



**Master Universitario di II Livello
IV Edizione
Anno Accademico 2014/2015
Direttore: Prof. Ing. Salvatore
Miliziano**

Seminari Maggio 2015

FILTRI

STUDIO PIETRANGELI

Roma, 19 maggio 2015

I filtri nelle dighe in materiali sciolti e nelle loro fondazioni assolvono generalmente due funzioni principali:

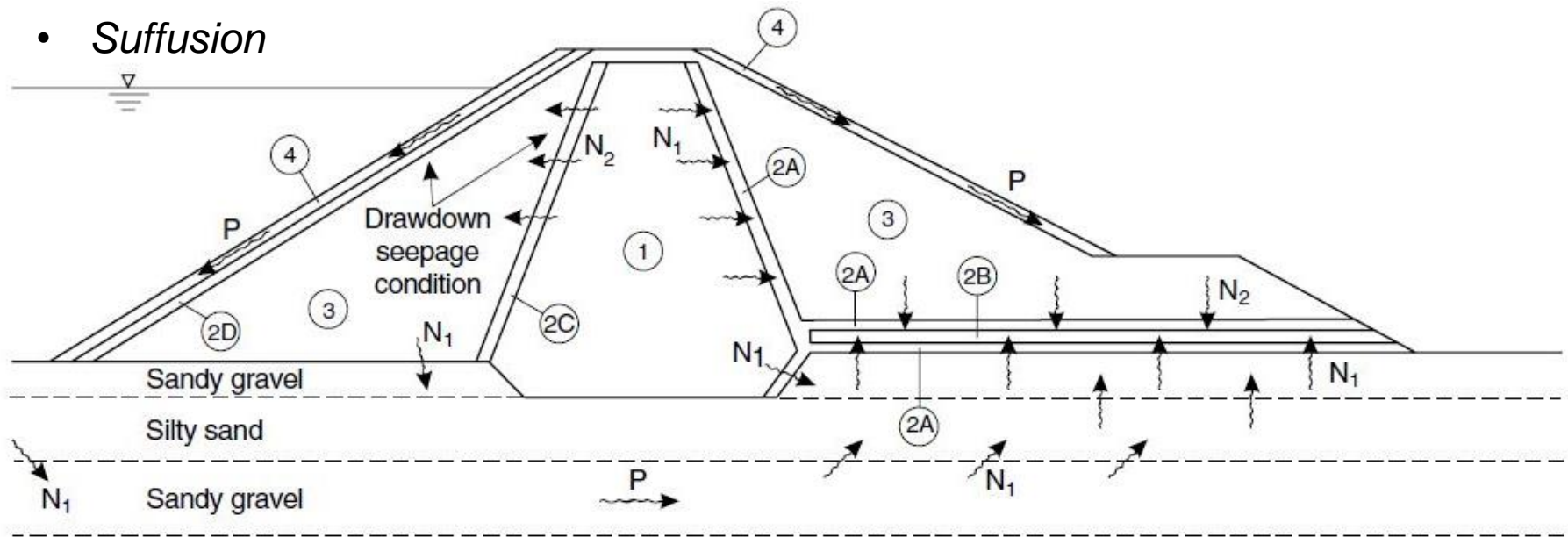
- Prevenire l'EROSIONE di particelle dalla fondazione o da zone particolari del corpo diga associati a fenomeni di filtrazione.
- Permettere il DRENAGGIO delle acque di filtrazione attraverso le zone stesse.

Il fenomeno dell'erosione interna è tra le principali cause di collasso e di incidenti nelle dighe in materiali sciolti (Foster et al. 1998, 2000).

Failure Mechanism	Erosion		Embankment Sliding	
	External erosion (overtopping)	Internal erosion	Static Instability	Seismic instability
% over the world	48%	46%	4%	2%
% over the world	94%		6%	

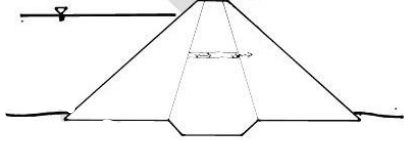
I meccanismi principali attraverso cui avviene l'erosione interna sono:

- Perdite concentrate
- Erosione retrograda
- Erosione di contatto
- *Suffusion*



L'erosione interna può aver luogo:

- attraverso il corpo diga
- attraverso le fondazioni
- al contatto fondazione / corpo diga



INITIATION

Concentrated leak forms, erosion initiates along walls of crack

CONTINUATION

Continuation of erosion

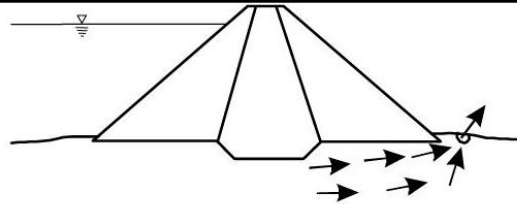
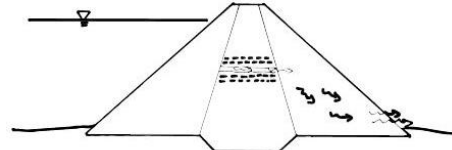
PROGRESSION

Enlargement of concentrated leak

BREACH

Breach mechanism forms

Erosione interna attraverso il corpo diga a causa di PERDITA CONCENTRATA.



INITIATION

Leakage exits from the foundation and backward erosion initiates

CONTINUATION

Continuation of erosion

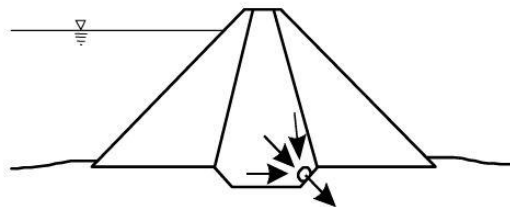
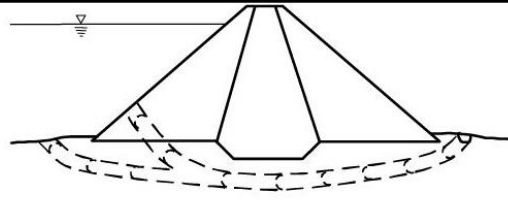
PROGRESSION

Backward erosion in progresses to form a pipe

BREACH

Breach mechanism forms

Erosione interna attraverso la fondazione a causa di EROSIONE RETROGRADA.



INITIATION

Leakage exits the core into the foundation and backward erosion initiates as core erodes into the foundation

CONTINUATION

Continuation of erosion

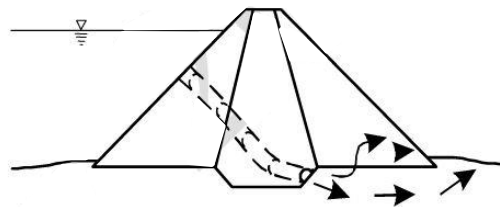
PROGRESSION

Backward erosion progresses to form a pipe. Eroded soil is transported in the foundation

BREACH

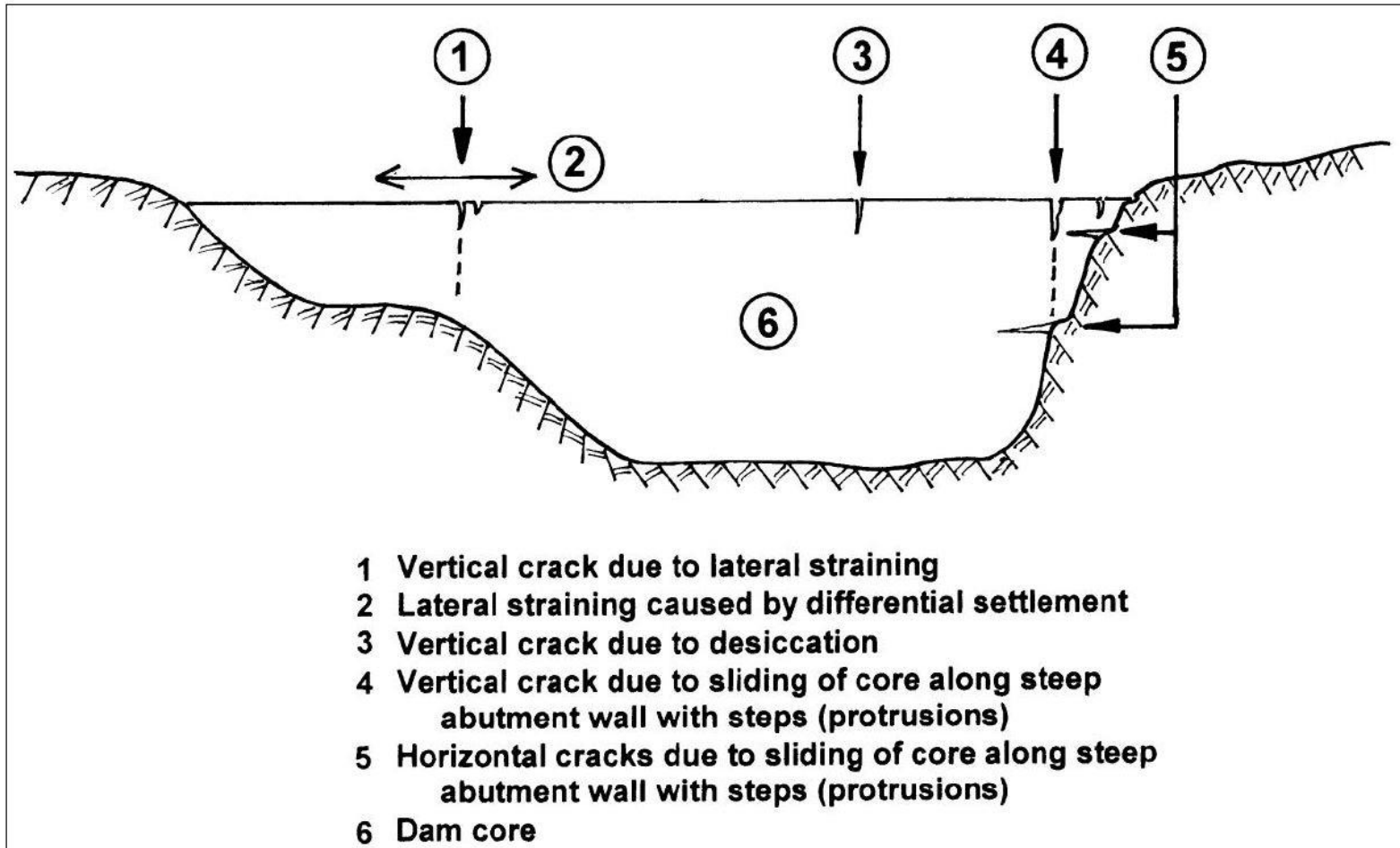
Breach mechanism forms

Erosione interna dal corpo diga verso la fondazione a causa di EROSIONE RETROGRADA.



- **PERDITE CONCENTRATE**

Per esempio attraverso fessure generatesi a causa di cedimenti differenziali o all'interfaccia con strutture integrate nel corpo diga (condotti, gallerie), attraverso anomalie presenti in fondazione, etc.



- PERDITE CONCENTRATE

L'erosione ha inizio quando lo sforzo di taglio τ attraverso la fessura nella quale si verifica la filtrazione supera lo sforzo di taglio critico τ_c .

Wan (2006), Wan and Fell (2004) e Fell (2008) forniscono delle espressioni per calcolare lo sforzo di taglio generato dal flusso attraverso la fessura:

(a) Cylindrical pipe:

$$\tau = \rho_w \frac{gH_f d}{4L}$$

(b) Vertical transverse crack

$$\tau = \frac{\rho_w gH_f^2 W}{2(H_f + W)L}$$

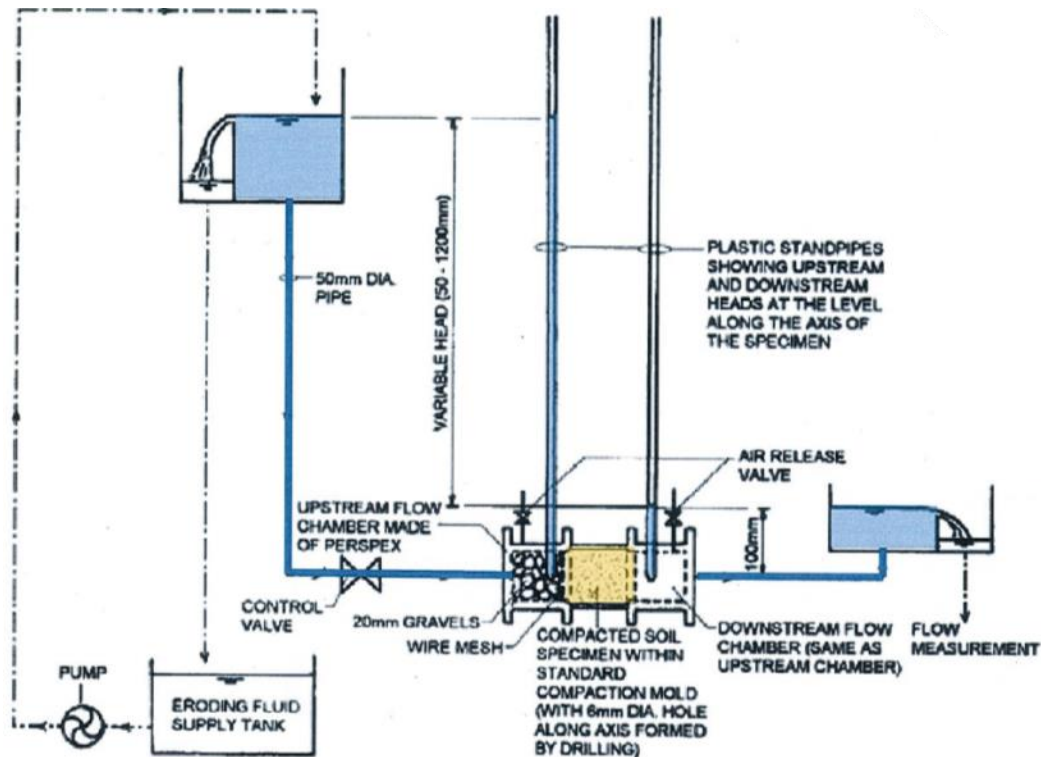
where

τ	=	Hydraulic shear stress in N/m^2
ρ_w	=	Density of water in kg/m^3
g	=	Acceleration due to gravity = 9.8m/s^2
H_f	=	Head loss in pipe or crack due to friction in meters
L	=	Length of pipe or crack base in meters
d	=	Diameter of the pipe in meters
W	=	Width of crack in meters

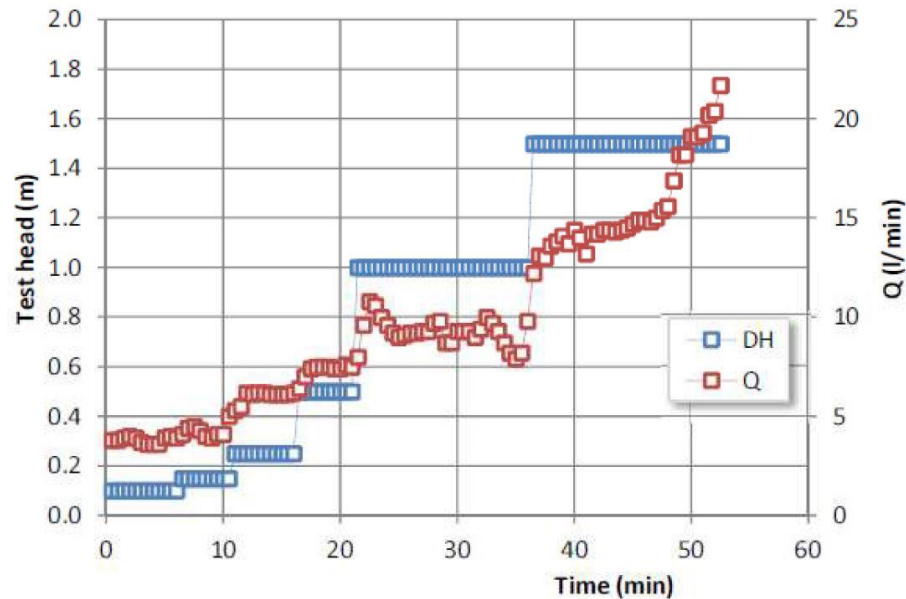
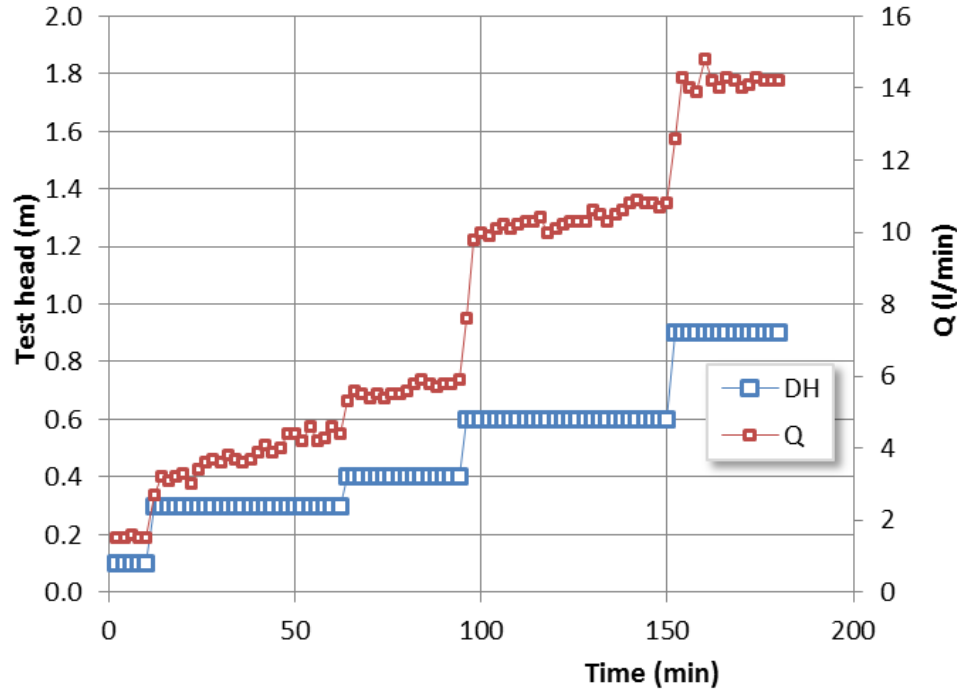
- PERDITE CONCENTRATE

Lo sforzo di taglio critico e la velocità con cui procede l'erosione sono valutate attraverso test di laboratorio (es. SET «*Slot Erosion Test*»; HET «*Hole Erosion Test*»; JET «*Jet erosion test*»).

La prova HET si basa sull'analisi degli effetti del passaggio di acqua attraverso un foro praticato nel campione stesso.

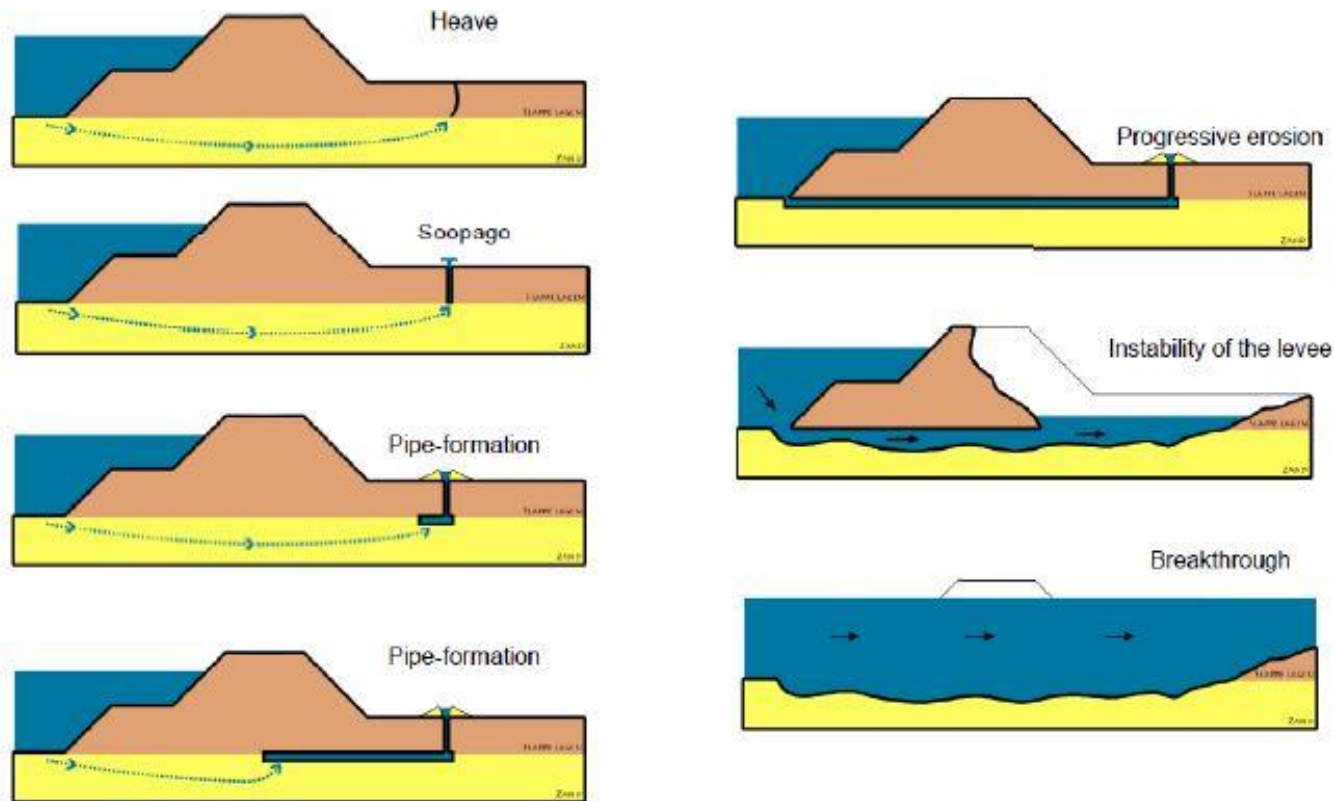


- PERDITE CONCENTRATE



- EROSIONE RETROGRADA

Il fenomeno erosione retrograda accade generalmente in presenza di suoli non plastici (sabbie sottili) con un coefficiente di uniformità $C_u < 3$. L'erosione inizia su una superficie libera a valle del corpo diga quando si verificano gradienti superiori al valore critico. L'erosione progredisce in modo retrogrado al di sotto del corpo diga.



- EROSIONE RETROGRADA

- *Terzaghi, Peck (1948)*

Il fenomeno di erosione retrograda in un terreno non coesivo ha inizio quando si verifica una condizione di annullamento delle tensioni efficaci:

$$i_c = \gamma_b / \gamma_w$$

- *Sellmeijer e Koenders (1988, 1992)*

Sulla base di esperimenti condotti negli anni '80 definiscono il gradiente critico come il prodotto di 3 fattori:

- *Resistance factor* $F_R = \eta \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan \vartheta \left(\frac{RD}{RD_m} \right)^{0.35} \left(\frac{U}{U_m} \right)^{0.13} \left(\frac{KAS}{KAS_m} \right)^{-0.02}$

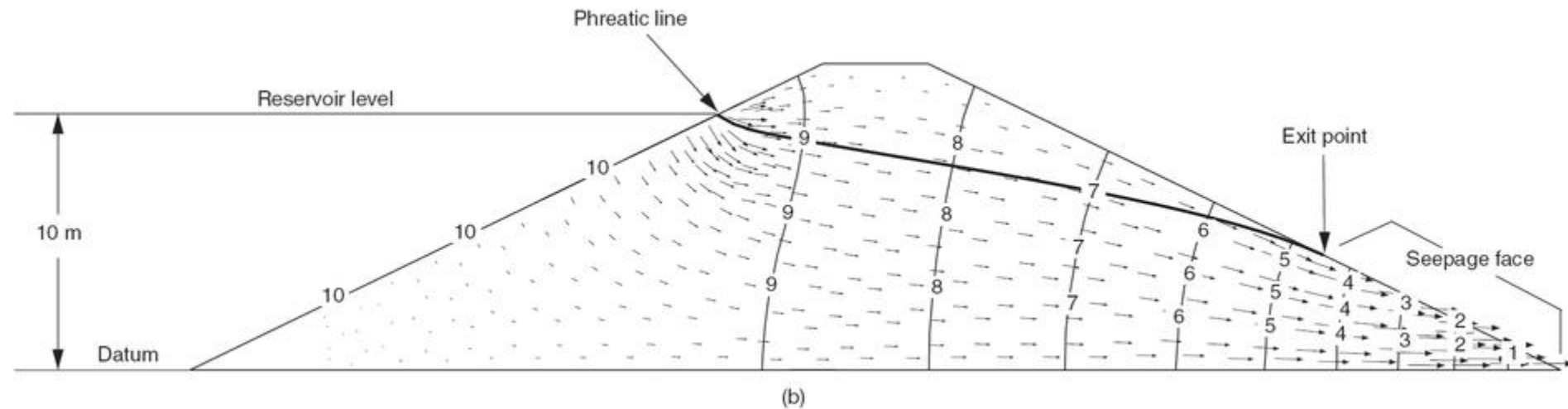
- *Scale factor* $F_S = \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \left(\frac{d_{70m}}{d_{70}} \right)^{0.6}$

- *Shape factor* $F_G = 0.91 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{(D/L)^{2.8} - 1} + 0.04}$

- *Altri (Schmertmann , Hoffman, etc.)*

- EROSIONE RETROGRADA

Un caso particolare è quello dell'erosione superficiale progressiva del paramento di valle a causa di *through flow*.



Il fenomeno inizia quando la dimensione caratteristica delle particelle è al di sotto di un valore critico definito ad esempio come:

$$d_{50} = 0.43 S_0^{0.43} q^{0.78}$$

- EROSIONE DI CONTATTO

Per erosione di contatto si intende il fenomeno erosivo associato ad un flusso parallelo al contatto tra un materiale grossolano e uno fine

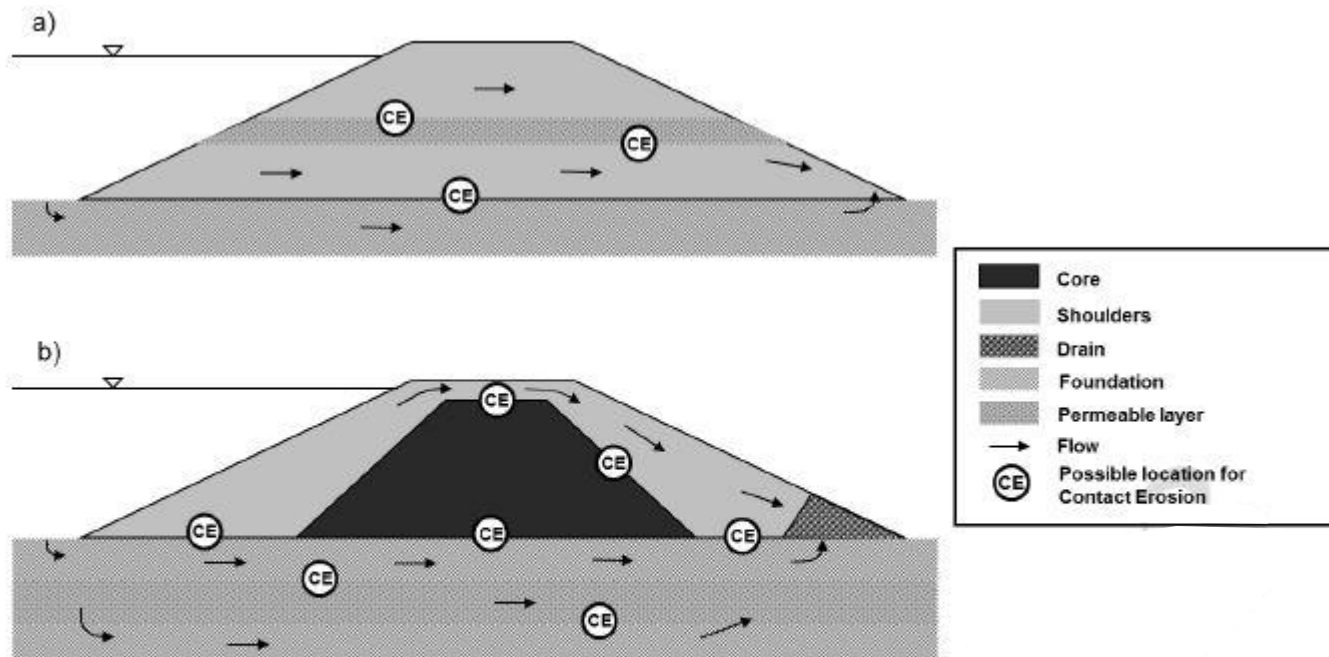


Figure 2.8: Possible location of contact erosion initiation. a) Homogeneous dam with layered fill due to segregation during construction and a coarse foundation soil. b) Zoned dam with potential for contact erosion at high reservoir levels above the core and for erosion into coarse layers in the foundation (Beguin et al, 2009).

- EROSIONE DI CONTATTO

- condizione GEOMETRICA

I pori del materiale più grossolano devono essere sufficientemente ampi da permettere il passaggio del materiale più fine.

- condizione IDRAULICA

La velocità del flusso deve essere tale da permettere il distacco delle particelle più fini.

La condizione idraulica, ossia la velocità critica, è anche funzione della granulometria del materiale più grossolano se il valore assunto dal rapporto D_{15}/d_{85} risulta entro certi limiti ($7.5 < D_{15}/d_{85} < 25$; Braun 1985).

La condizione idraulica dipende anche dalla particolare configurazione considerata:

- sabbie fini sotto uno strato più grossolano (Braun, 1985)

- limi e argille (Guidoux, 2010)

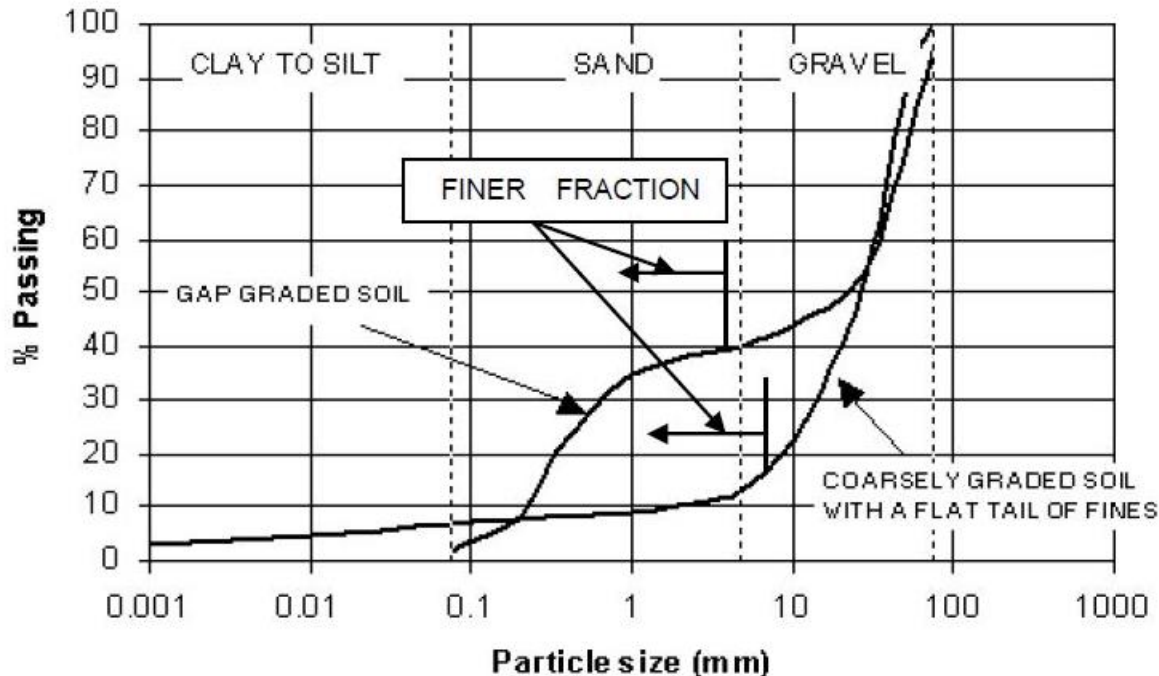
$$U_{crit} = 0.65.n_D \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right) g d_{50}}$$

$$d_H \text{ è il diametro efficace } d_H = \left(\sum_{j=1}^m \frac{F_j}{d_j} \right)^{-1}$$

β dipende dalle caratteristiche coesive del materiale

- *SUFFUSION*

Il fenomeno della *suffusion* è associato a materiali «internamente instabili» ossia caratterizzati in genere da bassa plasticità e una curva granulometrica molto ampia o dalla mancanza di classi specifiche (gap-graded). A causa del flusso di filtrazione le particelle più piccole migrano all'interno i vuoti delle particelle più grossolane. Si genera un aumento di permeabilità, incremento del flusso di filtrazione, incremento del gradiente idraulico e accelerazione del fenomeno.



- SUFFUSION

Le particelle più piccole sono trasportate dai moti di filtrazione attraverso i pori di quelle più grossolane. Gli sforzi efficaci sono progressivamente trasferiti attraverso la matrice delle particelle più grossolane.

- La dimensione delle particelle più piccole deve essere minore della dimensione dei pori di quelle più grossolane che costituiscono lo scheletro del suolo.
- La quantità di particelle più piccole deve essere minore di quella necessaria a riempire i vuoti dello scheletro formato dalle particelle più grossolane.
- La velocità del flusso deve essere tale da mobilitare le particelle più piccole attraverso quelle più grossolane.
- In genere $PI < 7$ (per i gradienti idraulici usuali nelle dighe e fondazioni).

- *SUFFUSION*

Metodi per valutare se un suolo è suscettibile di *suffusion*:

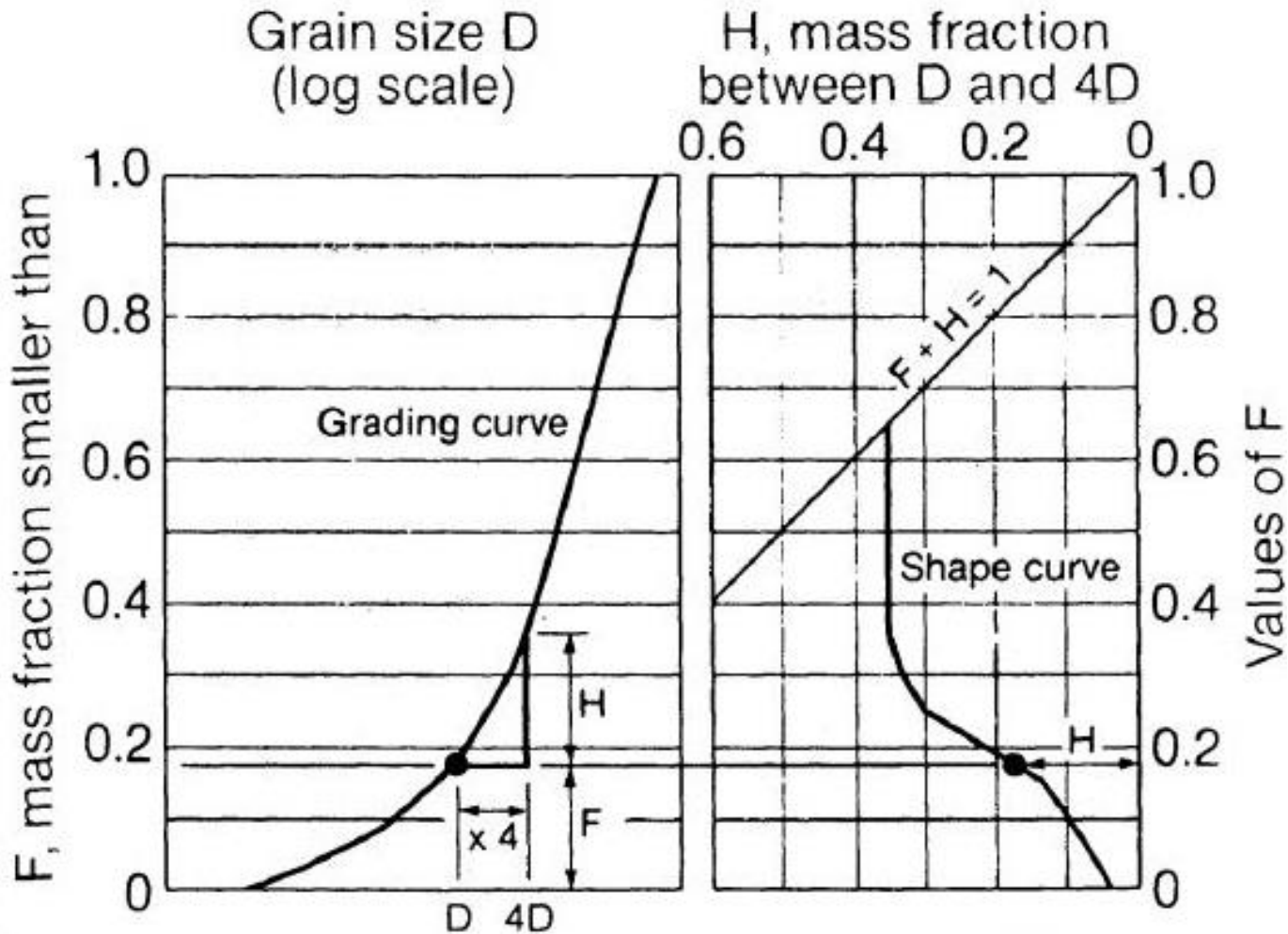
- Burenkova (1993)
- Kenney & Lau (1986) (filtri e zone di transizione con meno del 5% di passante a 0.075mm)
- Wan & Fell (2004, 2007)
- altri

Un dei metodi principali per stabilire la stabilità interna di un materiale consiste nel dividere per tentativi la curva granulometrica originale in un punto arbitrario e confrontare con criteri geometrici le due curve granulometriche risultanti.

- *SUFFUSION*

Kenney & Lau (1986)

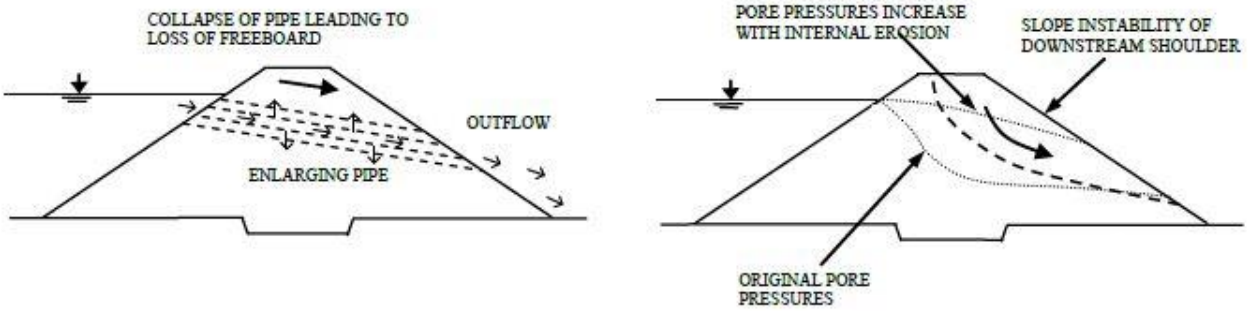
Carenza di particelle tra D e $4D$ è indice di materiale potenzialmente soggetto a *suffusion*.



Il fenomeno dell'erosione interna può evolvere fino a causare il collasso della diga.

Possibili meccanismi:

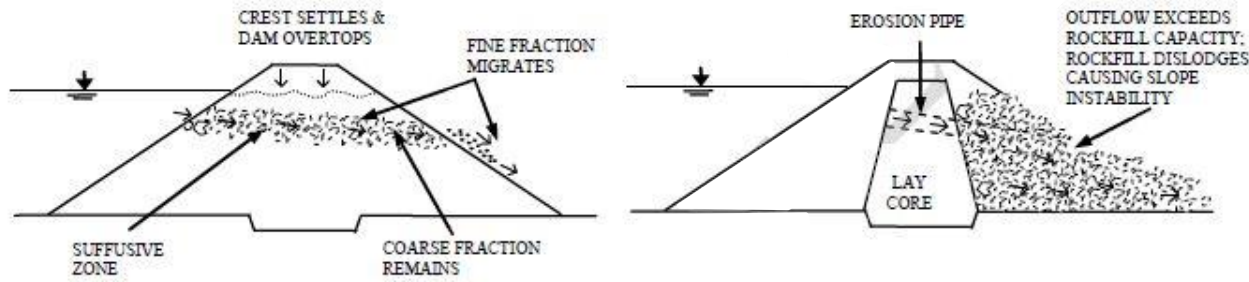
- Allargamento e collasso del tubo di flusso
- Tracimazione della diga
- Instabilità paramento di valle (superfici di scorrimento, unravelling, liquefazione)



Breach by pipe enlargement

Breach by slope instability

Figure 2.10(a) Potential breach (failure) phenomena-pipe enlargement and slope instability



Breach by overtopping by settlement

Breach by unraveling of the downstream face

Figure 2.10(b) Potential breach (failure) phenomena-overtopping by settlement and unraveling of the downstream face, Fell and Fry (2007)

Un recente caso reale ...





04/02/2014



09/02/2014



APPLICAZIONE DEI FILTRI NELLE DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI (ICOLD 1986)

Filter location	Purpose of filter	Type of flow or loading	Significance of filter	Access for repair
a. Downstream slope protection	Control of erosion by rainfall	P – Occasional surface flow.	Non-critical	Easy
b. Downstream surface drains	Removal of surface seepage	P – Continuous or occasional local seepage	Non-critical. Local wet areas may reappear	Easy, possible
c. Upstream slope protection	Control of erosion by wave action and by outward flow during drawdown	P – Cyclic flow during wave action. N ₂ – Small flow during drawdown	Usually non-critical	Possible, but may be difficult
d. Temporary internal drainage during construction	Dissipation of excess pore pressure during construction of wet fills	N ₂ – Temporary flow, limited quantity. Some migration of fines allowable if drains not blocked	Non-critical. Failure may lead to instability during construction, or delays	None
e. Upstream internal fill boundary	Prevention of unacceptable migration of fines in upstream direction	N ₂ – Transient and small flows during drawdown	Non-critical. Only significant if migration is large and continuous	None
f. Downstream internal interface	Prevention of unacceptable migration of fines into filter-drains	N ₂ – Flow only due to infiltration of rainfall, not from reservoir or foundation	Critical, but only if erosion is large and continuous	None
g. Downstream interface, e.g. downstream core boundary or foundation interface near core	Prevention of internal erosion of core including effects of concentrated flow in cracks, etc.	N ₁ – Continuous flow from reservoir, potentially large and increasing if erosion occurs	Critical	None
h. Upstream interface between embankment and foundation	Prevention of internal erosion of core into foundation	N ₁ – Continuous flow from reservoir, potentially large and increasing if erosion occurs	Critical	None
i. Upstream internal interface	Prevention of unacceptable migration of fines from core into upstream fill	N ₂ – usually approaching N ₁ for pumped storage dams	Critical, but only if erosion is large and continuous	None

In generale i filtri devono essere sufficientemente «fini» da trattenere le particelle della zona che devono proteggere (*RETENTION*) e sufficientemente «grossolani» da permetterne il drenaggio (*PERMEABILITY INCREASE*).

Inoltre (ICOLD 1994):

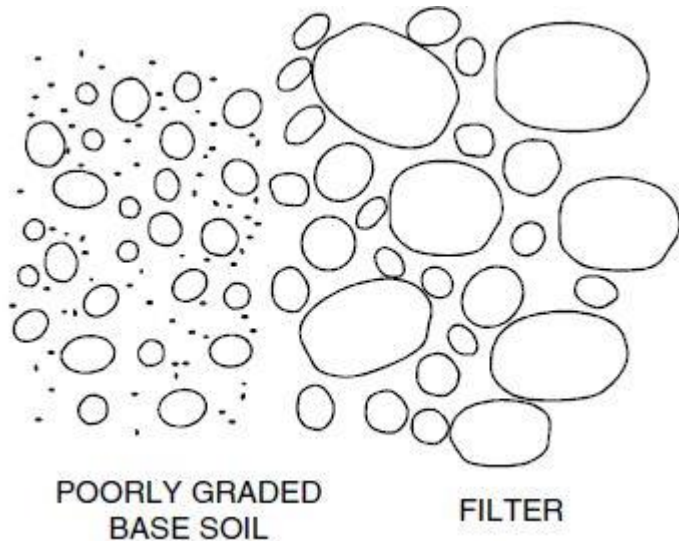
- devono avere una curva granulometrica tale da evitare o minimizzare il processo di segregazione durante le varie fasi di processamento, trasporto e posa in opera;
- la curva granulometrica deve essere stabile ossia non deve modificarsi ad esempio a causa della compattazione o per fenomeni di alterazione;
- la componente fine (passante al vaglio N. 200 ossia $D < 0.075$ mm) non deve esibire coesione né avere tendenza a cementarsi (per evitare la propagazione di fessure)
- devono essere internamente stabile (*suffusion*)

Le caratteristiche dei filtri sono generalmente specificate sulla base della loro curva granulometrica.

- *RETENTION and PERMEABILITY INCREASE*

La notazione principale utilizzata nel progetto dei filtri è la seguente:

- D_{15F} diametro delle particelle del filtro a cui corrisponde il 15 % di passante
- D_{85B} diametro delle particelle del materiale di base a cui corrisponde l'85 % di passante
- D_{15B} diametro delle particelle del materiale di base a cui corrisponde il 15 % di passante



La dimensione dei vuoti (opening size) nel filtro è infatti controllata dalle dimensioni delle particelle più fini. Vale la seguente relazione:

$$OS = D_{15F}/9 \quad (\text{Sherard 1984})$$

- *RETENTION and PERMEABILITY INCREASE*

Esistono vari criteri per stabilire le relazioni tra le curve granulometriche del filtro e del materiale di base, generalmente variabili in funzione delle caratteristiche del materiale di base stesso (*soil group*):

- Terzaghi (1926);
- USBR (1977)
- Sherard and Dunningan (1984)
- Kenney and Lau (1985)
- Lafleur (1989, 1993)
- Foster and Fell (1999)
- Etc.

- *RETENTION and PERMEABILITY INCREASE*

- Terzaghi, 1926:

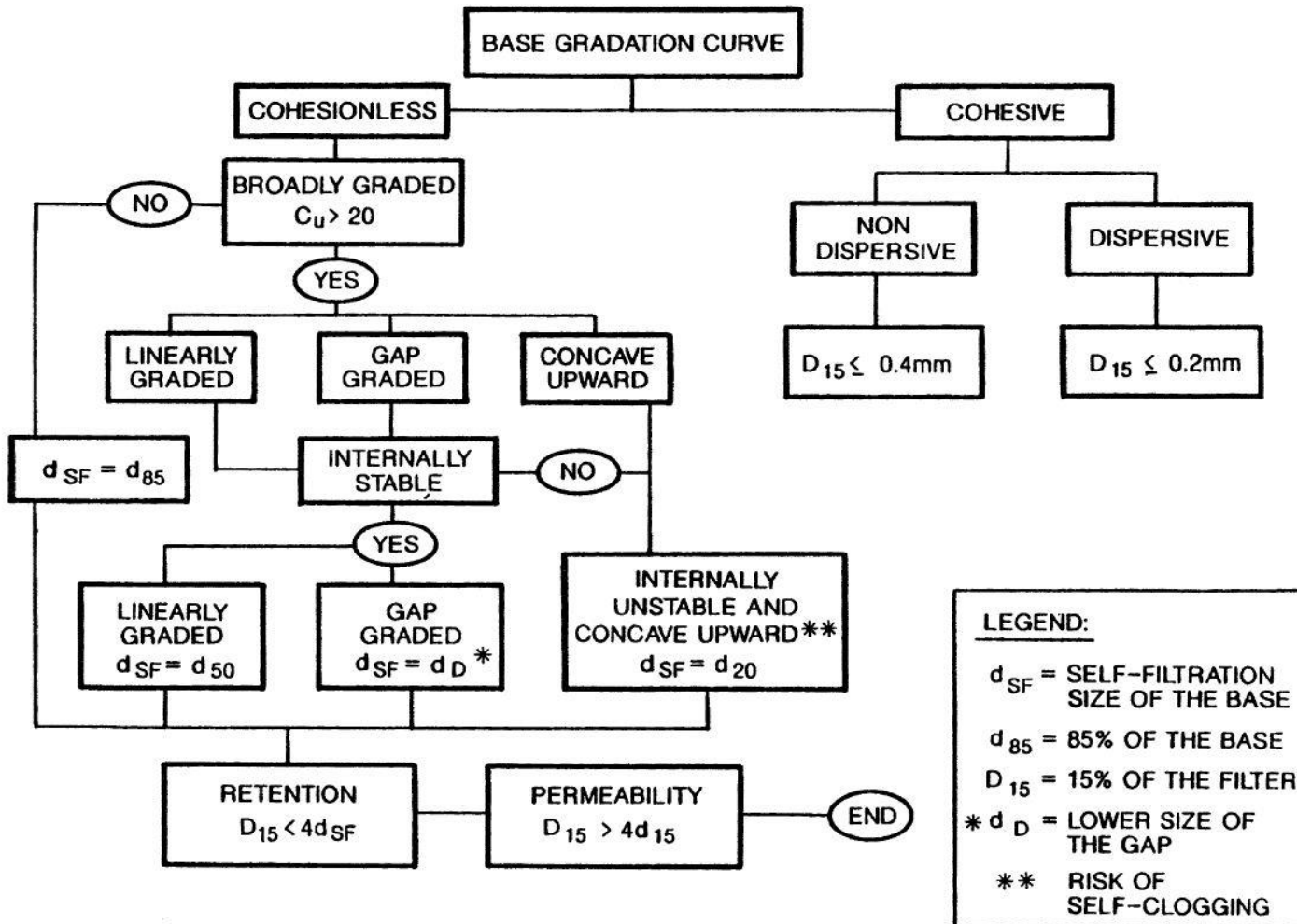
- $D_{15F} / D_{85B} \leq 4$ *retention*
- $D_{15F} / D_{15B} \geq 4$ *permeability increase*

- Sherard and Dunnigan, 1989:

Base soil group	Fines content (a)	Design criteria of Sherard and Dunnigan (1989)
1	$\geq 85\%$	$D_{15F} \leq 9D_{85B}$
2A	35–85%	$D_{15F} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	$< 15\%$	$D_{15F} \leq 4D_{85B}$
4A	15–35%	$D_{15F} \leq (40 - p_p\% \times (4D_{85B} - 0.7) / 25 + 0.7) \text{ mm}$

- RETENTION and PERMEABILITY INCREASE

Lefluer, 1993



- **SEGREGAZIONE**

La segregazione è il fenomeno per cui, a causa delle operazioni di trasporto e posa in opera di un materiale, la distribuzione granulometrica originaria risulta sostanzialmente modificata. Vengono a crearsi zone ben distinte con caratteristiche granulometriche differenti e generalmente caratterizzate dalla mancanza di classi granulometriche specifiche, con effetti negativi sulle caratteristiche meccaniche ed idrauliche del materiale. Le raccomandazioni principali per ridurre la segregazione sono:

- curva ben gradata ($1 < C_c < 3$)
- $D_{100} < 75$ mm
- Passante a 4.75 mm $> 60\%$
- Passante a 0.075 mm $< 2\%$
- Corrette procedure di stoccaggio, trasporto e posa in opera.



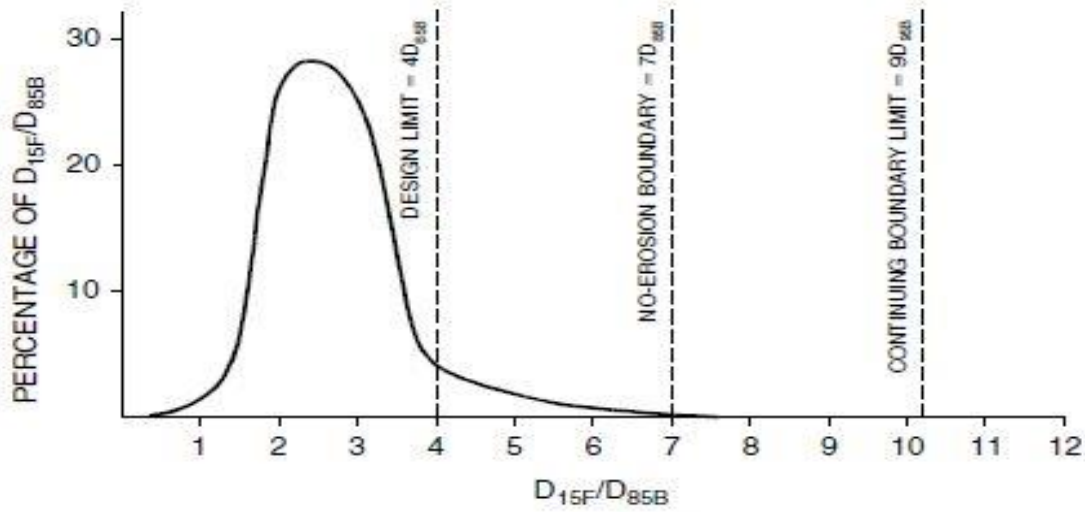
- FUSO DI PROGETTO

L'ampiezza del fuso di progetto deve essere sufficientemente stretta per evitare la posa in opera di materiale *gap-graded* e allo stesso tempo deve essere sufficientemente ampia da permetterne la produzione.

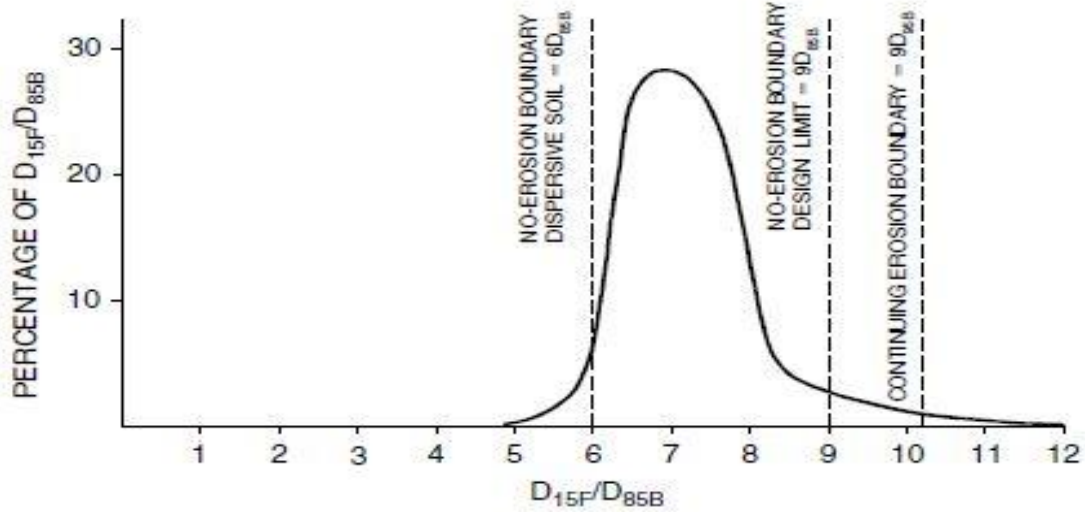
In generale si prescrive che:

- Il rapporto tra diametro massimo e minimo delle curve limite che definiscono il fuso (per ogni passante < 60%) deve essere minore di 5;
- Il coefficiente di uniformità delle curve limite che definiscono il fuso sia < 6

- FUSO DI PROGETTO



(a) SANDY BASE SOIL



(b) FINE CLAY AND SILT, LITTLE OR NO SAND SIZED PARTICLES

Il fuso di progetto deve tener conto della possibile variabilità granulometrica del materiale di base.

- FUSO DI PROGETTO

In generale si osserva che al crescere del coefficiente di uniformità diminuisce la permeabilità e aumenta la capacità di ritenuta del filtro.

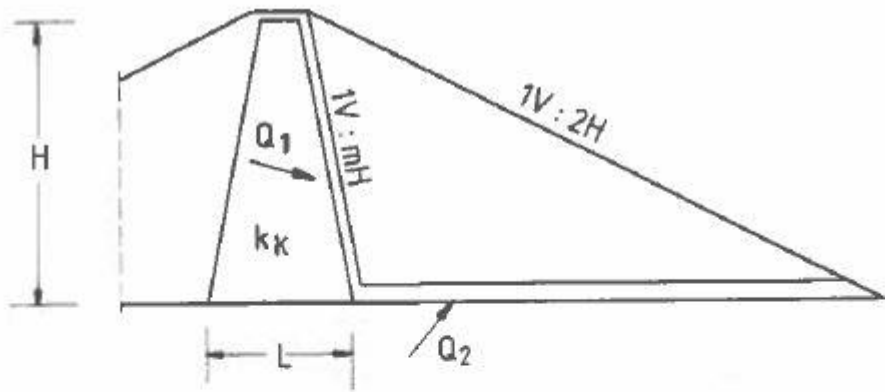
A parità del rapporto DF_n/dB_n un valore più elevato del coefficiente di uniformità comporta un filtro più conservativo ma con minor capacità drenante che a sua volta potrebbe comportare un aumento della dimensione trasversale del filtro stesso.

Di conseguenza in generale si prescrivono valori dei rapporti DF_n/dB_n crescenti all'aumentare del coefficiente di uniformità del filtro.

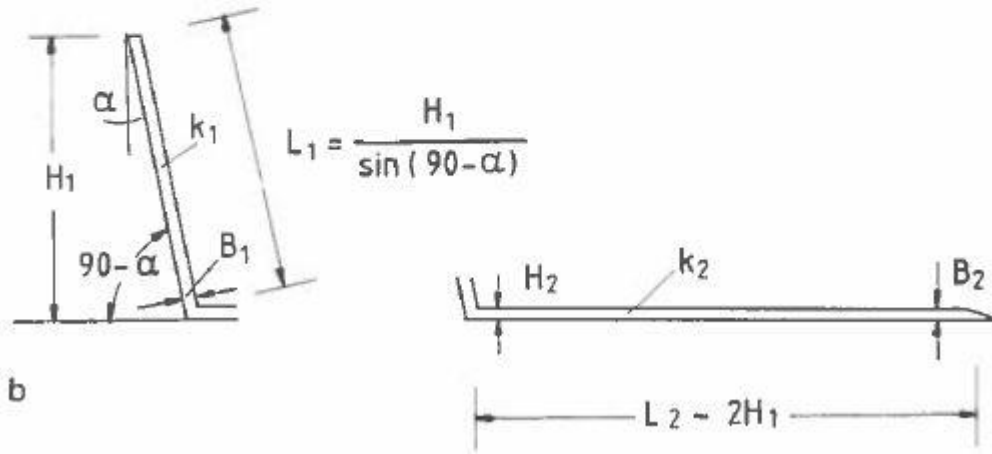
Questo comporterebbe un parallelismo tra la curva del filtro e quella del materiale base che in genere non è essenziale e può essere limitato all'intervallo dei diametri più piccoli che controllano la permeabilità.

- PRE-DIMENSIONAMENTO DEL FILTRO

- Aspetti costruttivi
- Aspetti idraulici



$$B_1 = \frac{Q_1}{k_1 \cdot (\sin 90 - \alpha)}$$

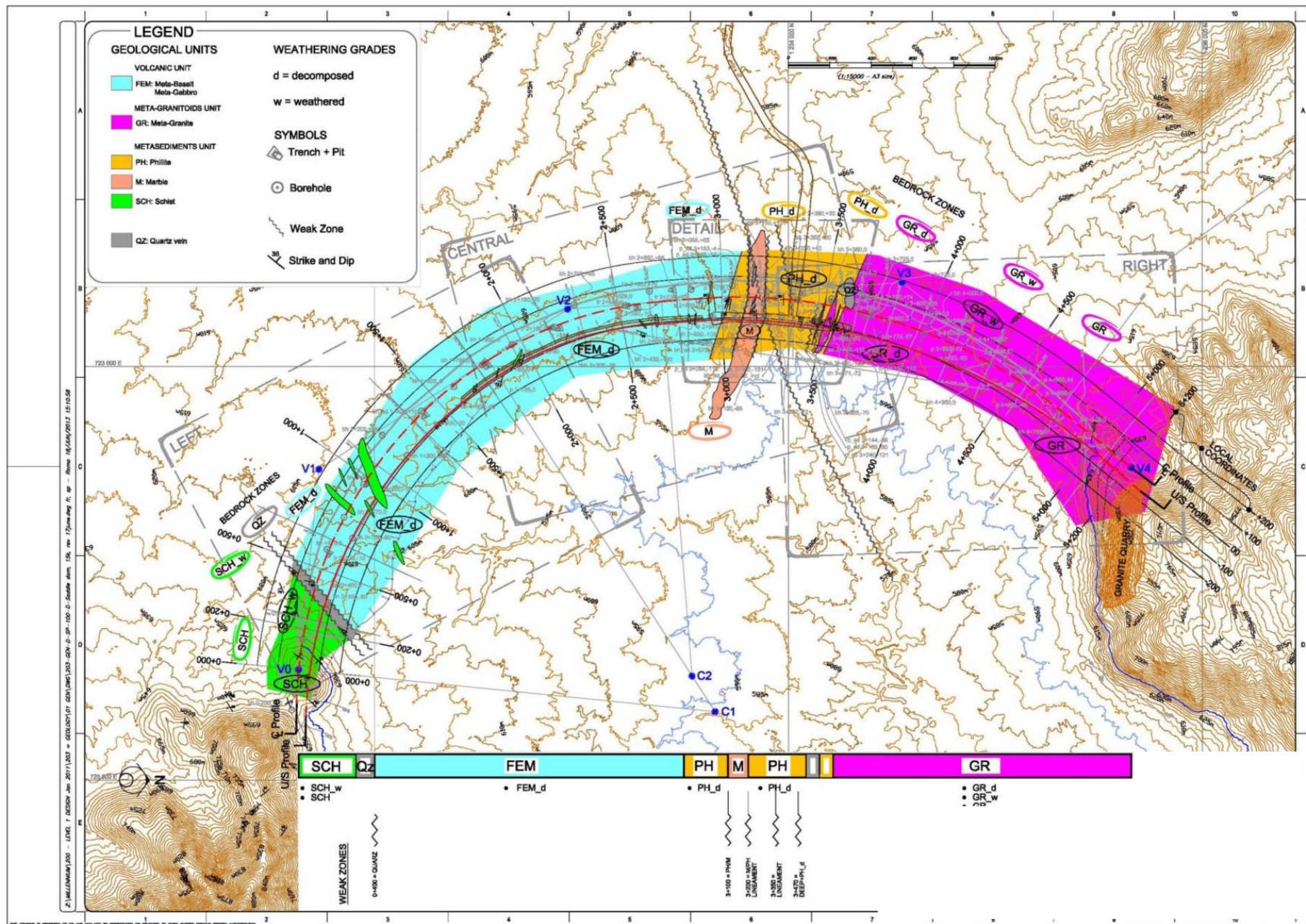


$$L_1 = \frac{H_1}{\sin(90 - \alpha)}$$

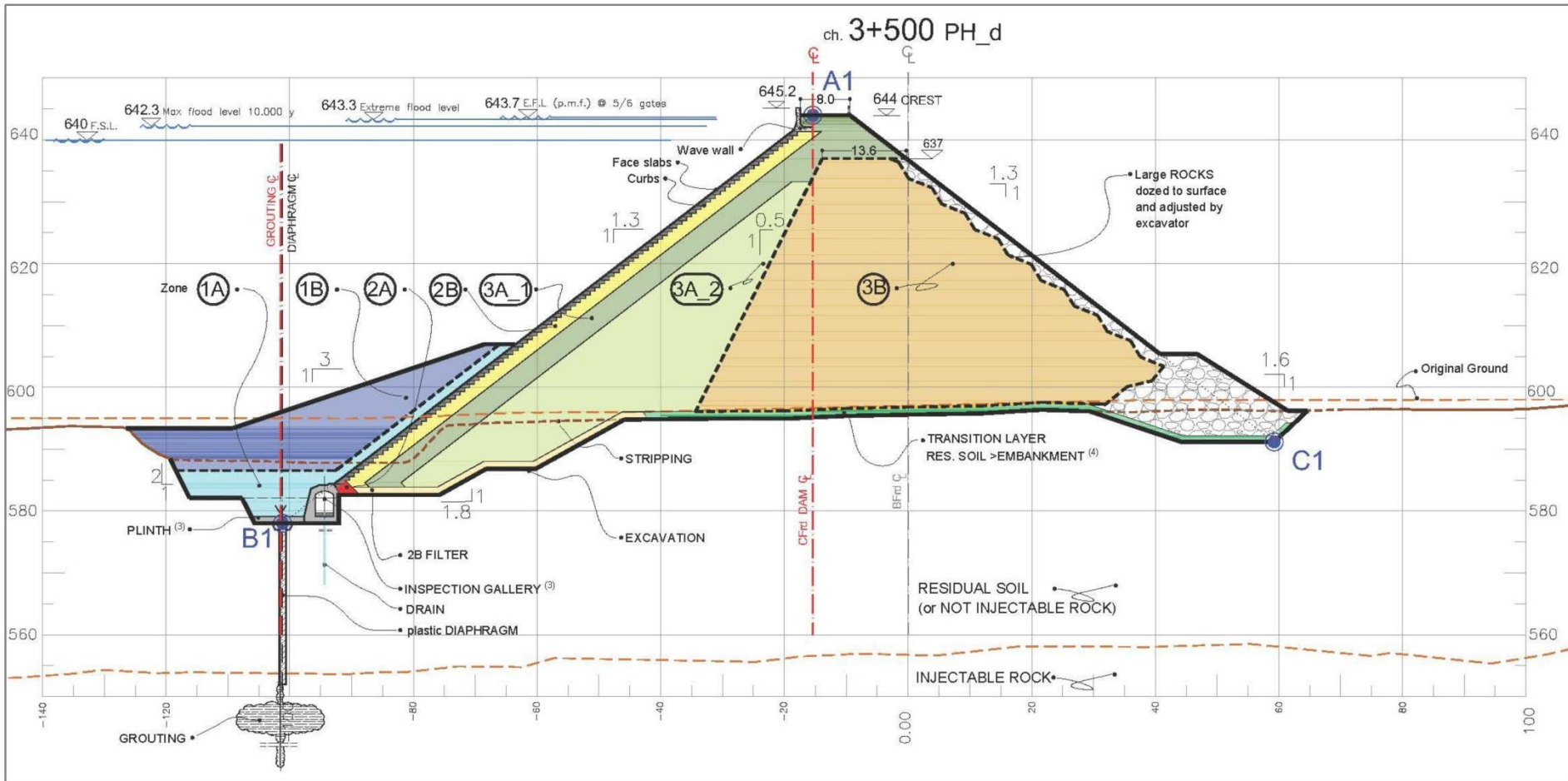
$$B_2 = \sqrt{\frac{(Q_1 + Q_2) \cdot 2H_1}{k_2}}$$

b

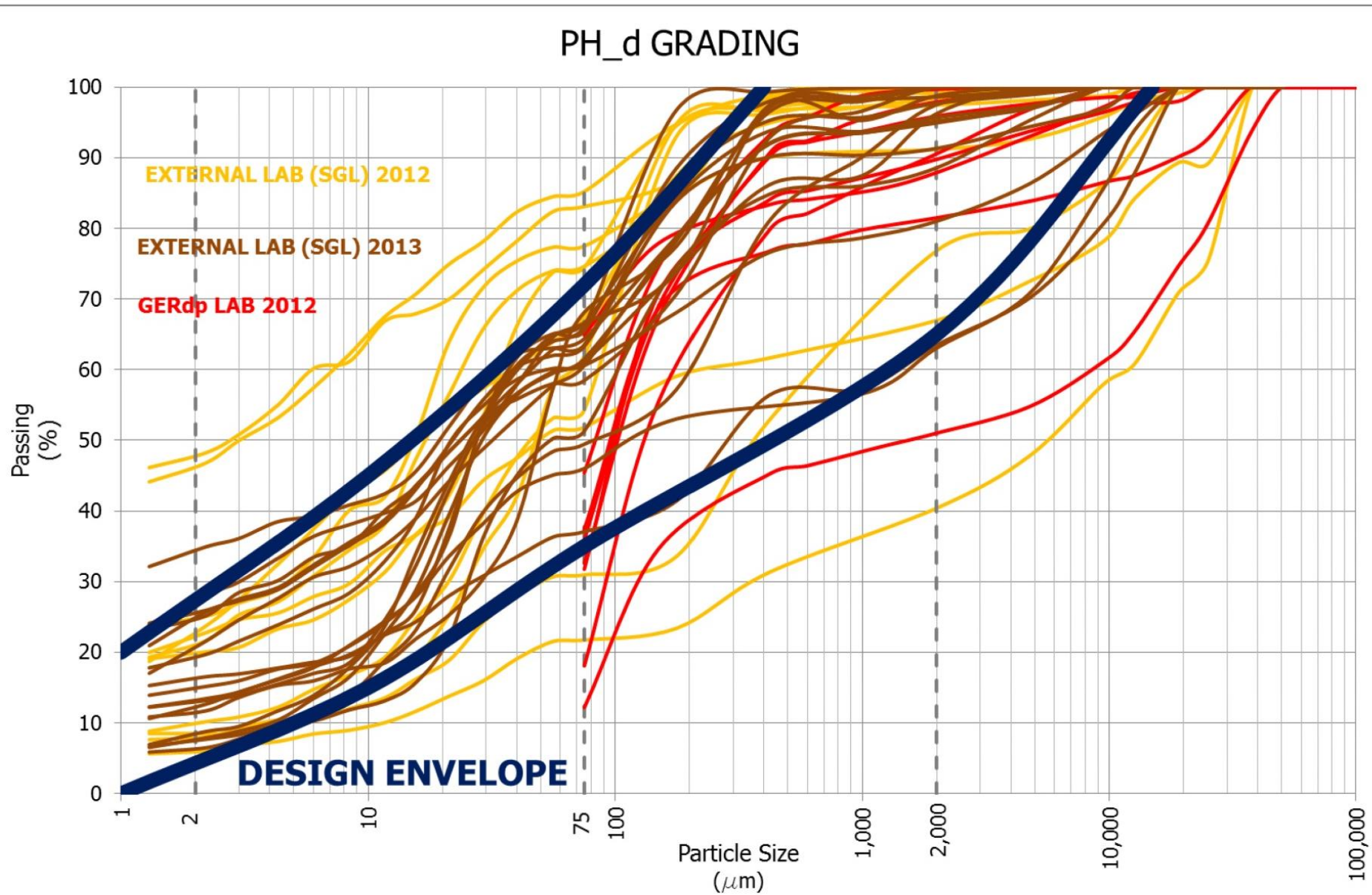
FUSO DI PROGETTO (DIGA DI SELLA impianto GERdp)



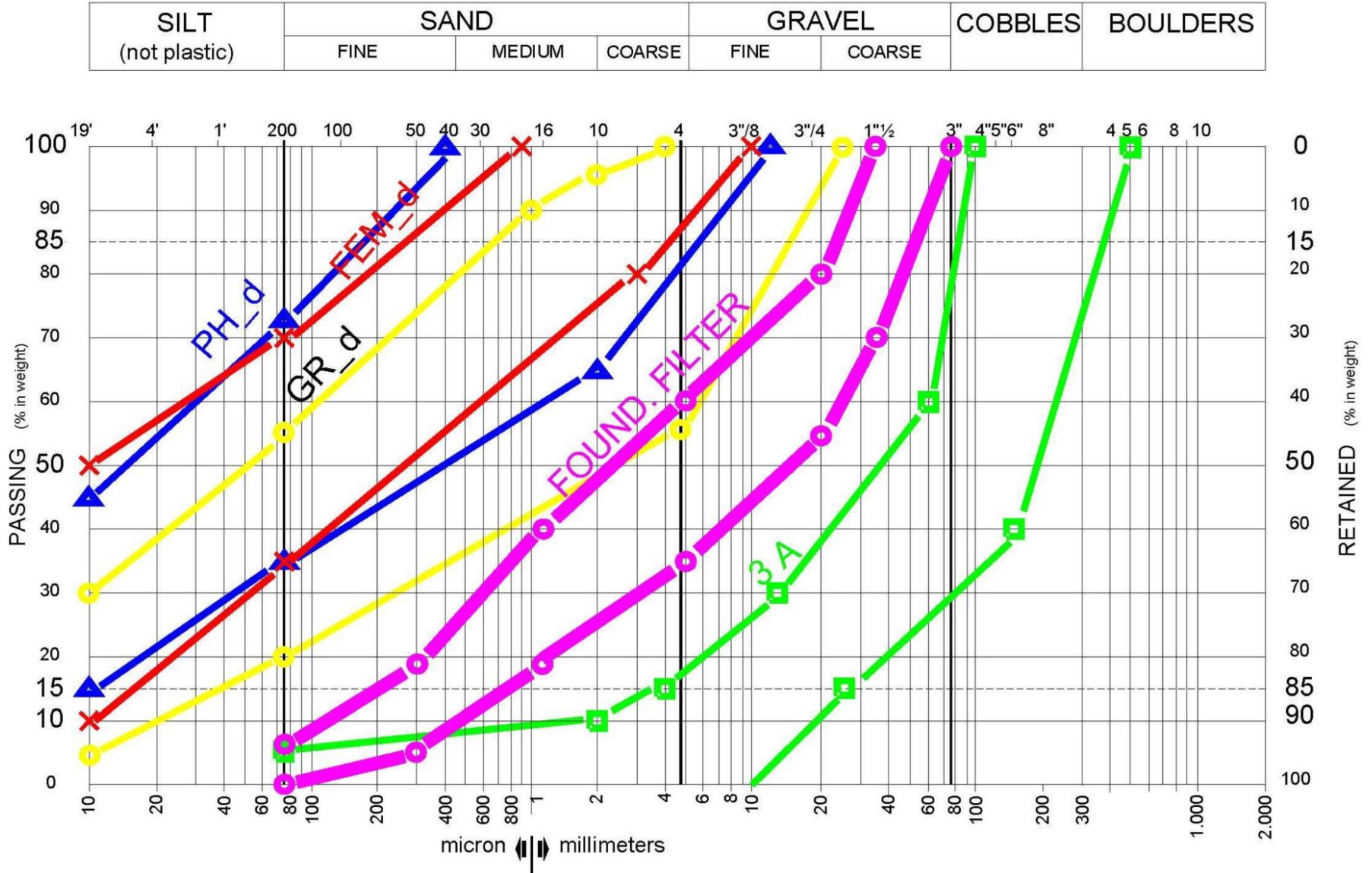
FUSO DI PROGETTO (DIGA DI SELLA impianto GERdp)



FUSO DI PROGETTO (DIGA DI SELLA impianto GERdp)



FUSO DI PROGETTO (DIGA DI SELLA impianto GERdp, Etiopia)



BIBLIOGRAFIA

1963_Sherard, EARTH and EARTH-ROCK DAMS

1987_USBR, DESIGN of SMALL DAMS

1997_Kutzner, EARTH and ROCKFILL DAMS

2005_Fell, GEOTECHNICAL ENGINEERING OF DAMS

2007_Fell, INTERNAL EROSION of DAMS and FOUNDATIONS

2010_ICOLD Bulletin 141, CONCRETE FACE ROCKFILL DAMS

2012_USBR, INTERNAL EROSION RISK

2013_ICOLD Bulletin 164, INTERNAL EROSION (Draft)