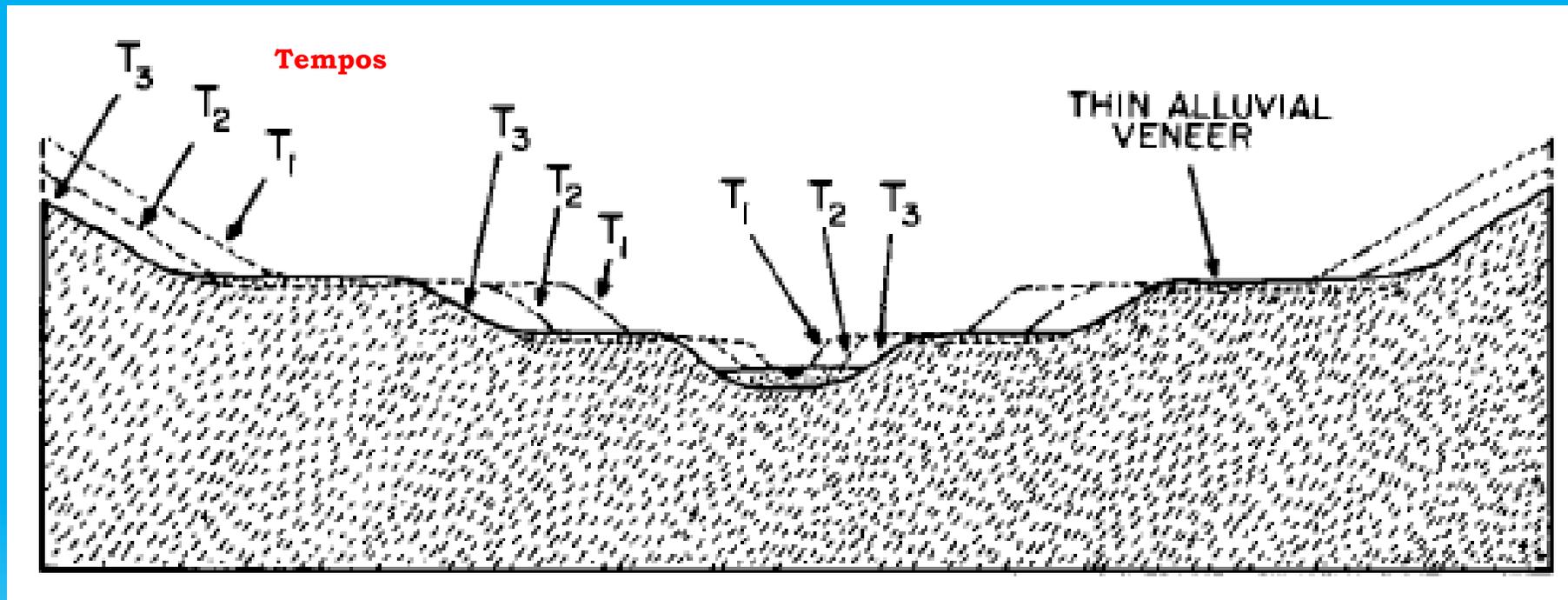


Tratamento de Fundações

Fernando A. M. Marinho

2019

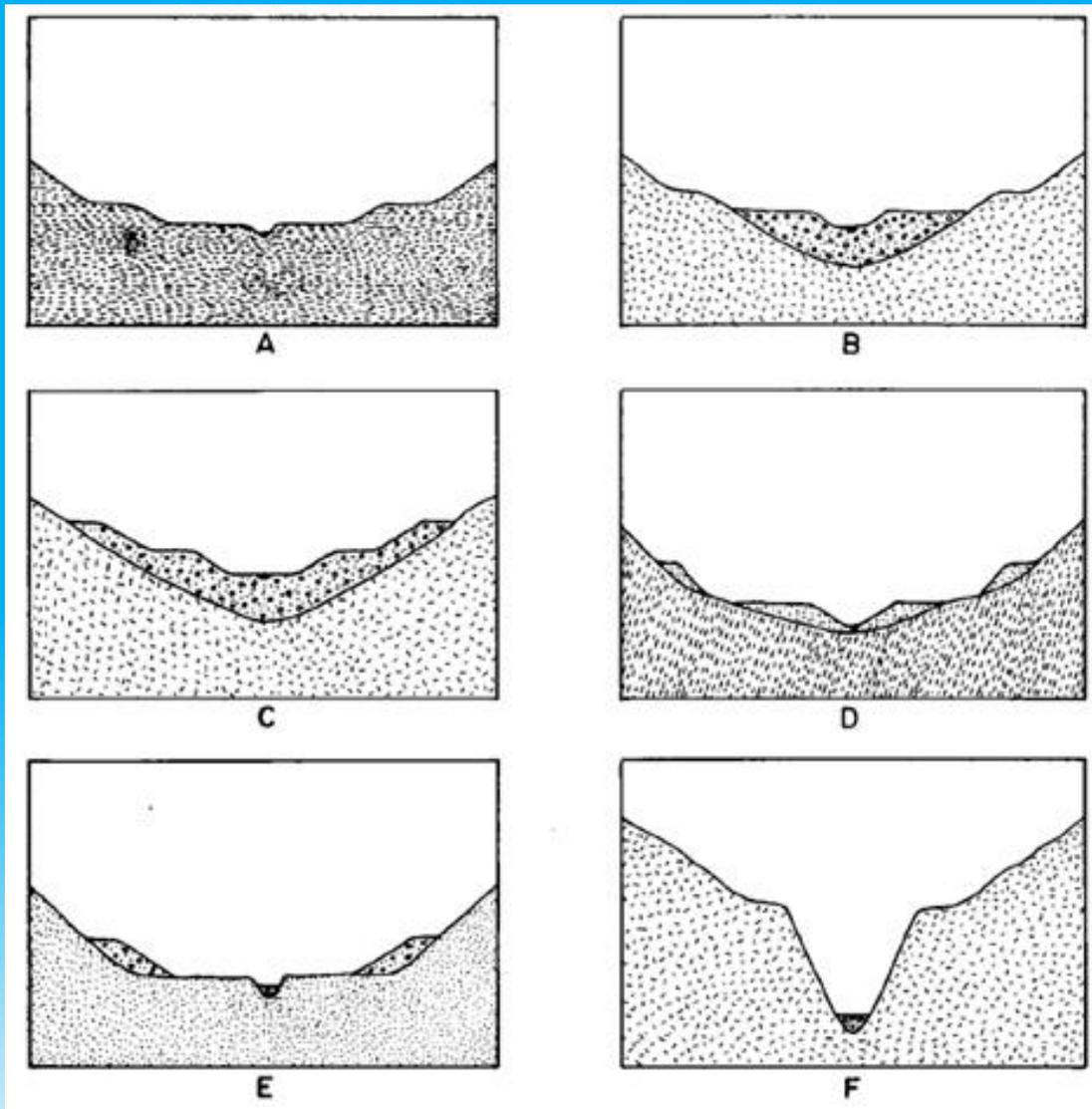
Ampliação dos terraços por erosão



Wahlstrom (1974)

Variedades de vales com Terraços

Terraços em leito rochoso,
praticamente sem aluvião



Terraços apenas em aluvião.

Terraços de aluvião remanescente
nas laterais do vale.

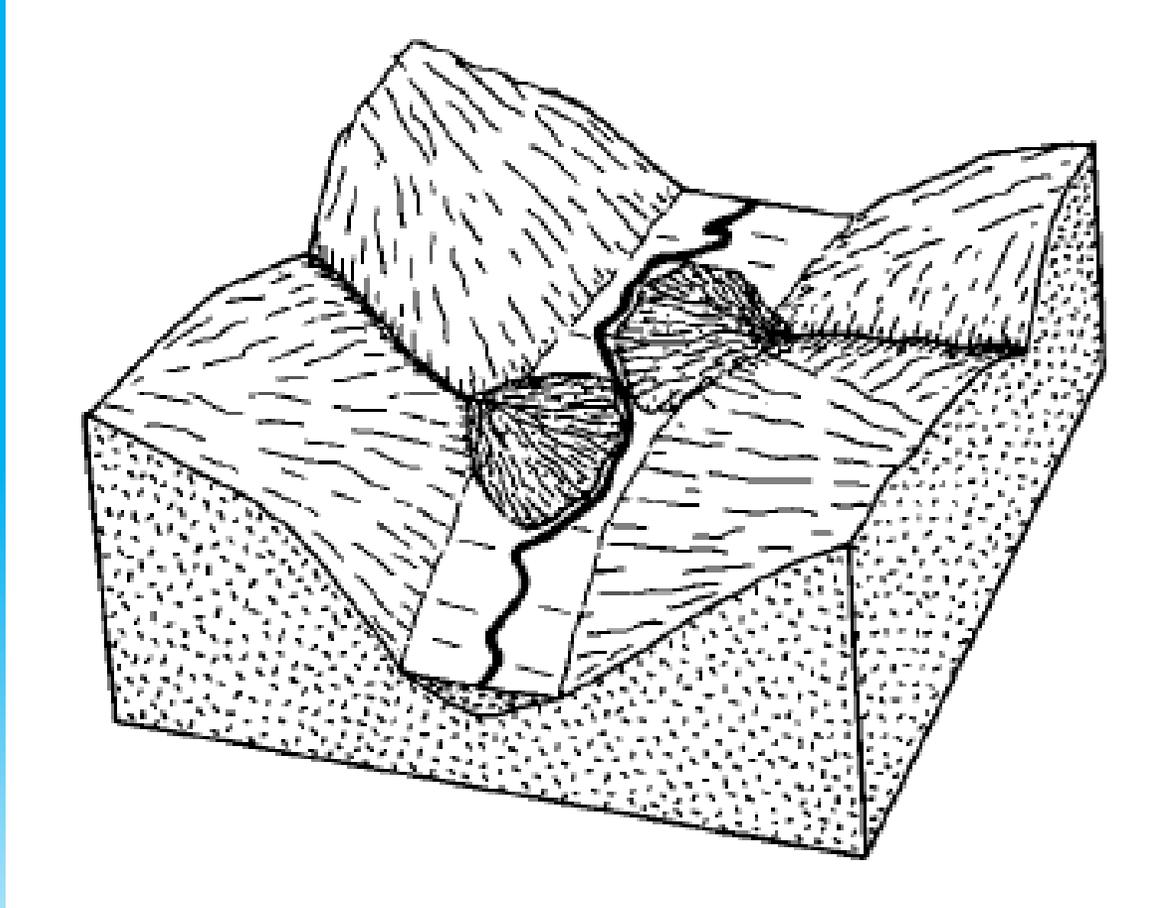
Terraços em leito rochoso
com aluvião.

Terraços em aluvião, que foi
erodido expondo o leito
rochoso.

Terraços de rocha em vale
fechado.

Variedades de vales

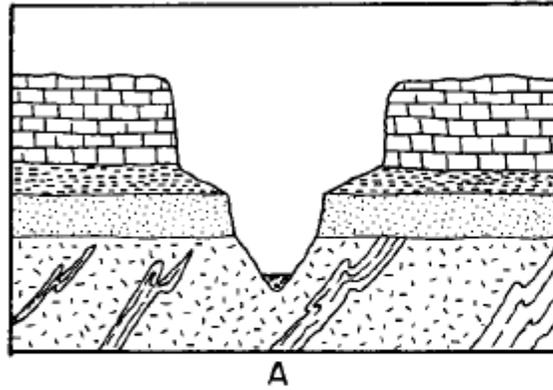
Várzea aluvial encravada em parte por leques aluviais formados por riachos tributários



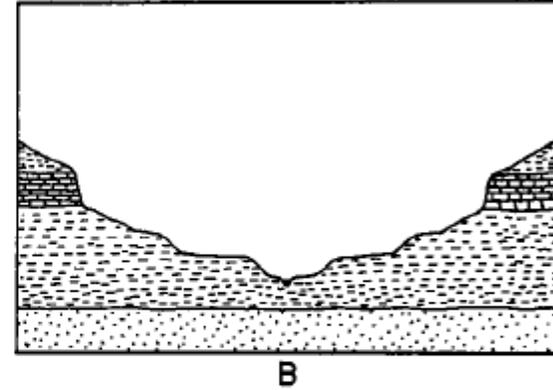
Wahlstrom (1974)

Variedades de vales

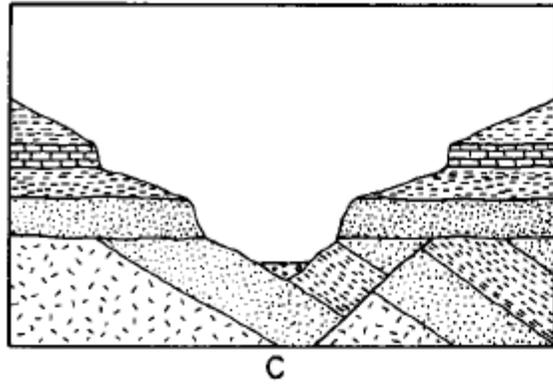
O córrego penetrou a rochas ígneas e metamórficas cristalinas abaixo de uma falha.



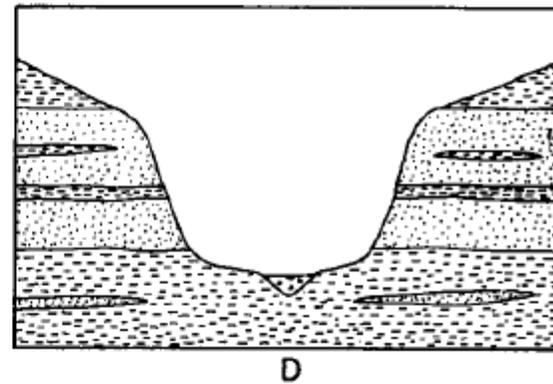
Uma camada de calcário formando encostas íngremes e um amplo vale em terraços desenvolvidos em rochas frágeis.



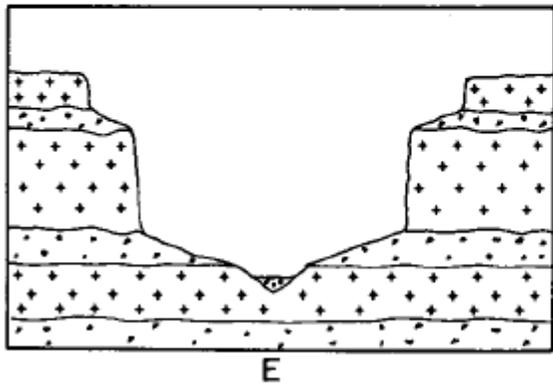
O fluxo de água (córrego) cortou uma falha angular e se aprofundou lateralmente erodindo uma camada de xisto.



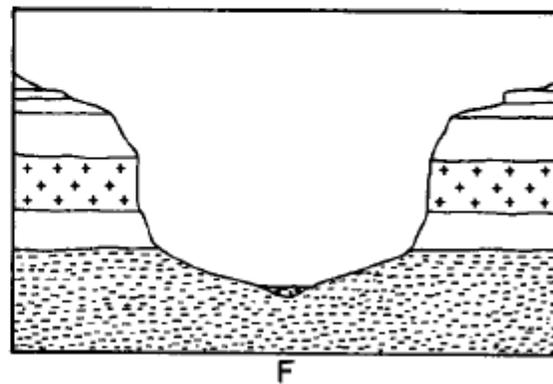
Vale em U (glacial) em camada horizontal de xisto e arenito



Encostas íngremes desenvolvidas por fluxos de lava e encostas mais planas em depósitos piroclásticos (resultado de erupções vulcânicas).

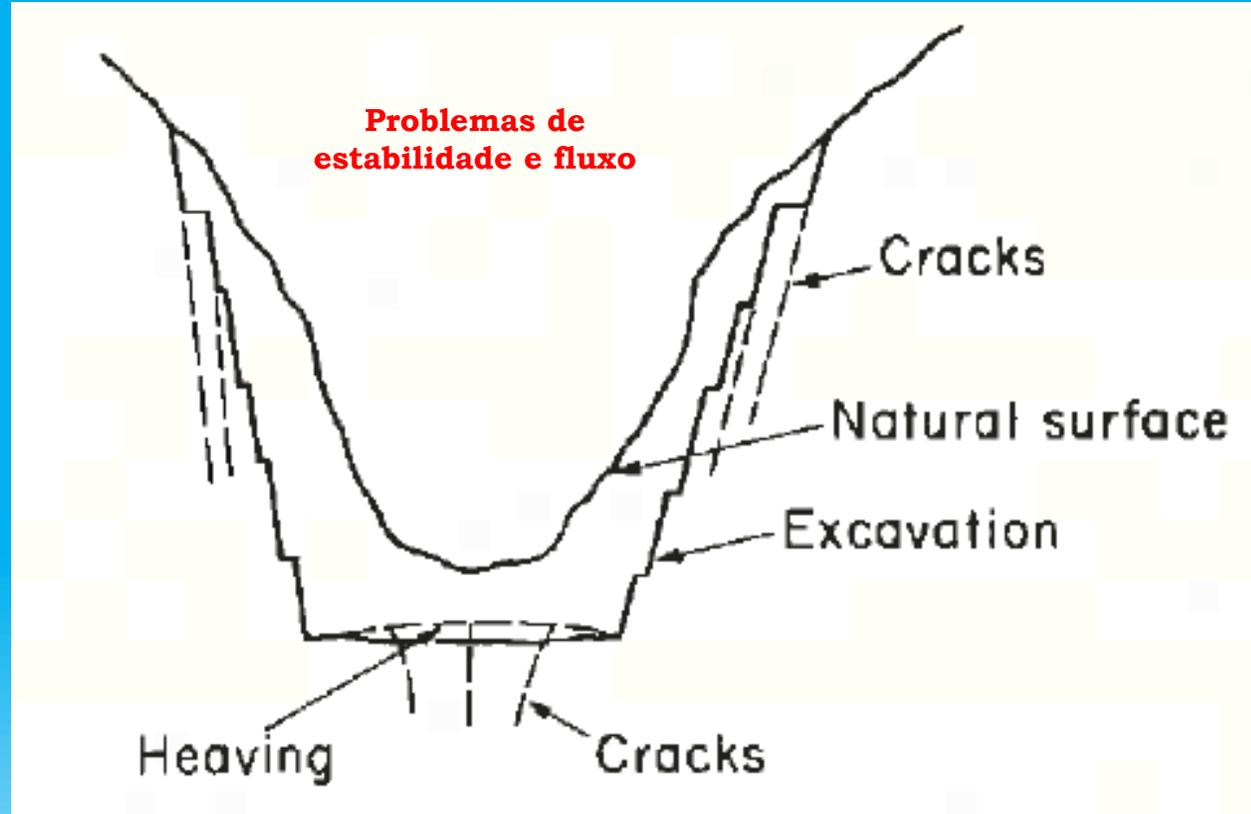


Taludes verticais desenvolvidos em uma soleira ígnea se intrometeu ao longo de um plano de cama sedimentar



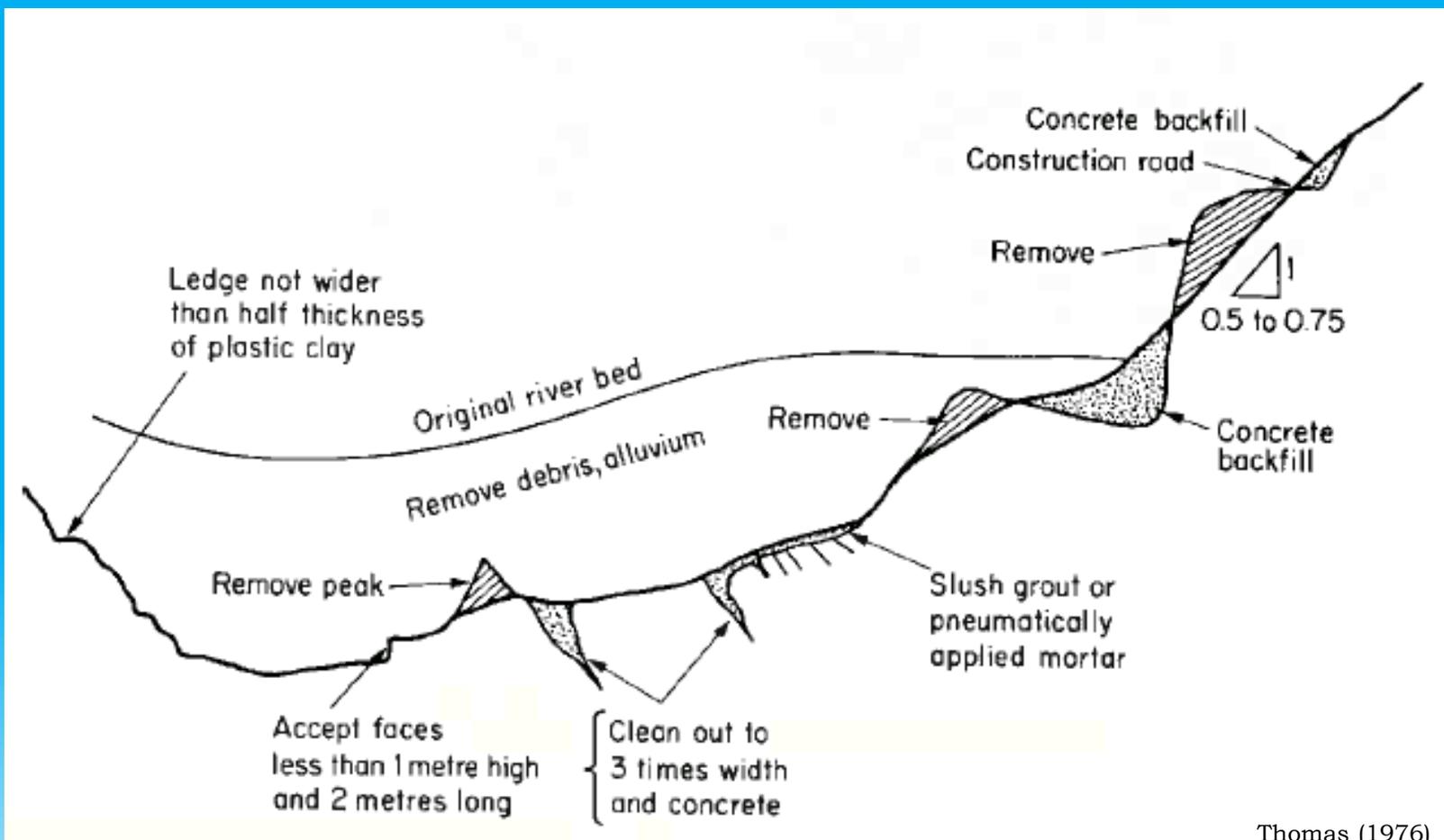
Possíveis Efeitos da Escavação

Efeitos causados por tensões tectônicas



Thomas (1976)

Preparação da Fundação Abaixo do Núcleo



Recomenda-se inclinações menores que 4V:3H, sob o núcleo e sistema de drenagem.

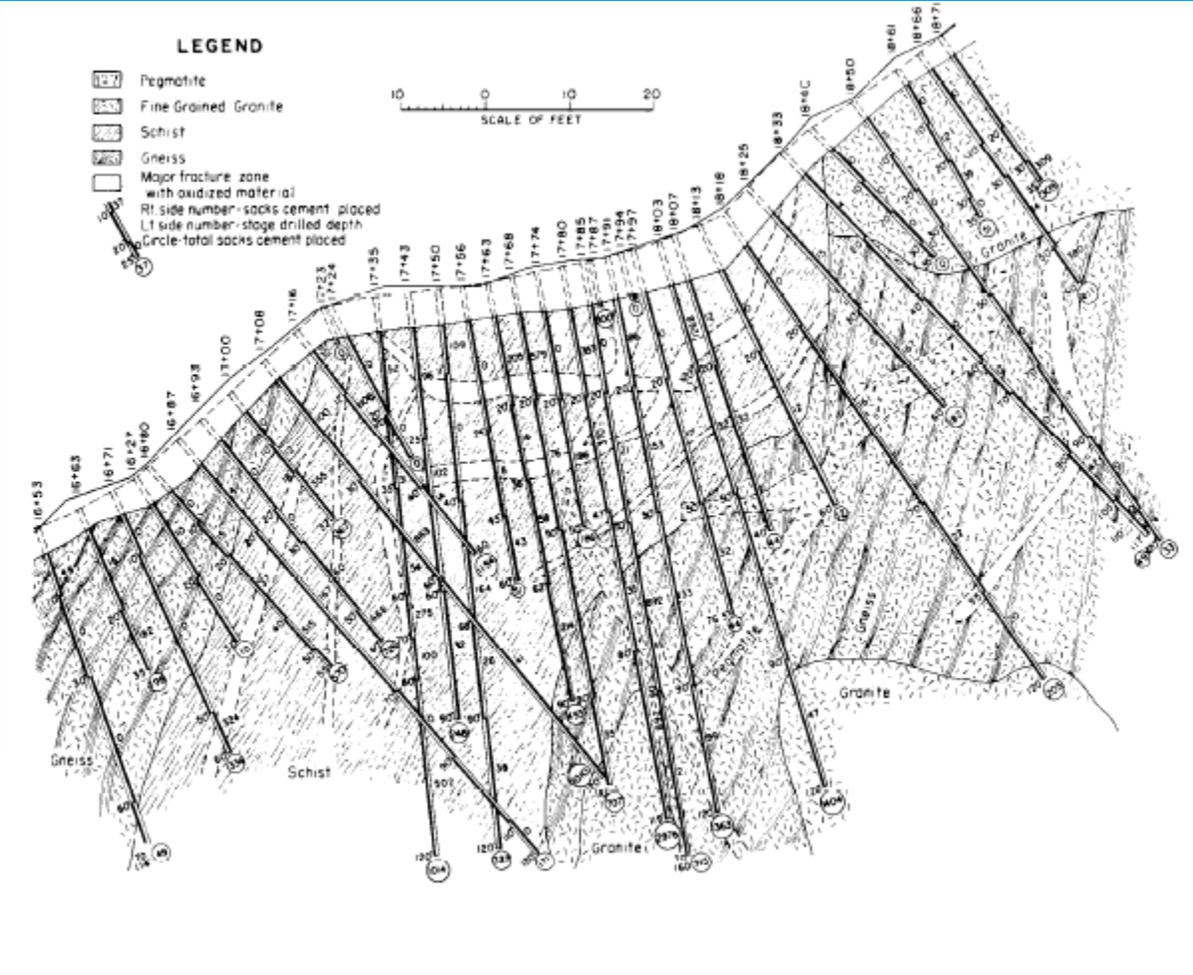
Saliências, horizontais ou inclinadas para baixo, em direção das ombreiras, não devem ter largura de mais de metade da espessura da camada de solo plástico (núcleo)

Os taludes da fundação, sob o núcleo, devem convergir preferencialmente para o rio a jusante ou serem normais ao eixo da barragem

Após a limpeza, toda a área da fundação sob a zona impermeável da barragem deverá ser coberta com uma camada de material semelhante, mas um pouco mais plástico que o material do núcleo, com um teor de umidade de compactação aproximadamente 5% acima do limite de plasticidade.

Cortina de injeção

Ombreira da barragem Granby (Colorado)



USBR (1987)

Alguns Aspectos Sobre as Fundações

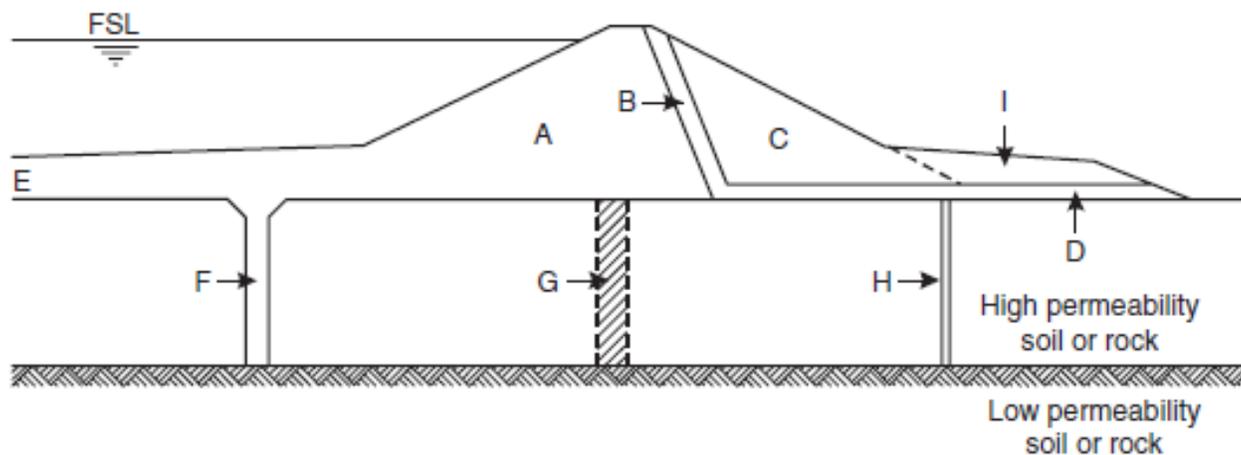
Os principais aspectos a serem avaliados nas fundações estão relacionados com:

resistência, permeabilidade e compressibilidade.

O tipo de aterro a ser utilizado depende da análise adequada destas características do solo de fundação.

- Uma fundação com solo de resistência relativamente baixa, pode limitar a estabilidade do aterro impondo taludes mais brandos e com drenos verticais.
- Uma fundação com solo permeável será suscetível a vazões elevadas e até erosão interna na fundação. Isto exige a execução de cut-off ou drenos.
- Uma fundação em rocha de baixa permeabilidade é adequada para qualquer tipo de construção de barragens.
- Em regiões sujeitas a terremotos, a presença de solos arenosos, de areia saturada podem estar sujeitas a liquefação. Isto pode exigir a remoção ou densificação do solo arenoso.
- Barragens em fundações de calcário cársticas são um caso especial, onde injeções devem ser executadas. Estas condições exigem que se possa atuar mesmo depois da execução do aterro. Isso pode favorecer projetos de enrocamento com face de concreto ou enrocamento com núcleo inclinado para montante.
- Em algumas rochas sedimentares, particularmente argilitos ou similares podem existir planos com baixos ângulos de atrito efetivos (Hutchinson, 1988, Casinader, 1982). Nestes casos, taludes abatidos são necessários. Isto favorece um projeto com drenos verticais e horizontais, ou enrocamento com núcleo argiloso

Aspectos de Projeto para Controlar percolação e Erosão Pela Barragem ou Fundação

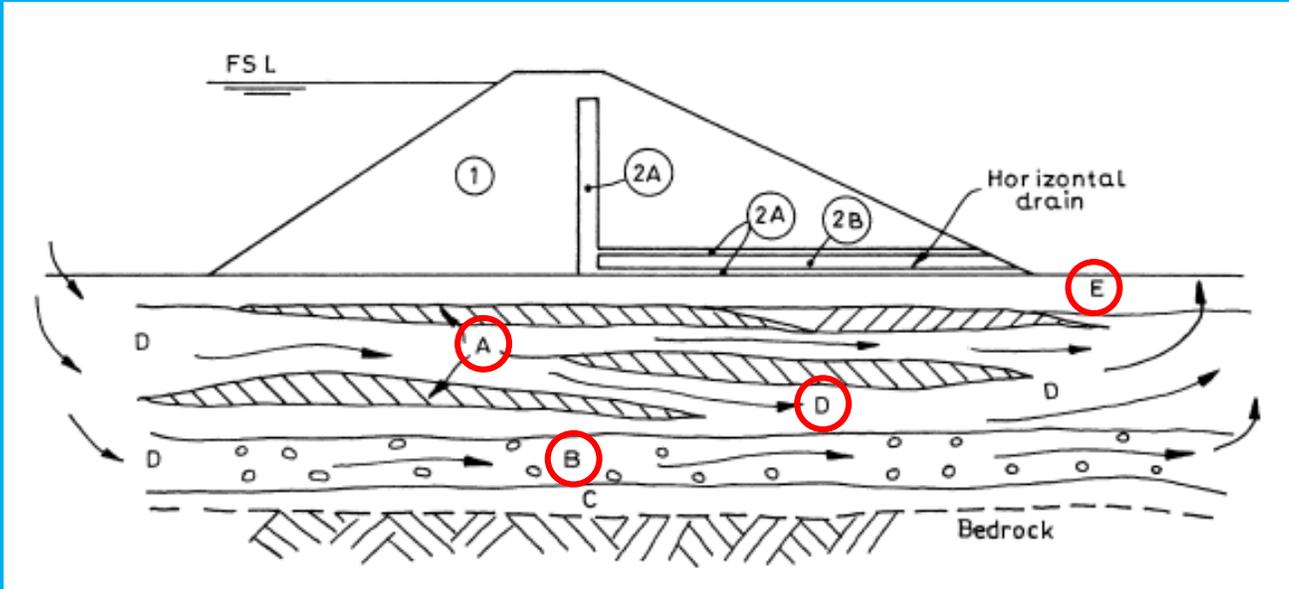


Fell et al. (2005)

Nem todos esses recursos são necessários ao mesmo tempo

- A. “núcleo” de baixa permeabilidade, para limitar a infiltração através da barragem;
- B. Dreno do filtro “chaminé”, que intercepta a infiltração pela barragem e controla a erosão interna do núcleo e as poros pressões na barragem, se a zona a jusante C for de baixa permeabilidade;
- C. Zona a jusante, que mantém a estabilidade e pode, se permeável em comparação com o núcleo e filtro, controlar as poro pressões;
- D. Dreno e filtro horizontal que controla os gradientes de saída, evita erosão da fundação e pressões de poro (porém pode aumentar a vazão por conta do aumento dos gradientes);
- E. Tapete de baixa permeabilidade a montante que aumenta o caminho de infiltração, reduz a infiltração e os gradientes de saída;
- F. “Slurry Trench” (ou outros tipos de “cut-off”) reduzem (ou praticamente elimina se a penetração for total e em fundação de baixa permeabilidade). Também reduz os gradientes de saída;
- G. Injeções para reduzir vazão e os gradientes de saída. Em geral são feitas em rocha;
- H: Poços de alívio controlam os gradientes de saída;
- I: Bermas de equilíbrio melhoram a estabilidade a jusante e diminui o potencial de liquefação ou “blow-up” da fundação (juntamente com H).

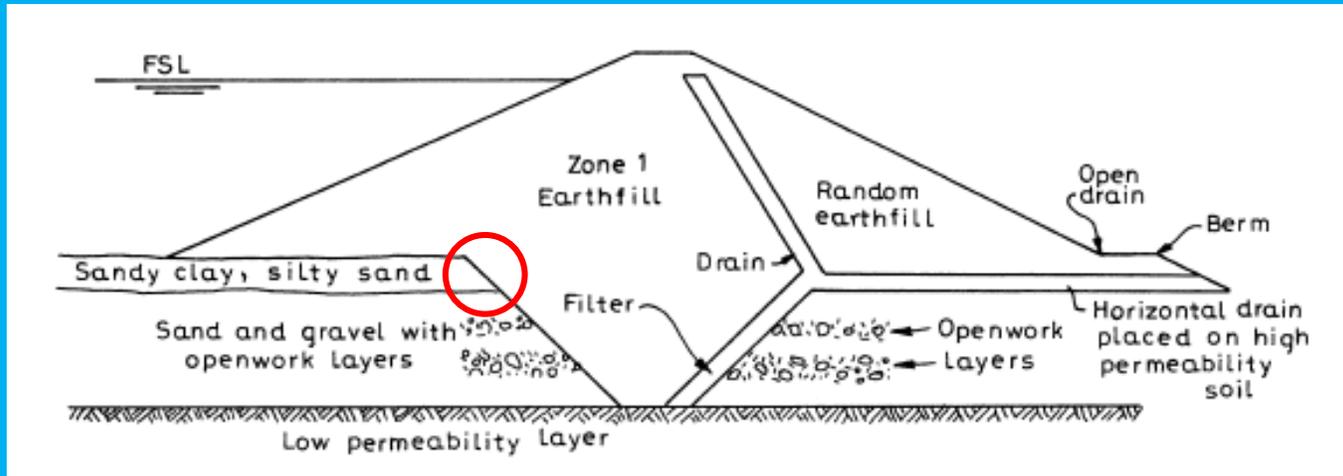
Características das Fundações Aluviais



Fell et al. (2005)

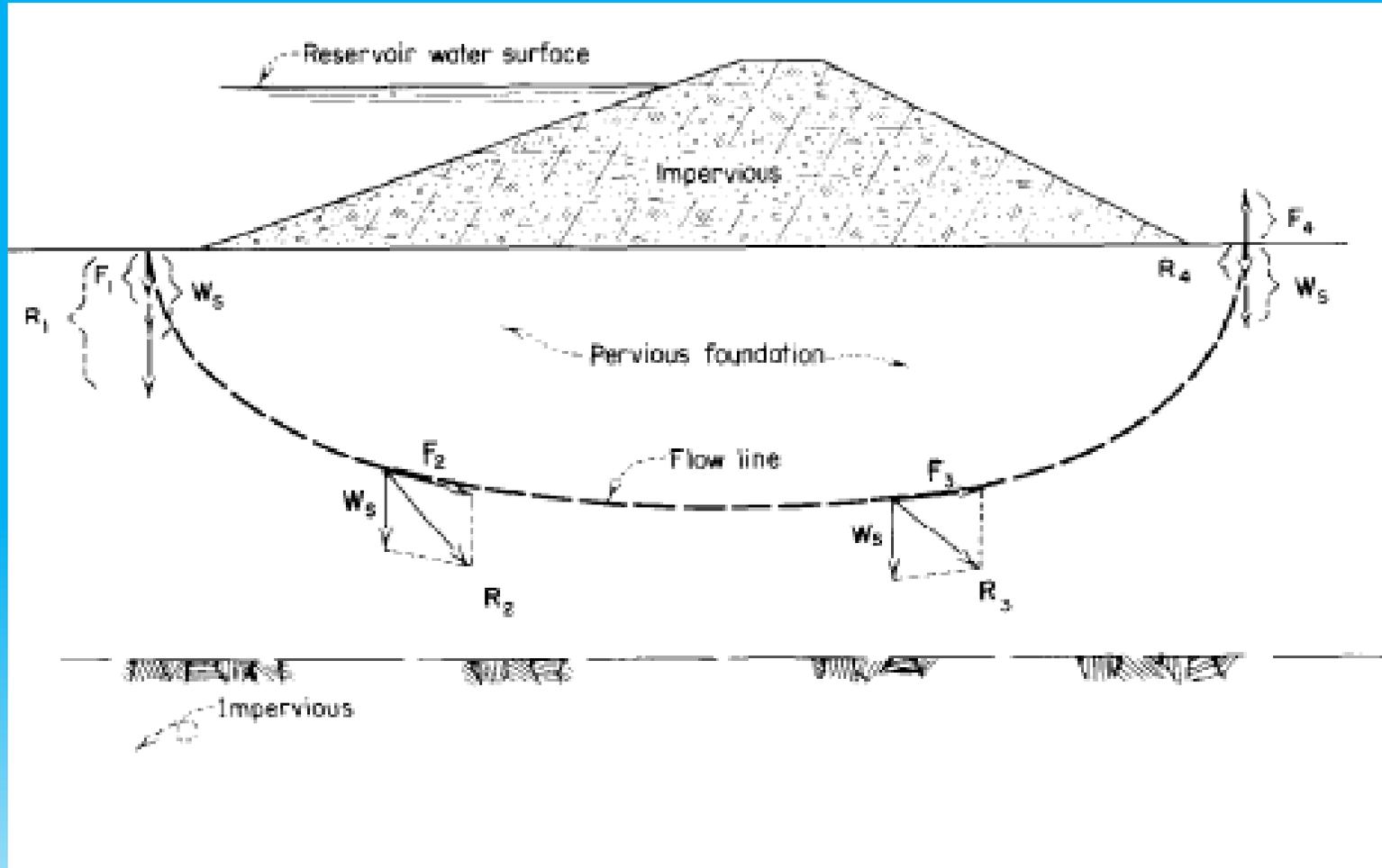
- A. Lentes ou camadas de areia de menor permeabilidade, areia siltosa ou mesmo areia argilosa podem ocorrer, apresentando uma permeabilidade vertical muito reduzida.
- B. Muitas vezes há camadas de cascalho, ou mesmo camada de pedregulho/cascalho na base do aluvião refletindo o tempo em que o rio estava mais ativo. Este pode ser muito permeável;
- C. A parte superior da superfície da rocha pode ser permeável devido à presença de juntas abertas. A superfície também pode ser muito irregular;
- D. O aluvião grosso - areia/cascalho pode ser anisotrópico com uma elevada razão entre K_h e K_v ;
- E. Muitas vezes há uma camada de areia siltosa ou com pedregulho superfície, dando uma baixa permeabilidade.

Observações sobre o Projeto do Dreno Horizontal



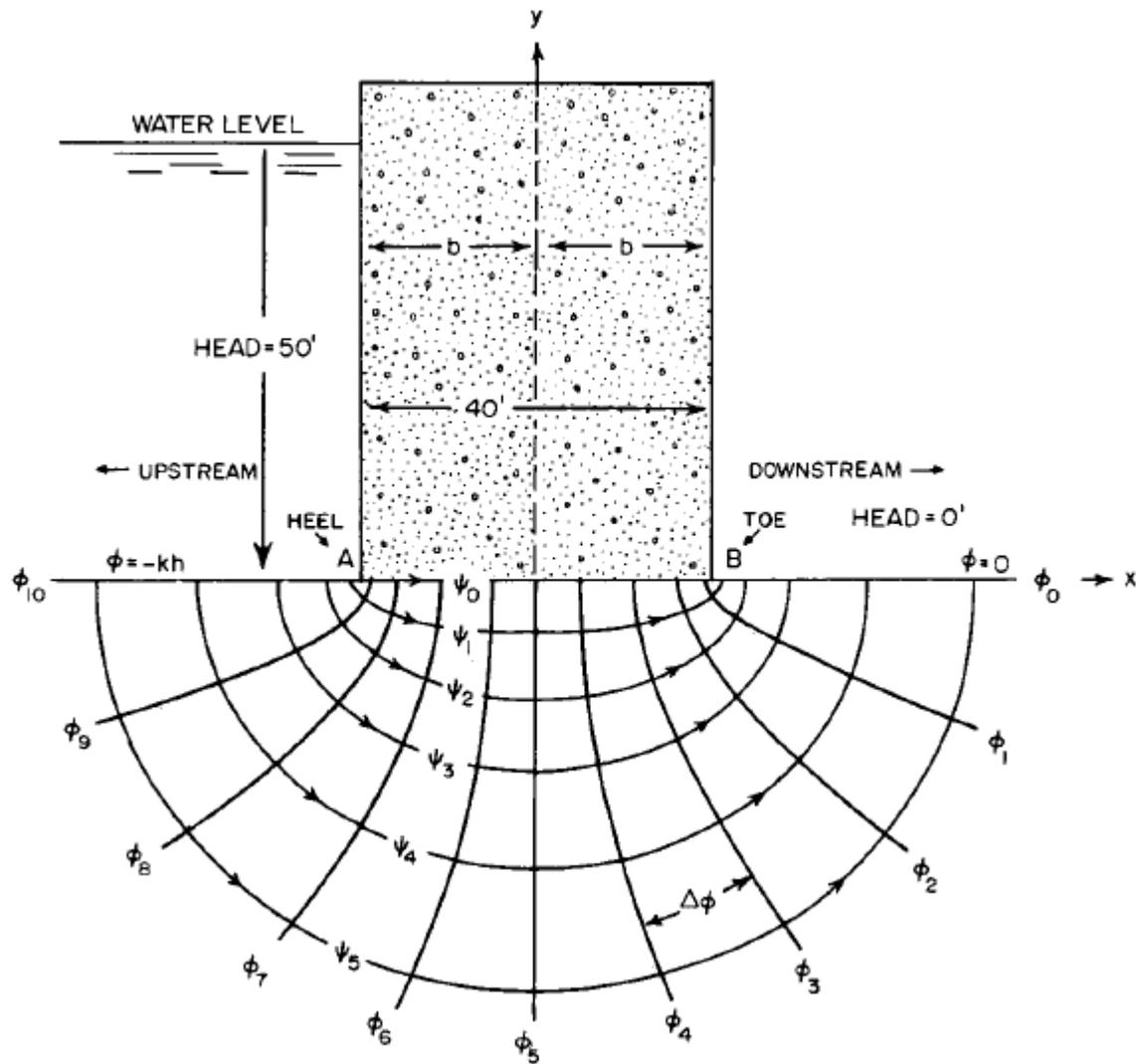
- A água das ombreiras irá percolar para a parte mais baixa dos drenos antes de sair no pé. Portanto, a capacidade de drenagem do dreno deve levar isto em conta;
- No filtro adotado quem vai controlar a vazão é a camada interior (ver figura anterior, Zona 2B);
- Estimativas conservadoras da permeabilidade da fundação devem ser adotada para o projeto da drenagem horizontal, uma vez que a falta de capacidade adequada pode levar a ruptura da barragem, ou a exigência de uma berma de equilíbrio após a construção;
- Da mesma forma, estimativas conservadoras da permeabilidade horizontal do dreno devem ser adotadas;
- Durante a construção o dreno não pode ser contaminado pelo solo fino.
- O pé a jusante deve ser projetado para garantir que a saída do dreno não seja bloqueado por erosão superficial;
- O dreno deve está em contato com a porção mais permeável da fundação, como indicado na Figura acima.
- Evitar a compactação da fundação para não reduzir a permeabilidade sob o filtro.

Forças da Percolação

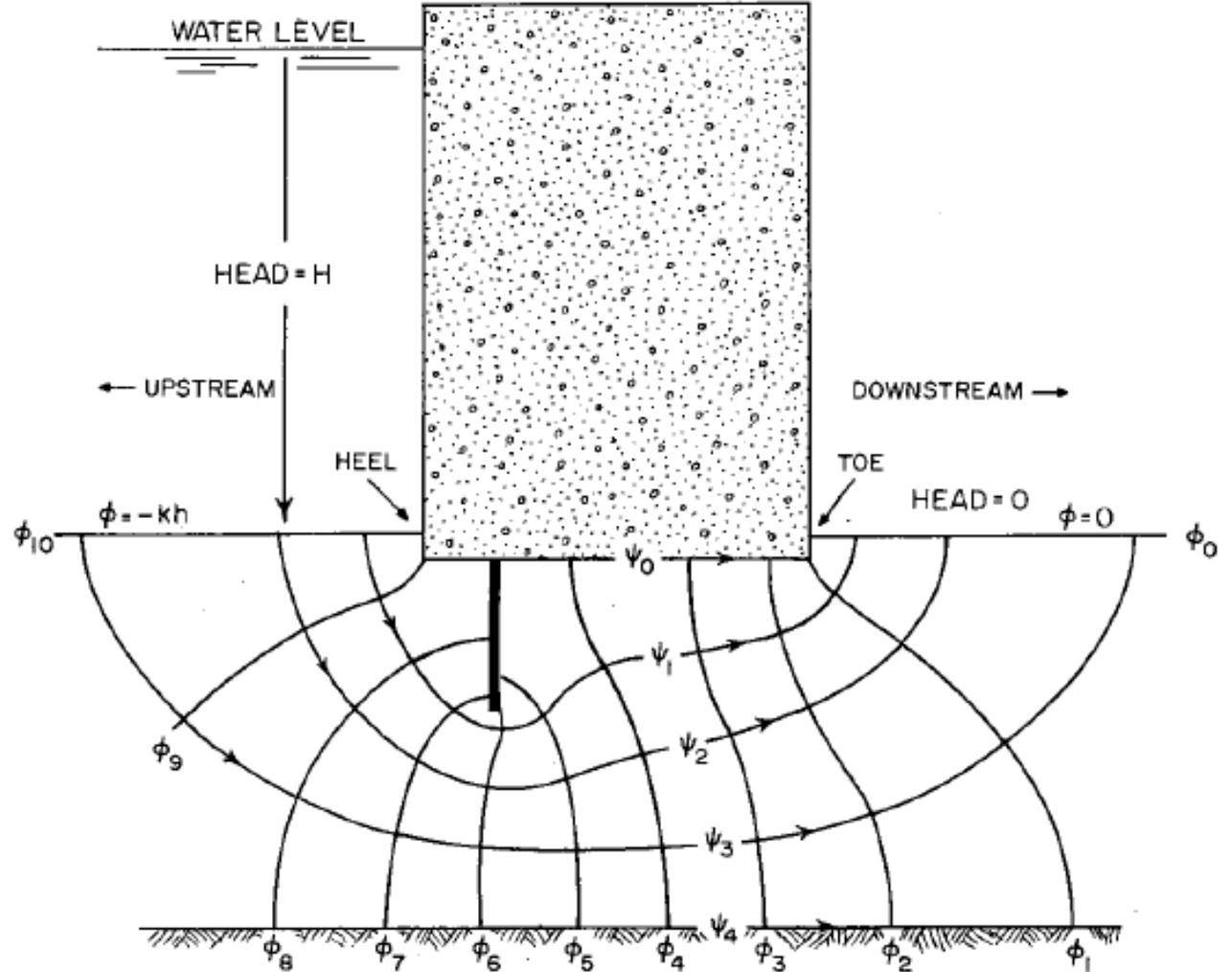


Wahlstrom (1974)

Redes de Fluxo e Ações na Fundação



Rede de fluxo simétrica.
Fundação homogênea, isotrópica e infinita

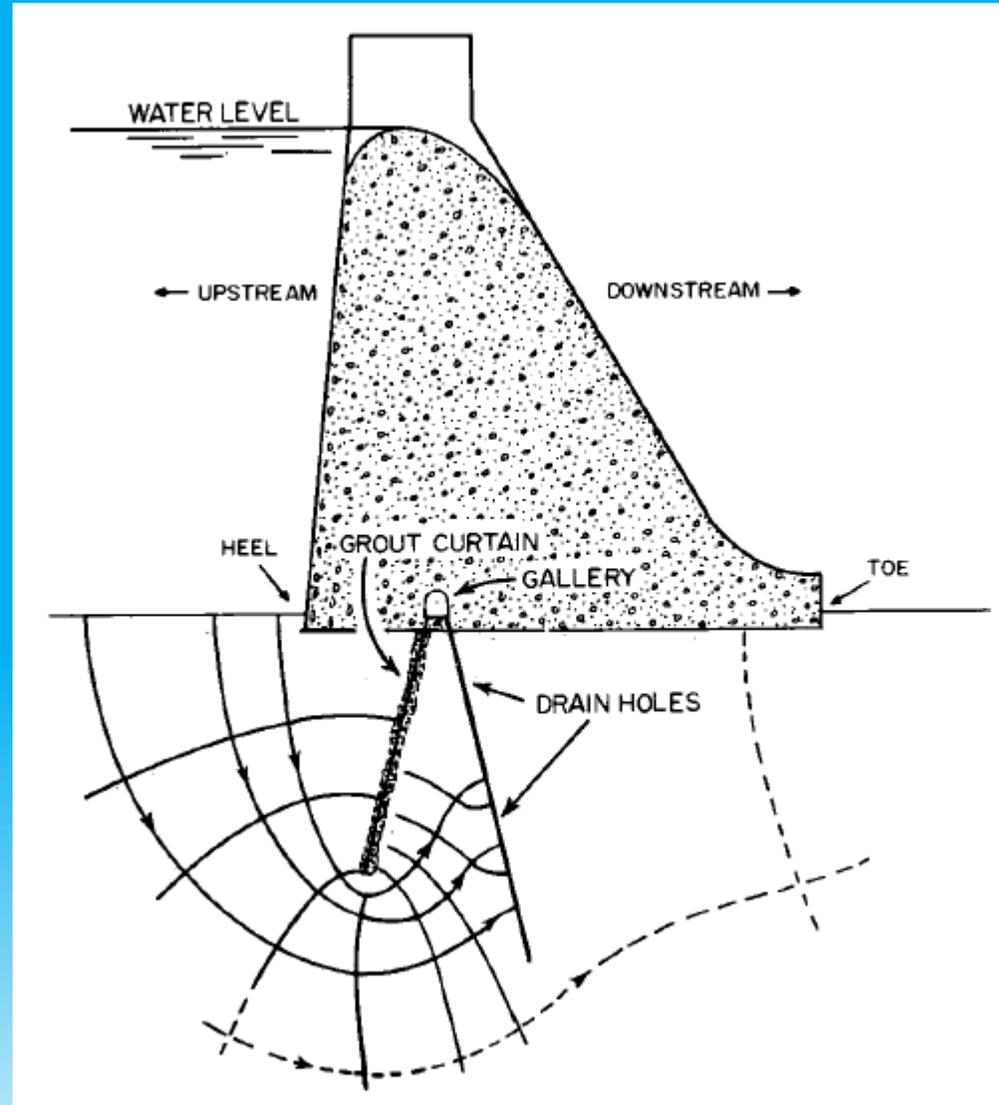


Rede de fluxo com inclusão de um "cut-off".
Fundação homogênea, isotrópica e infinita

Wahlstrom (1974)

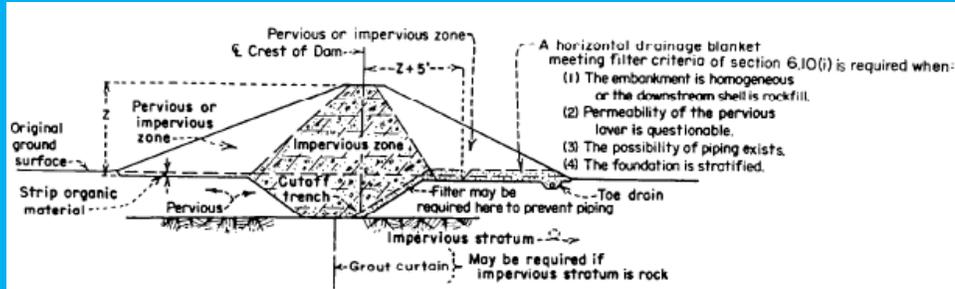
Redes de Fluxo e Ações na Fundação

Rede de fluxo abaixo de uma barragem de concreto com uma cortina de injeção e furos de drenagem.

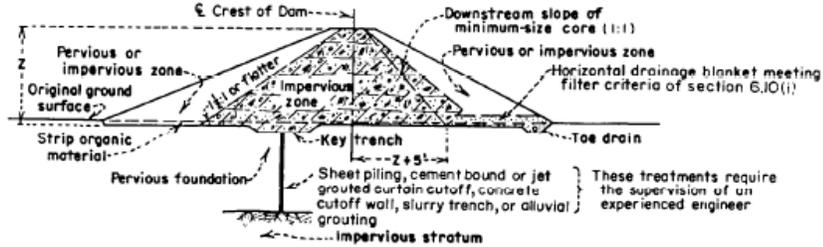


Wahlstrom (1974)

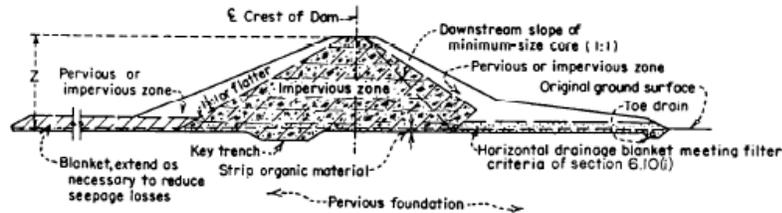
Tratamento de Fundação com a Camada Permeável Exposta



(A) SHALLOW PERVIOUS FOUNDATION



(B) INTERMEDIATE DEPTH OF PERVIOUS FOUNDATION



(C) DEEP PERVIOUS FOUNDATION

NOTE: Filter criteria given in section 6.10(i) applies between the impervious zone and any downstream zone or a properly designed filter must be provided on (A)(B) and (C).

Table 6-2.—Treatment of pervious foundations.

Case 1: Exposed pervious foundations					
Figure	Thickness of overlying impervious layer	Total depth of foundation	Condition of pervious material	Primary device for control of seepage	Additional requirements (other than stripping)
6-28(A)	None	Shallow	Homogeneous	Positive cutoff trench	Toe drain Horizontal drainage blanket meeting filter requirements may be required Grouting may be required
6-28(C)	None	Deep	Homogeneous	Upstream impervious blanket	Large core Horizontal drainage blanket meeting filter requirements may be required Key trench Toe drain

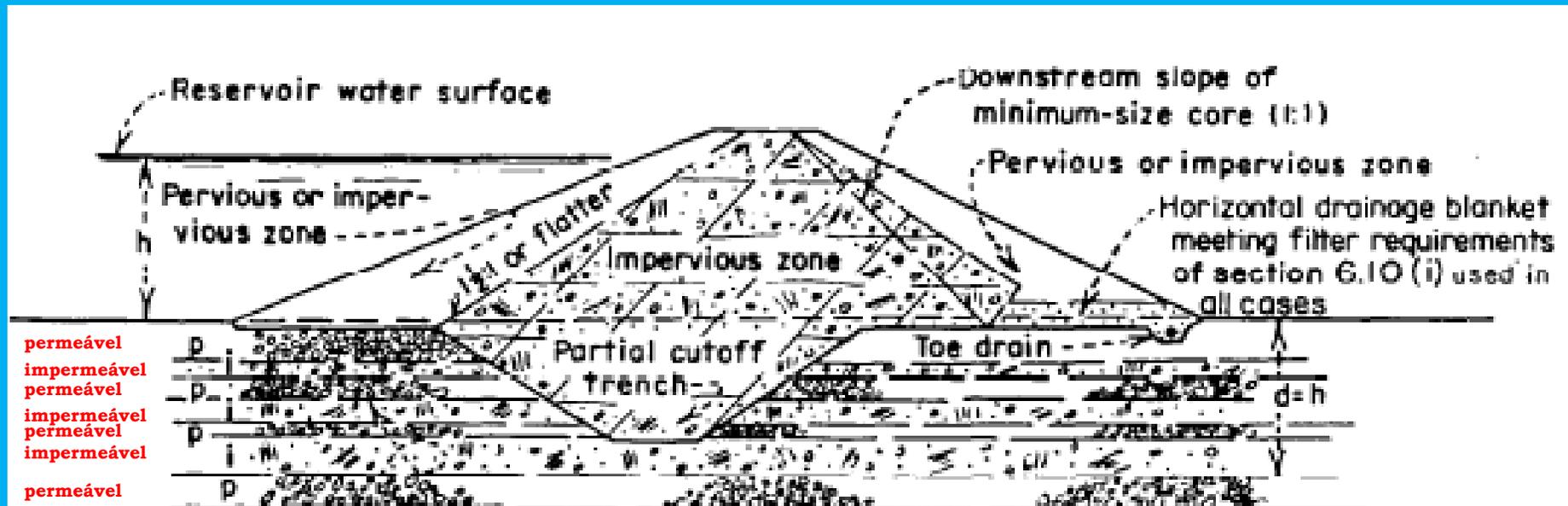
Case 2: Covered pervious foundations

6-28(A)	≤3 ft	Shallow	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (shallow)	
6-28(C)	≤3 ft	Deep	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (deep)	
6-28(A)	>3 ft, <reservoir head	Shallow	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (shallow)	
6-30(A) or (B)	>3 ft, <reservoir head	Deep	Homogeneous	Drainage trench or pressure-relief wells Impervious upstream layer	Key trench Compaction of the upstream layer
	>reservoir			No treatment required as a pervious foundation	

Stratified foundations

6-28(A)	Not important	Shallow	Stratified	Positive cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Grouting may be required
6-29	Not important	Deep	Stratified	Partial cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Pressure-relief wells may be required

Tratamento de Fundação Estratificada



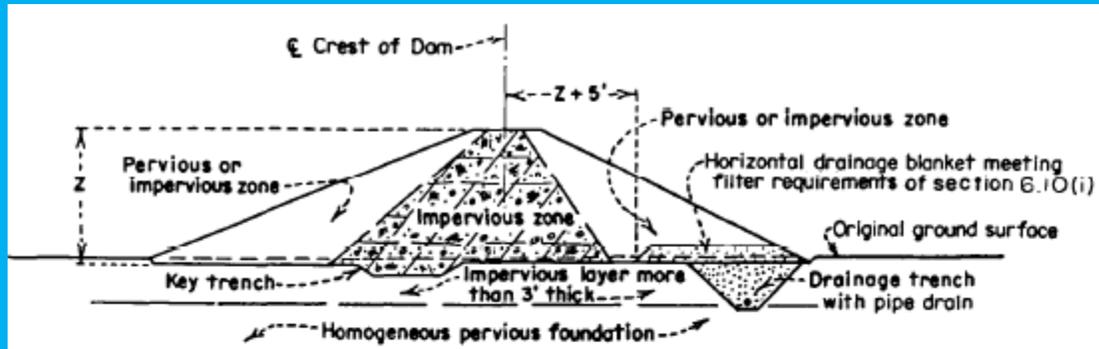
Strongly stratified pervious foundation with very pervious layers (p) and relatively impervious (i) layers

- Notes: (1) If stratified foundation is of shallow depth, a positive cutoff trench should be used.
 (2) Pressure relief wells may be required for deeply stratified foundations.
 (3) Filter criteria given in section 6.10(i) applies between the impervious zone and any downstream zone or foundation layer, otherwise a filter should be provided.

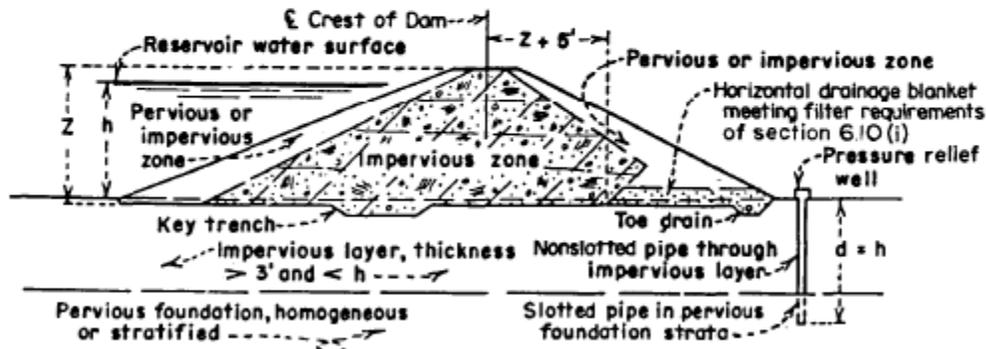
6.29

Stratified foundations					
6-28(A)	Not important	Shallow	Stratified	Positive cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Grouting may be required
6-29	Not important	Deep	Stratified	Partial cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Pressure-relief wells may be required

Tratamento Fundação com a Camada Permeável Subjacente a Camada Impermeável



(A) OVERLYING IMPERVIOUS LAYER PENETRATED BY DRAINAGE DITCH



(B) PRESSURE RELIEF WELL

NOTE: Filter criteria given in section 6.10(i) applies between the impervious zone and any downstream zone or a properly designed filter must be provided on both (A) and (B).

6.30

USBR (1987)

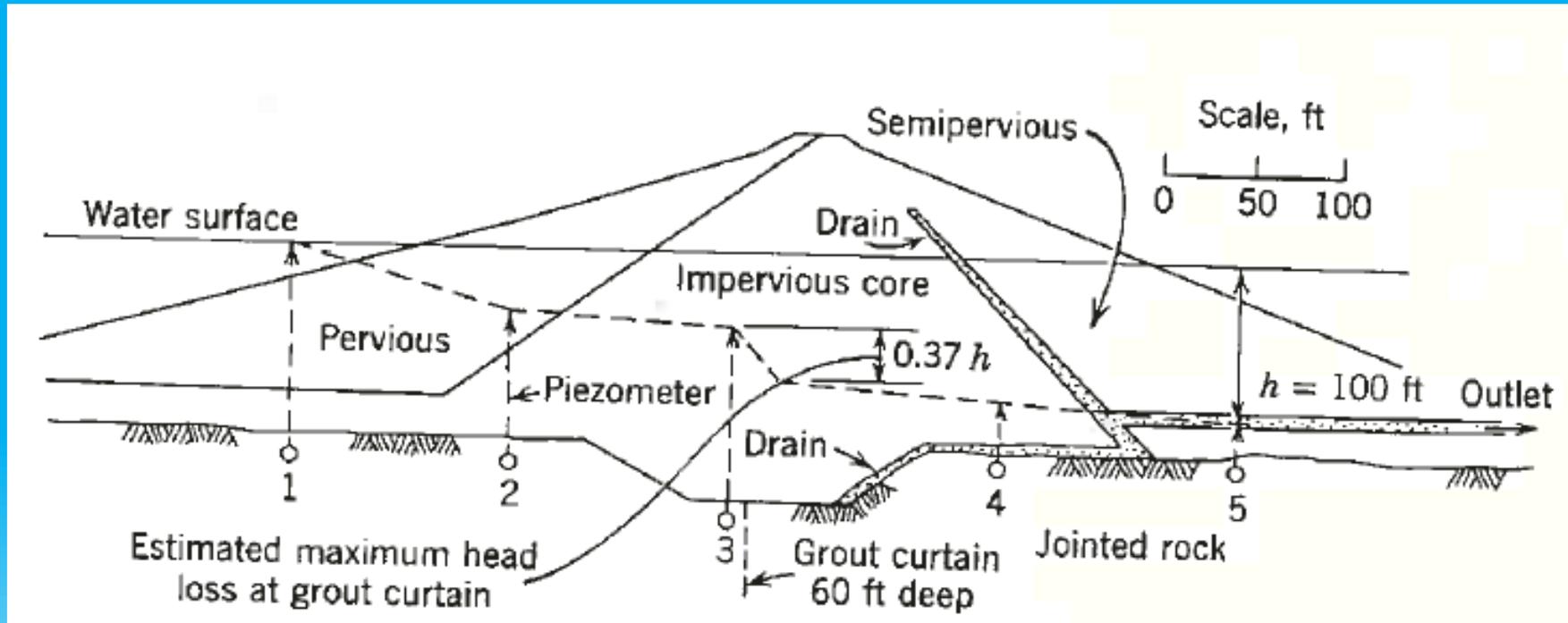
Table 6-2.—Treatment of pervious foundations.

Case 1: Exposed pervious foundations					
Figure	Thickness of overlying impervious layer	Total depth of foundation	Condition of pervious material	Primary device for control of seepage	Additional requirements (other than stripping)
6-28(A)	None	Shallow	Homogeneous	Positive cutoff trench	Toe drain Horizontal drainage blanket meeting filter requirements may be required Grouting may be required
6-28(C)	None	Deep	Homogeneous	Upstream impervious blanket	Large core Horizontal drainage blanket meeting filter requirements may be required Key trench Toe drain

Case 2: Covered pervious foundations					
6-28(A)	≤3 ft	Shallow	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (shallow)	
6-28(C)	≤3 ft	Deep	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (deep)	
6-28(A)	>3 ft, <reservoir head	Shallow	Homogeneous	Treat as Case 1: exposed pervious foundation (shallow)	
6-30(A) or (B)	>3 ft, <reservoir head	Deep	Homogeneous	Drainage trench or pressure-relief wells Impervious upstream layer	Key trench Compaction of the upstream layer
	>reservoir			No treatment required as a pervious foundation	

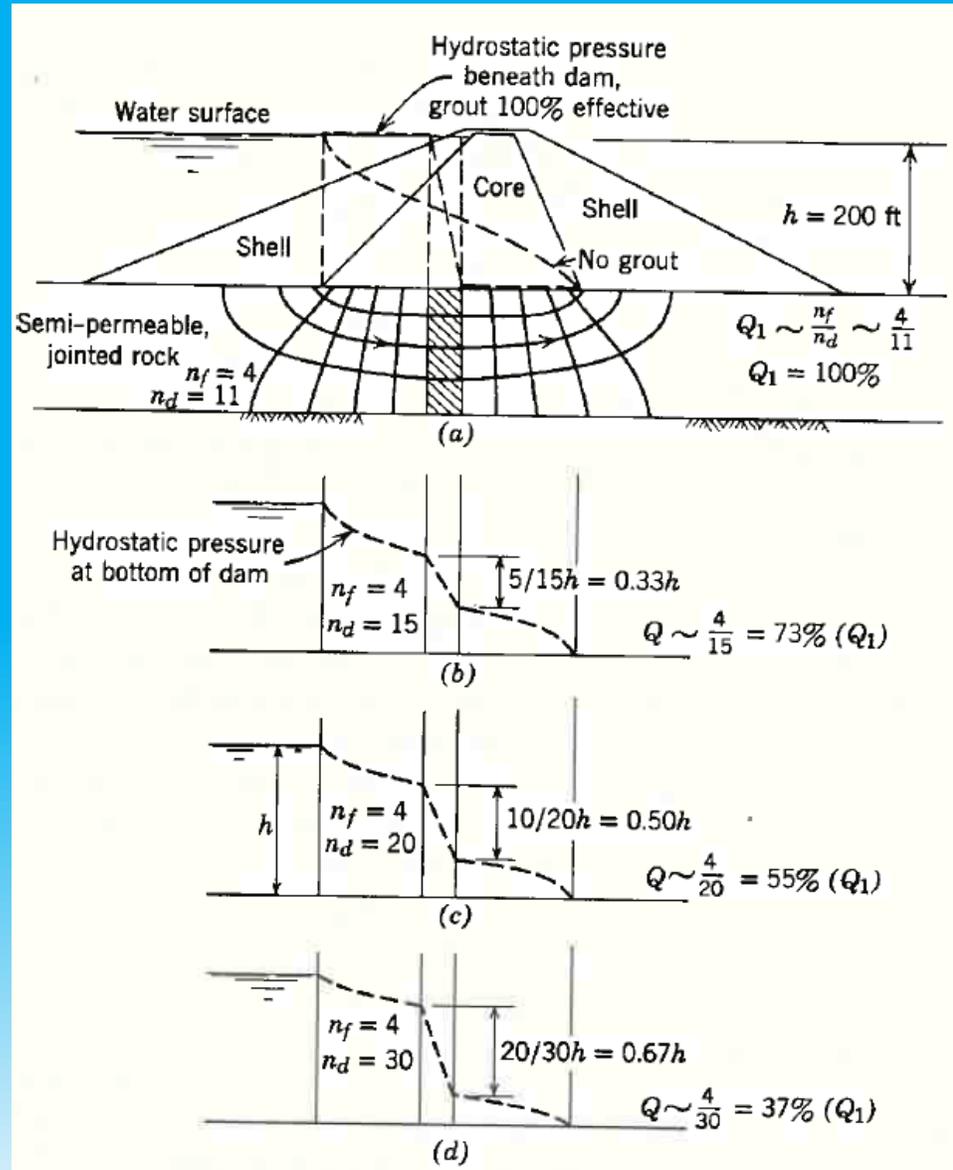
Stratified foundations					
6-28(A)	Not important	Shallow	Stratified	Positive cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Grouting may be required
6-29	Not important	Deep	Stratified	Partial cutoff trench	Horizontal drainage blanket meeting filter requirements Toe drain Pressure-relief wells may be required

Pressões Hidrostáticas na Fundação de Barragem com Cortina de Injeção



Cedergreen (1977)

Efetividade da Cortina de Injeção sob Núcleo de Argila



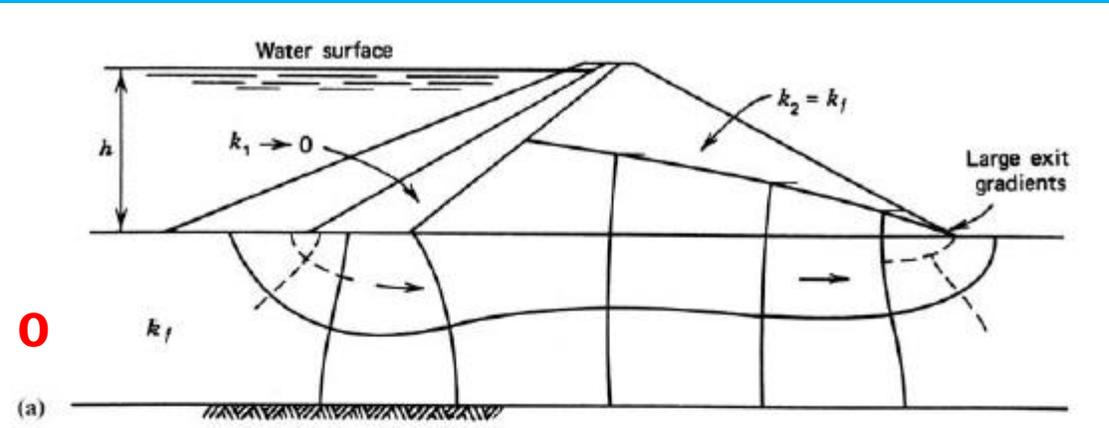
80% de efetividade ($K_g = 0.2 K_{\text{fundação}}$)

90% de efetividade ($K_g = 0.1 K_{\text{fundação}}$)

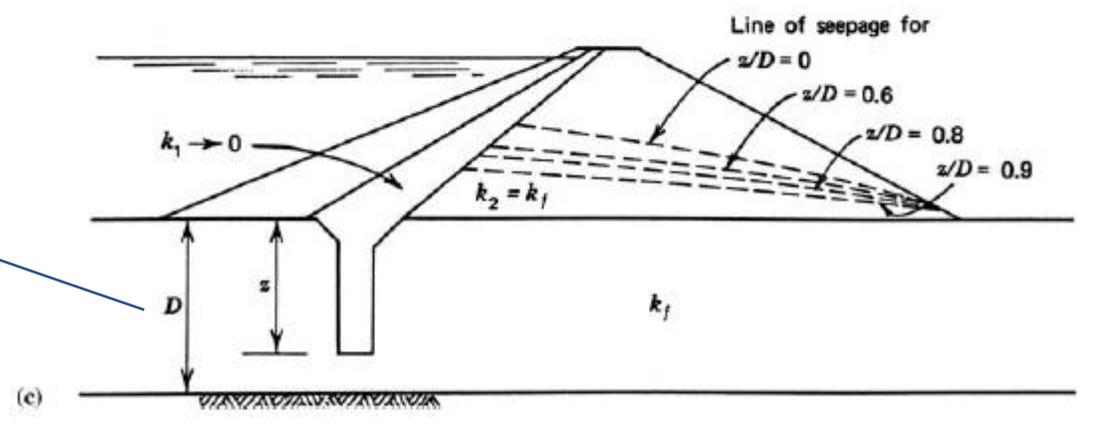
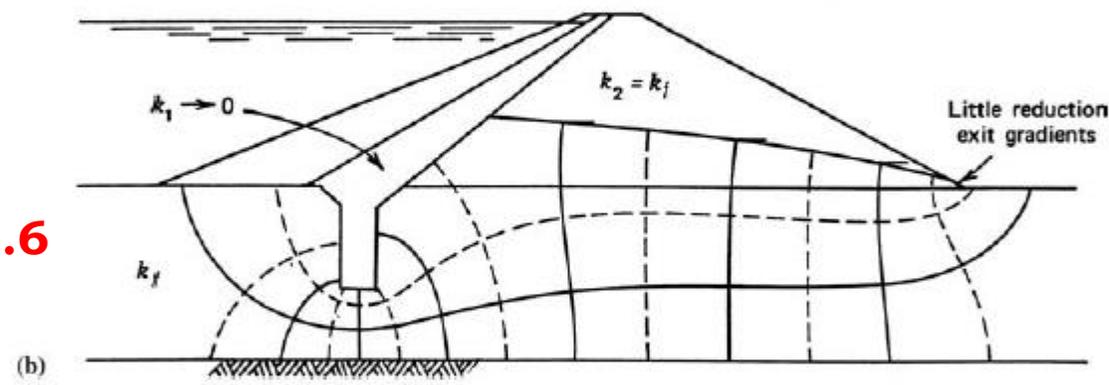
95% de efetividade ($K_g = 0.05 K_{\text{fundação}}$)

Efeito do "Cut-off" parcial na posição da Freática

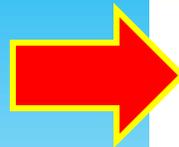
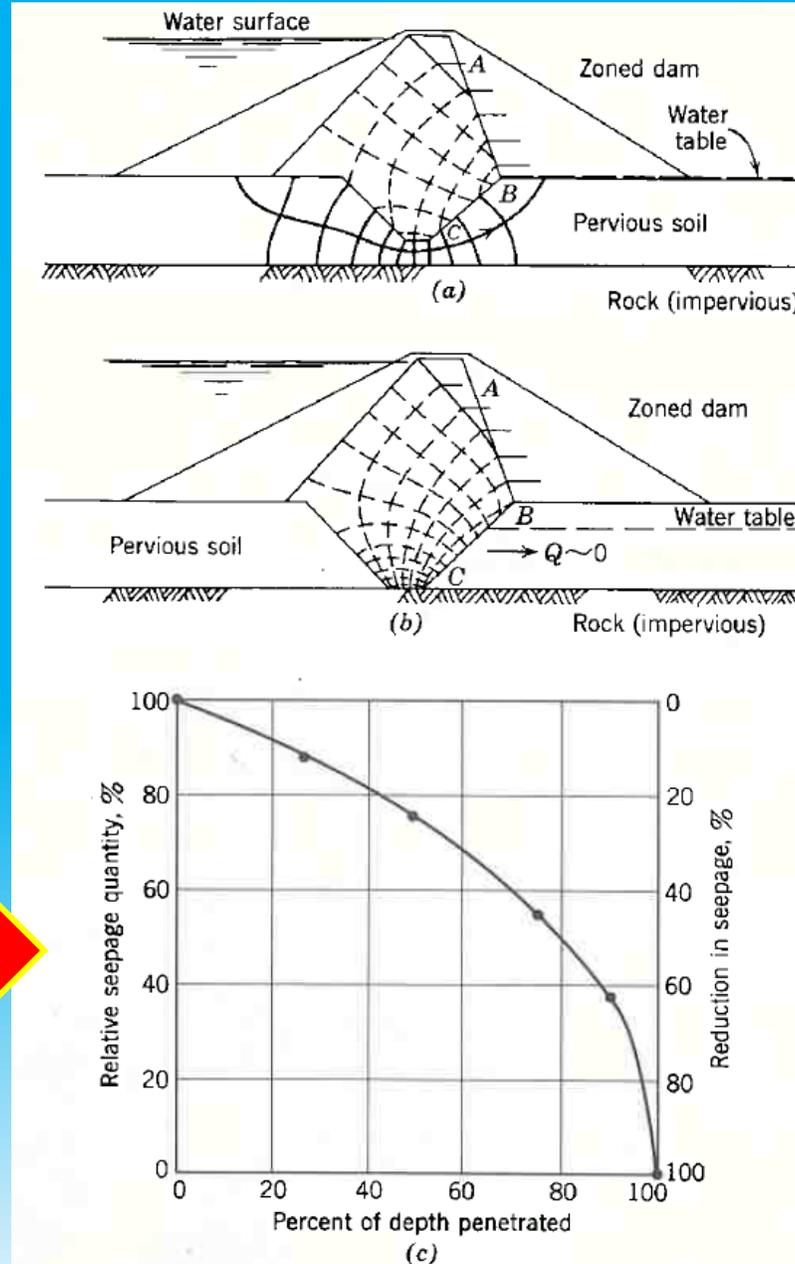
$z/D = 0$



$z/D = 0.6$

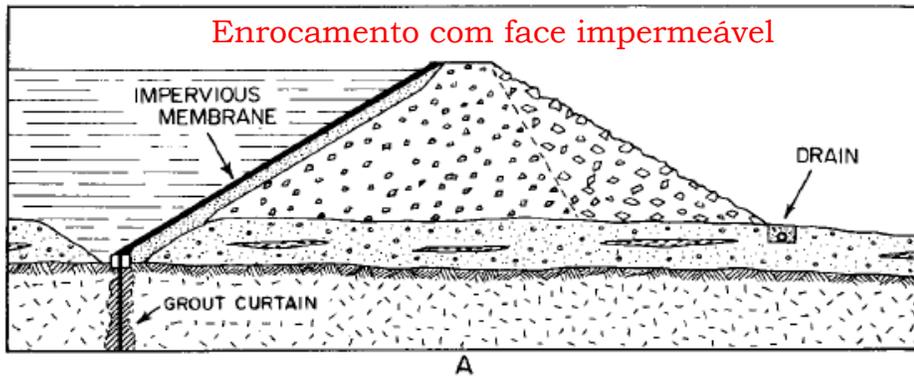


Efeito do "Cut-off" na Vazão

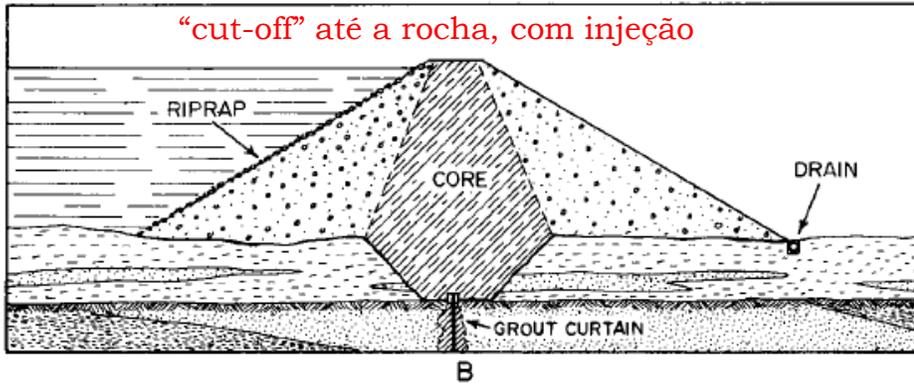


Outros Exemplos

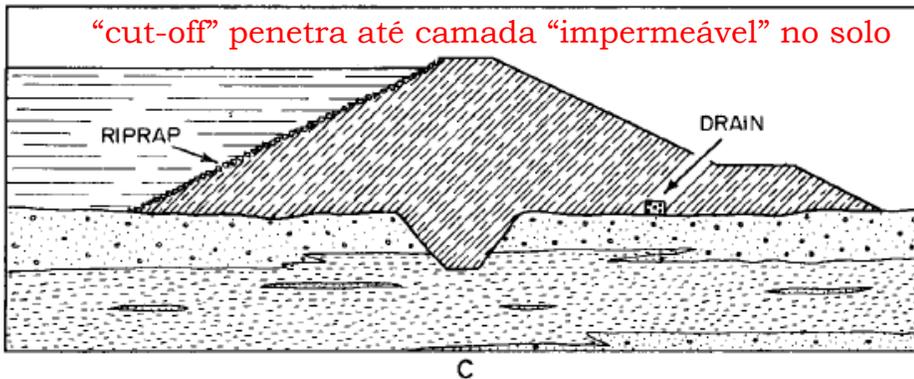
Enrocamento com face impermeável



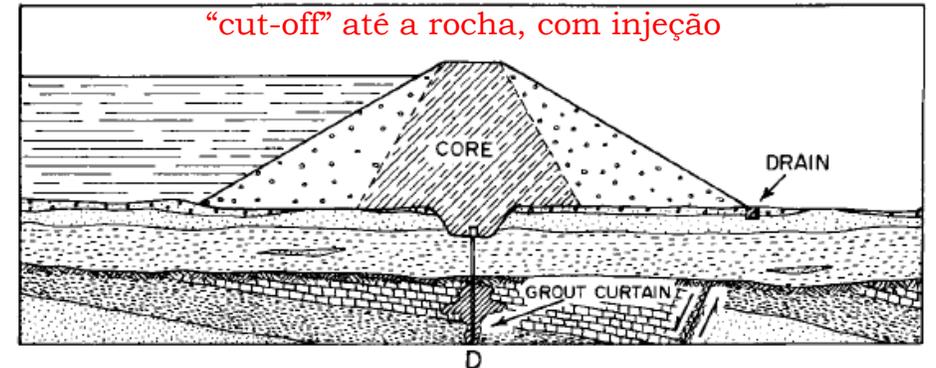
“cut-off” até a rocha, com injeção



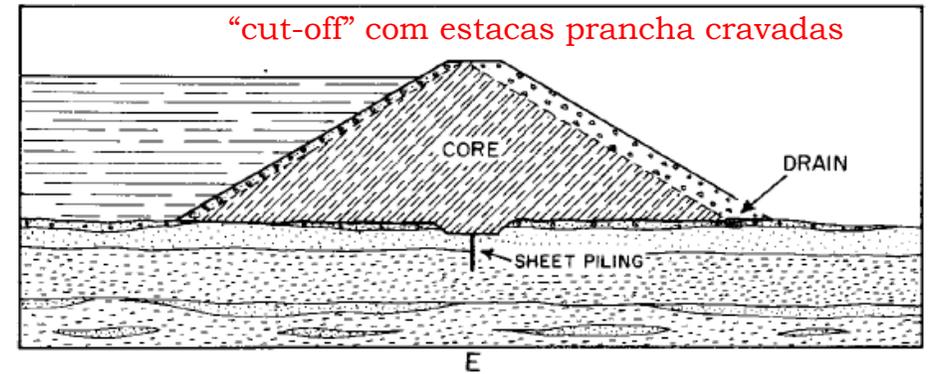
“cut-off” penetra até camada “impermeável” no solo



“cut-off” até a rocha, com injeção



“cut-off” com estacas prancha cravadas



Tapete “impermeável” a montante

