelas nas quais o valor da função é conhecido ($h = h^*$; por exemplo, $h = h_{\text{mont}}$, $h = h_{\text{jus}}$, ou ainda $h = h_e =$ carga altimétrica)
- ✓ condições de contorno **naturais** são aquelas cuja derivada de sua função é conhecida ($\partial h / \partial n = q^*$; frequentemente, mas não sempre, $q^* = 0$ e, portanto, trata-se de fronteira impermeável)

Figura - 1



Exercício de fluxo

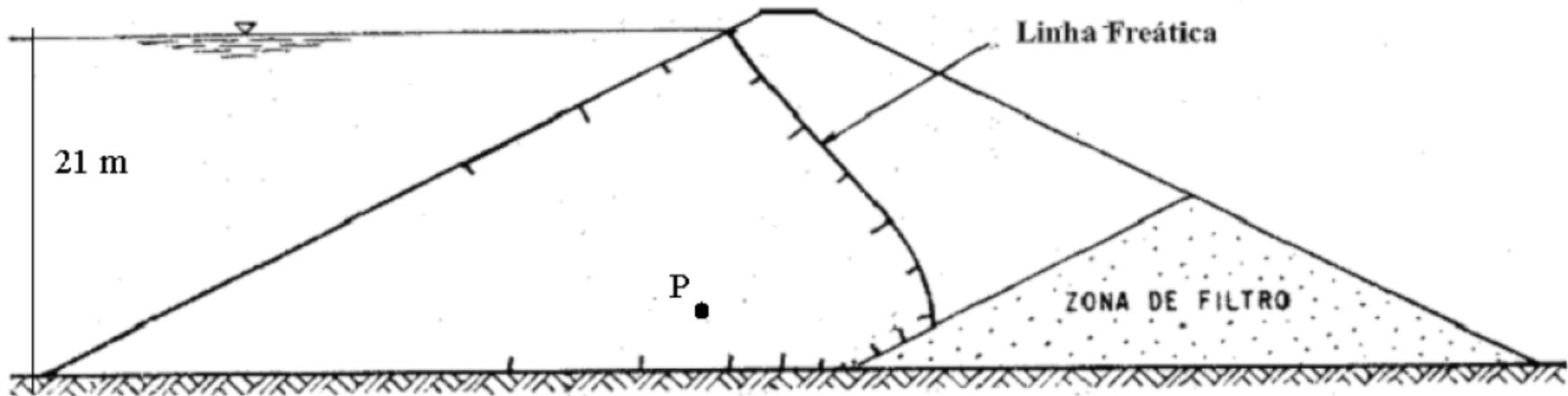
Identifique e escreva as expressões das condições de contorno (**todo** o contorno, com atenção especial à **linha freática**) da seção transversal da barragem da Figura 2.

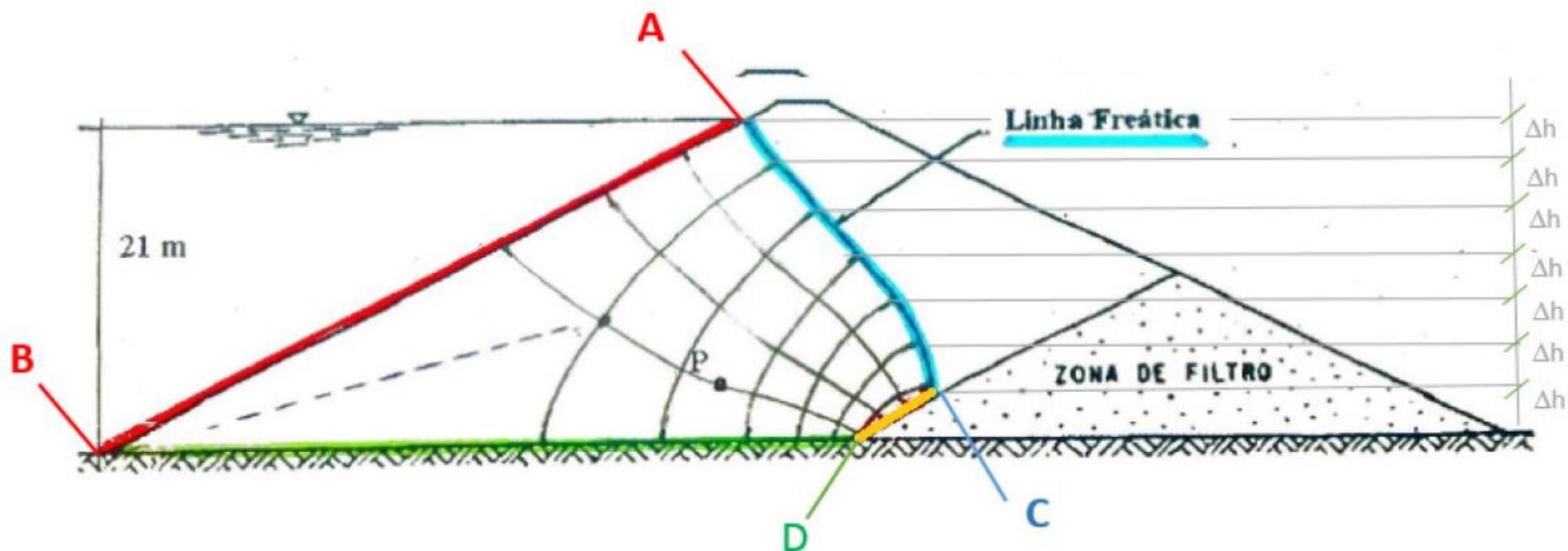
Observe que, para facilitar, a **linha freática** já está indicada bem como os pontos onde devem começar as linhas de fluxo e equipotenciais da rede de fluxo. Qual a propriedade especial dos pontos indicados sobre a freática? Justifique.

Complete a rede de fluxo da barragem.

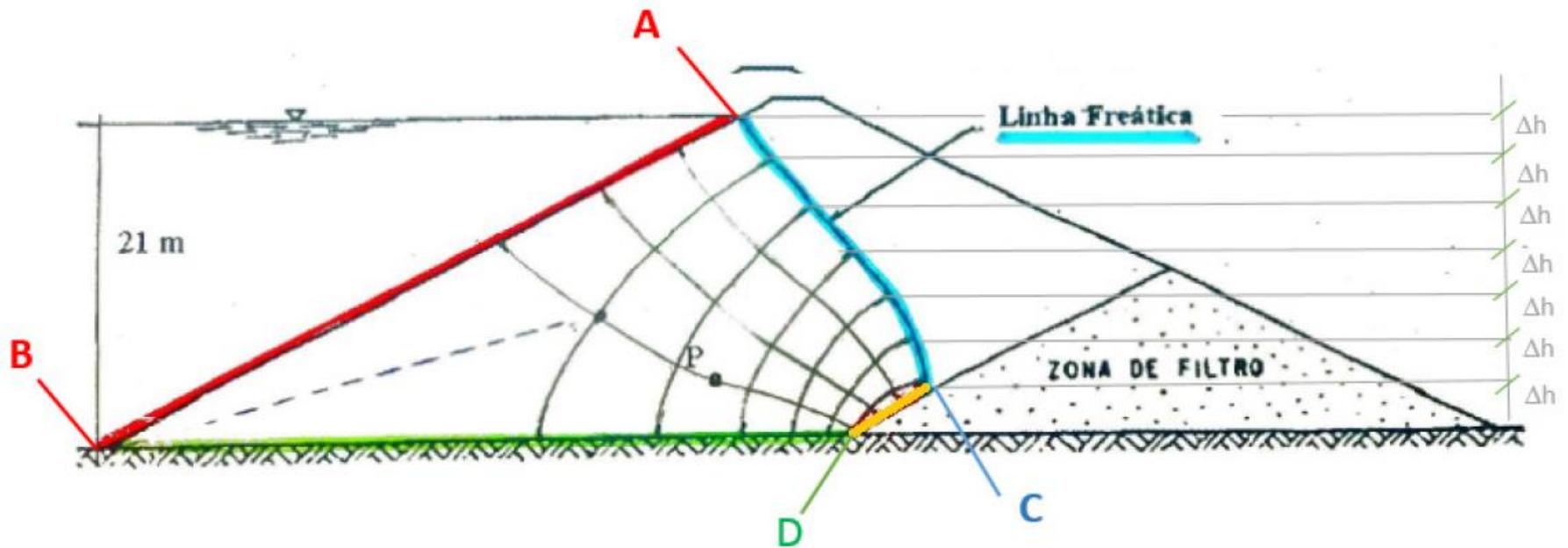
Calcule a pressão neutra e o gradiente hidráulico no ponto P.

Supondo que a condutividade hidráulica seja $k = 10^{-4}$ cm/s, calcule a vazão.



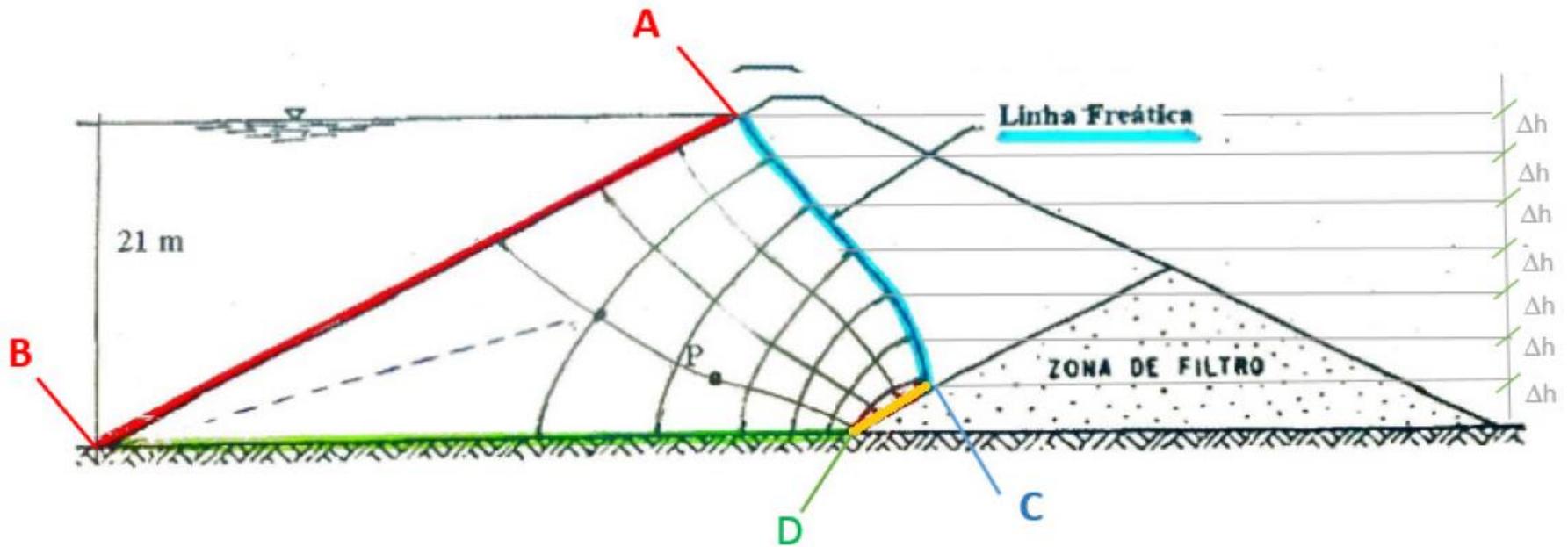


AB	Equipotencial máxima	$h=h_{\text{montante}}$	
AC	Linha freática (também linha de fluxo superior; limite superior do fluxo)	$u=0 \Rightarrow h=h_e$	$\partial h/\partial n = 0$
BD	Linha de fluxo de maior percurso, limite inferior do fluxo	$\partial h/\partial z = 0$	
CD	Linha livre	$u=0 \Rightarrow h=h_e$	



➤ Calcule a pressão neutra e o gradiente hidráulico no ponto P.

- $Z_p \cong 3,5m$ (Da escala da figura, RN na base da barragem)
- $N_q = 7; N_f = 4$
- $\Delta h = \frac{21}{7} = 3$
- $h_p = 21 - 2,5 \times 3 = 13,5$ (O ponto P está entre a segunda e da terceira equipotencial)
- $h = z + \frac{u}{\gamma_w} \rightarrow u = 100 \text{ KN/m}^2$



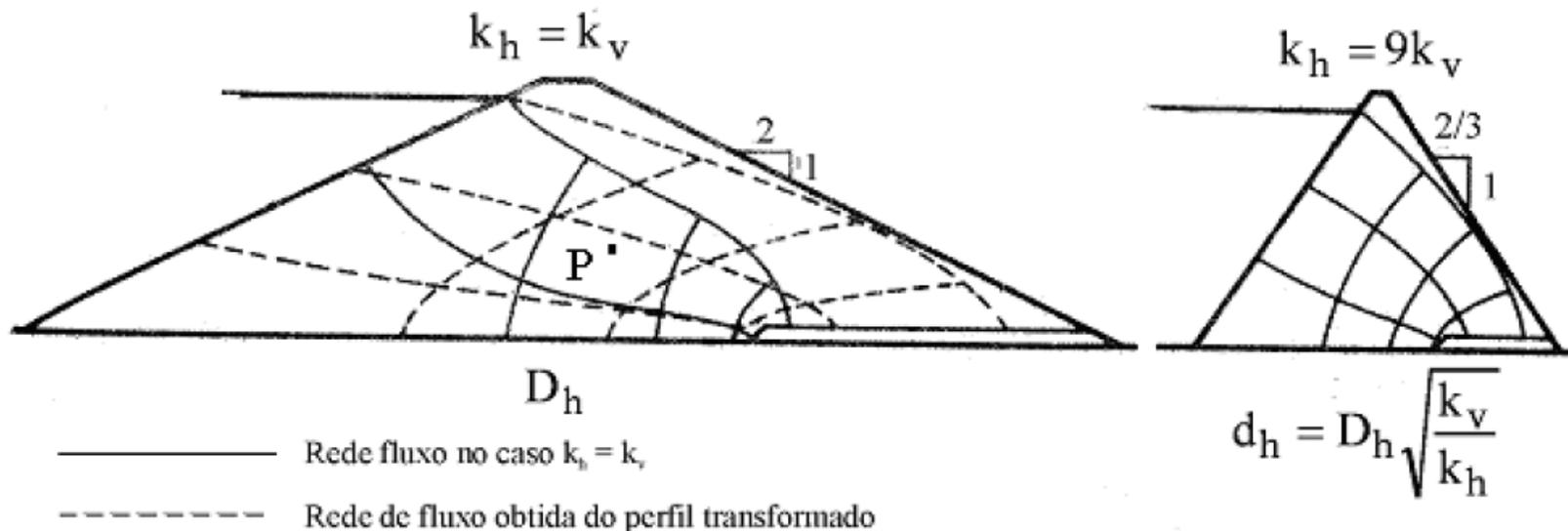
➤ Supondo que a condutividade hidráulica seja $k = 10^{-4}$ cm/s, calcule a vazão.

- $Q = k \times \frac{N_f}{N_q} \times h = 12 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m de barragem} = 43200 \text{ litros/hora/metro de barragem!}$

Exercício: fluxo anisotrópico

Apresenta-se abaixo um perfil de barragem de terra homogênea para duas condições: material isotrópico e material anisotrópico quanto à condutividade hidráulica.

- Justifique, a partir da equação de Laplace, a mudança de escala horizontal adotada para o material anisotrópico, bem como a condutividade hidráulica equivalente.
- Compare as vazões das duas condições.
- Compare as pressões neutras e os gradientes hidráulicos no ponto P.
- Qual das duas condições é mais crítica para a barragem (examine o talude de jusante)?
- Como melhorar a condição de segurança da barragem? Controlar a anisotropia é viável do ponto de vista prático?



Solução

a) Justifique, a partir da equação de Laplace, a mudança de escala horizontal adotada para o material anisotrópico, bem como a condutividade hidráulica equivalente.

Material anisotrópico, geralmente com condutividade hidráulica horizontal maior do que a vertical: $k_x > k_z$

Equação diferencial do fluxo em material anisotrópico: $k_x \times \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \times \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$

a) Pode-se fazer a equação anterior recair na equação de Laplace através de uma

mudança de variável: $X = x \sqrt{\frac{k_z}{k_x}}$

Utilizando a regra da cadeia, na derivação chega-se a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Na nova escala é portanto possível resolver como sempre a equação de Laplace, por exemplo traçando uma rede de fluxo como se o material fosse isotrópico.

Para a dedução da condutividade hidráulica equivalente, consultar Carlos Pinto (capítulo 7):

$$k_{eq} = \sqrt{k_x k_z}$$

Solução (cont.)

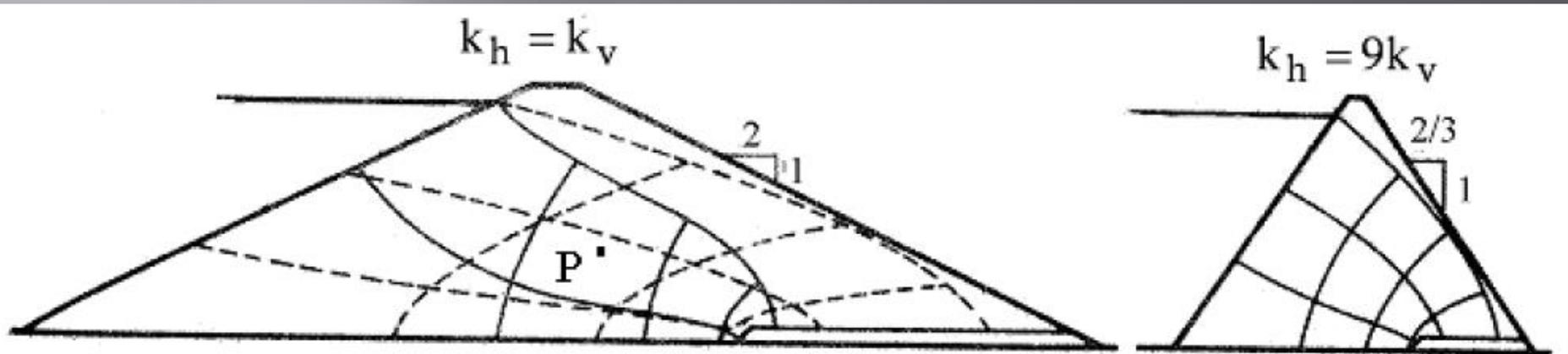
b) Compare as vazões das duas condições.

$$b) Q = k \times h \times N_f / N_q$$

	Isotrópico	Anisotrópico
Canais de fluxo (N_f)	1,3	2,5
Quedas de potencial (N_q)	4	4
Fator de forma (N_f / N_q)	0,325	0,625
Condutores hidráulicas	$k_h = k_v = k$	$k_v = k$ / $k_h = 9 k$
Condutividade hidráulica equivalente	k	$3k$
Vazão	Q	$\sim 5,8 Q$

Solução (cont.)

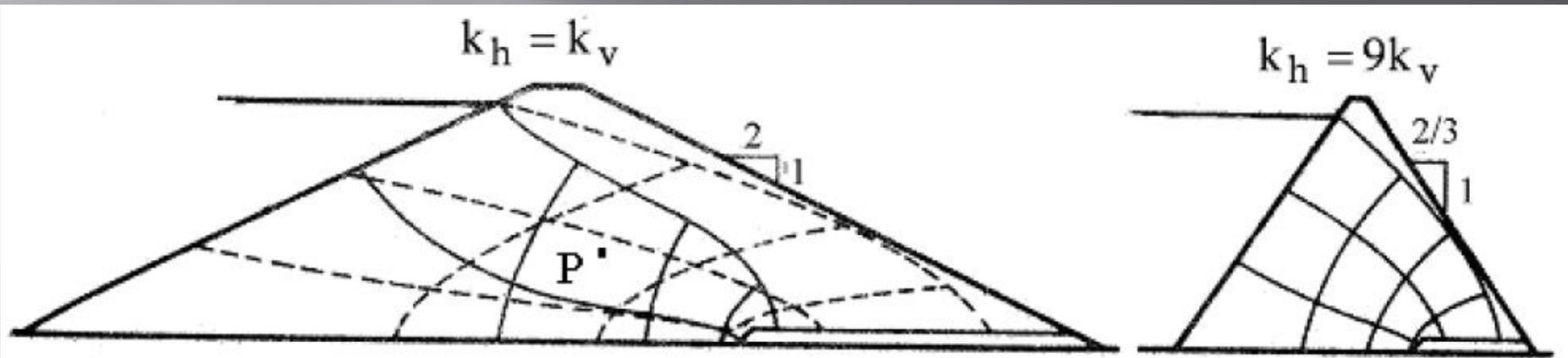
c) Compare as pressões neutras e os gradientes hidráulicos no ponto P.



- c) Pressões: compare a diferença de cota entre o ponto P e o ponto em que a equipotencial que passa por ele encontra a freática (num e noutro caso). Diferença pequena pois os Δh são semelhantes nas duas situações.
Gradientes hidráulicos: como as perdas de carga entre equipotenciais são parecidas, para comparar gradientes basta comparar a distância entre equipotenciais, sempre medida na direção normal às equipotenciais, passando por P. A relação aproximada é de 2 : 1,5 (isotrópico : anisotrópico), portanto o gradiente em P é cerca de 33% maior no caso anisotrópico.

Solução (cont.)

- d) Qual das duas condições é mais crítica para a barragem (examine o talude de jusante)?



- d) Mais importante do que os gradientes hidráulicos poderem ser maiores em alguns pontos, no caso anisotrópico a linha freática está muito mais próxima do talude de jusante, o que caracteriza um risco sério de a água encontrar uma saída no talude de jusante, provocando carreamento de material da barragem, erosão tubular regressiva (“piping”) e possível ruptura da barragem.

Solução (cont.)

e) Como melhorar a condição de segurança da barragem? Controlar a anisotropia é viável do ponto de vista prático?

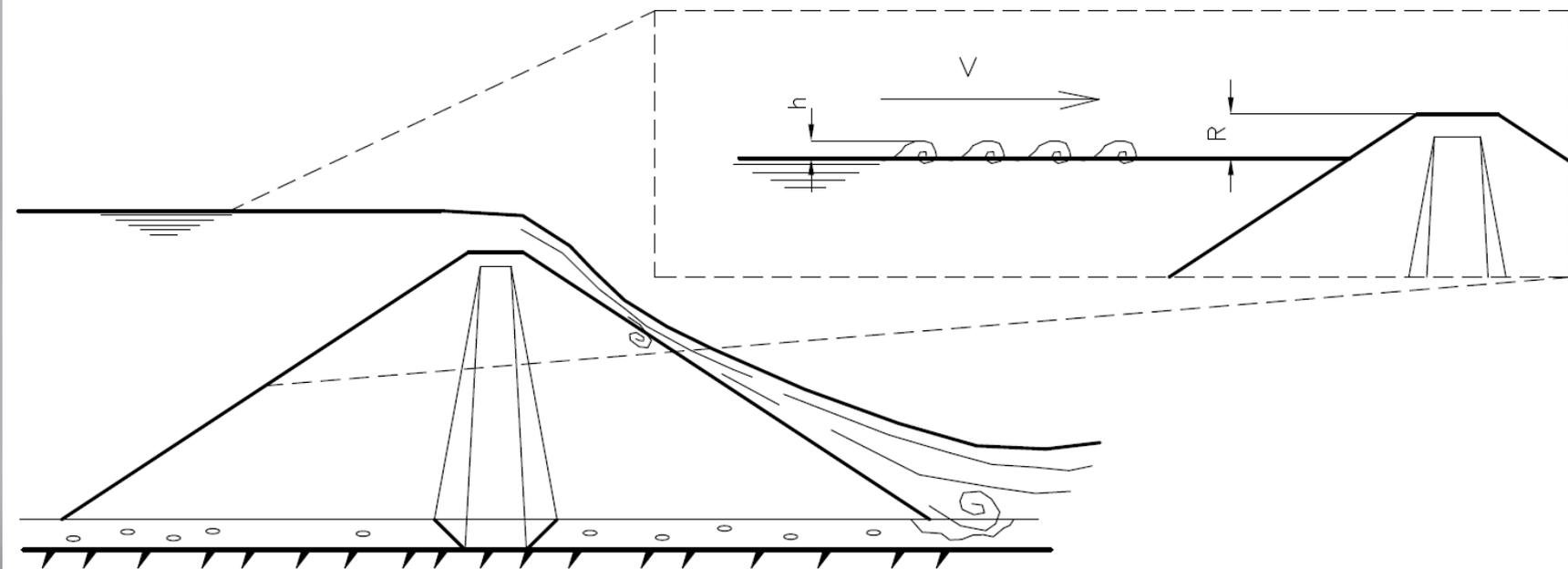
e) A anisotropia decorre da compactação. Não há como evitá-la ou controlá-la. A maneira eficiente de controlar riscos associados à percolação é introduzir filtros-drenos (verticais ou sub-verticais) na zona central da barragem, além dos filtros-drenos horizontais indicados nos desenhos do exercício. Há muito tempo não se fazem barragens de terra sem um filtro-dreno vertical ou sub-vertical que praticamente elimine qualquer possibilidade de o fluxo atingir o talude de jusante.

PRINCÍPIOS PARA PROJETO DE BARRAGENS DE TERRA

Garantia de segurança quanto a:

- Transbordamento
- Piping
- Areia movediça
- Ruptura de taludes artificiais de montante e jusante
- Ruptura de taludes naturais das ombreiras adjacentes ao reservatório
- Efeito das ondas, formadas pela ação dos ventos nas superfícies dos reservatórios, que se quebram nos taludes de montantes, podendo provocar sulcos de erosão
- Efeito erosivo das águas das chuvas

Transbordamento



▣ Fórmula clássica (*):

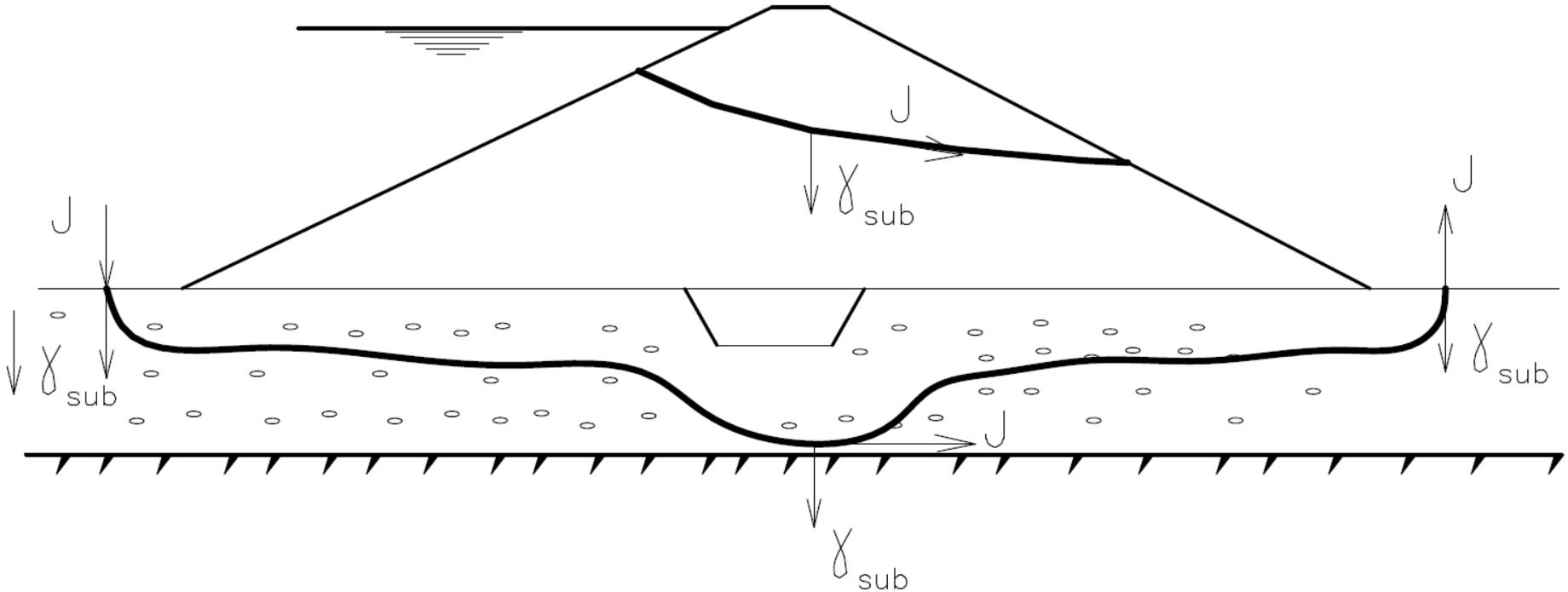
■ $R = 0,75h + (v^2/2g)$

▣ h = altura das ondas (m);

▣ v = velocidade das ondas (m/s) produzidas pelo vento;

▣ (*) dependente de parâmetros específicos;

“Piping” e areia movediça



- Se as forças de percolação se tornam excessivas, pode ocorrer arraste das partículas finas do solo nos pontos onde a água emergir no maciço ou na fundação;
- É como se fosse formando um tubo (pipe, em inglês) de jusante para montante, dentro do maciço ou na fundação);

SOLUÇÕES

