



Traverse

Aspetti Strutturali e Geotecnici

Ing. Giuseppe Sembenelli

ITCOLD - GdL Traverse – Roma, 06/06/2024



Traverse: combinano le funzioni di sbarramento con quelle di uno scarico di superficie

paratoie anche importanti per alzare il livello fino a altezze ragguardevoli



La struttura in elevazione (quando c'è) è **leggera**
parte massiccia in basso e parte 'esile' al di sopra della soglia →
deve sopperire alle spinte non con massa (come una diga) ma con la geometria della struttura

Sicurezza delle traverse \leftrightarrow idraulica fluviale \leftrightarrow sicurezza di altre opere a monte e a valle

- Piene (tempi di ritorno, entità) e franchi di riferimento
- Modifica del regime di deflusso
- Si pongono questioni di coerenza e armonizzazione



Munda Headwork, sul fiume Swat in Pakistan



- dimensionata per piena 10 000 m³/s
- Danni gravi nel 2010, riparata, e nuovamente danni nel 2021, per una nuova piena eccezionale
- appena a valle della Diga di Mohmand, portata esitata massima 27 000 m³/s, in costruzione

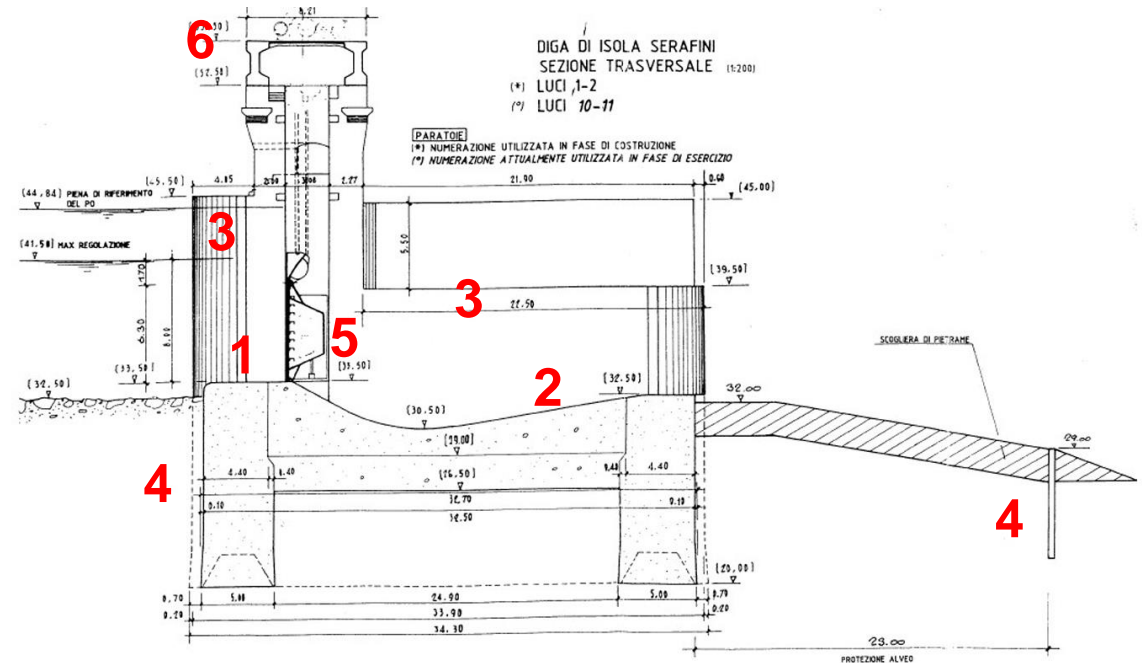
Aspetti Strutturali e Geotecnici

Schema tipico



Elementi significativi delle traverse

- 1) Soglia
- 2) Vasca di dissipazione
- 3) Pile per sostenere le paratoie, dove previste
- 4) Elementi di intercettazione in fondazione
- 5) Paratoie, dove previste
- 6) Strutture secondarie come ponte, carriponte, ecc.



Aspetti Strutturali e Geotecnici

Vulnerabilità e Meccanismi critici



- Meccanismi legati al flusso d'acqua (insufficienza idraulica)
 - Occlusione degli scarichi
 - Effetti idrodinamici con scalzamenti
 - Erosioni



- Spencer Dam USA, 2019

Traversa Soverzene

- Vulnerabilità strutturale
 - Azioni idrodinamiche
 - Assestamenti differenziali (possono determinare malfunzionamento paratoie)
 - Rottura delle paratoie (delicata se si rompono possono portare a insufficienza idraulica)



- Ammaloramento strutturale nel tempo (es. calcestruzzo esposto a cicli termici e di bagnatura)

- Vulnerabilità della fondazione
 - Filtrazione
 - Sifonamento: può portare a rottura o eccessive deformazioni
 - Sifonamento (piping) retrogressivo a partire dalla frontiera di uscita della filtrazione – **gradienti di uscita**
 - Sollevamento (heaving) della fondazione anche in profondità sotto la frontiera di uscita – **gradienti medi**
 - Distacco fondo (roofing) lungo le frontiere rigide orizzontali – **creep ratio**
 - Erosione e suffusione: determina assestamenti
 - Eccessiva filtrazione: può ridurre efficienza sistema
- Assestamenti: possono avere ripercussioni su funzionalità
 - Statici (compressione, consolidazione, erosione)
 - Sismici (liquefazione, mobilità ciclica) meno comuni

Aspetti Strutturali e Geotecnici

Vulnerabilità e Meccanismi critici



- Vulnerabilità della fondazione
- Sono fenomeni subdoli, poco visibili, nel tempo possono degenerare in problemi importanti
- Eventuale erosione dell'alveo riduce lunghezza di filtrazione e aumenta la possibilità di sifonamento
- Necessario monitoraggio assiduo (piezometria e spostamenti) e batimetrie frequenti (proporzionato alle dimensioni dell'opera)

Aspetti Strutturali e Geotecnici

Vulnerabilità e Meccanismi critici



- Vulnerabilità degli argini
 - a monte della traversa sottoposti a carico idrostatico permanente
 - Soggetti alle fluttuazioni di invaso, compreso svasso rapido
 - A valle: in particolari condizioni erosione



- Argini Traversa Castel Giubileo



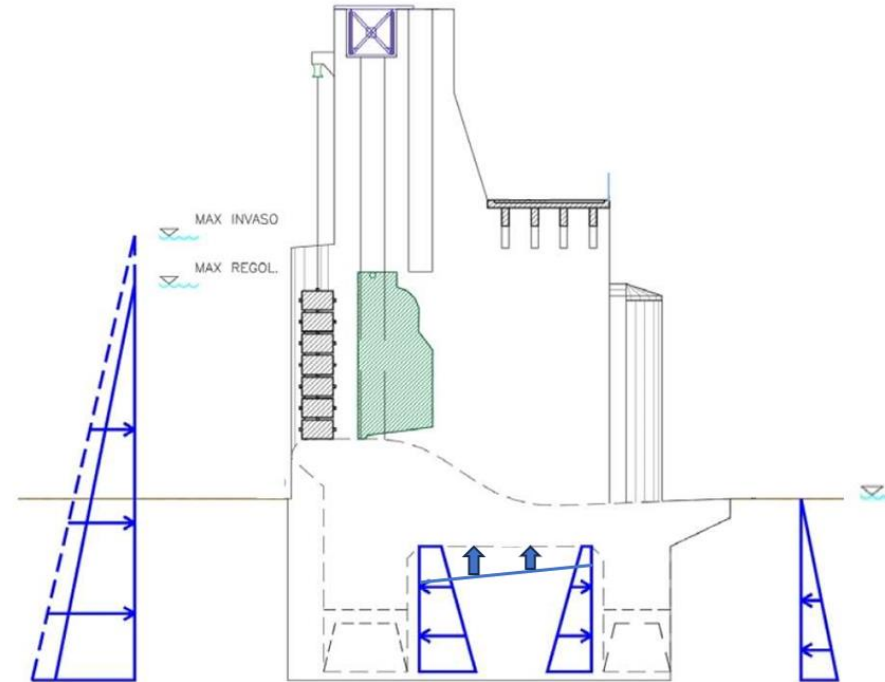
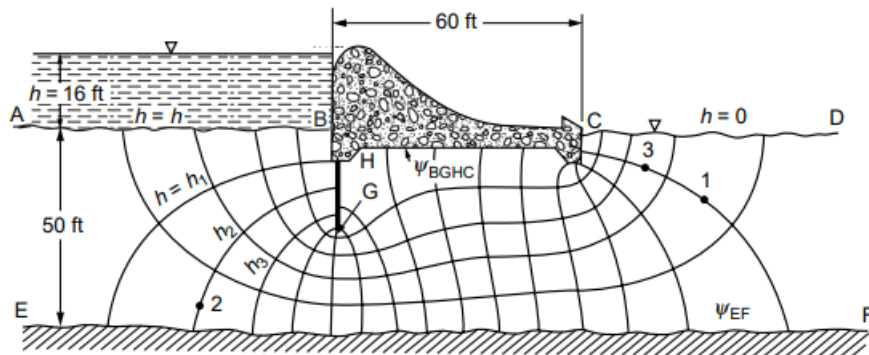
Aspetti Strutturali e Geotecnici

Strutture in elevazione



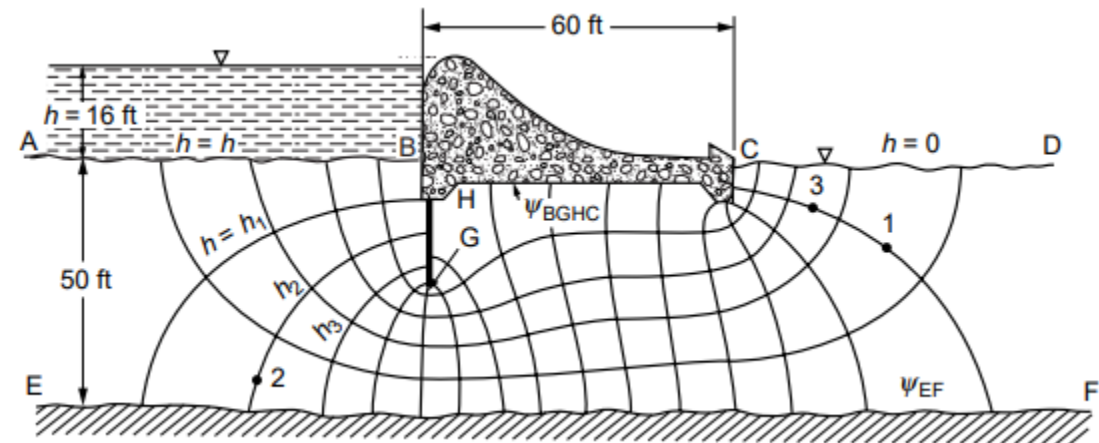
- Azioni come per le dighe
- Acqua genera le azioni dominanti: Idrostatiche in elevazione, linearizzate sotto fondazione come semplificazione di distribuzione ottenuta con rete di filtrazione
- Condizione di acqua fluente
- Azione sismica anche in senso trasversale

Si sopprime a mancanza di peso con geometria



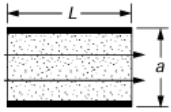
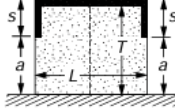
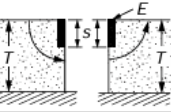
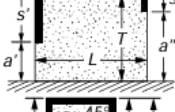
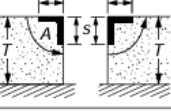
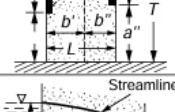
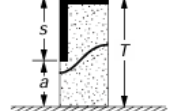
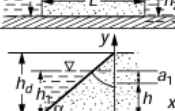
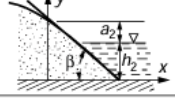
- Elementi di attenzione
 - Portanza e comportamento in condizioni statiche e sismiche
 - Filtrazione
 - Assestamenti

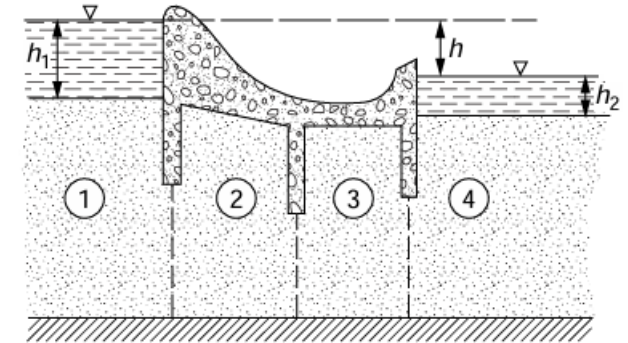
- Filtrazione in fondazione
- Flusso confinato controllato principalmente con elementi di intercettazione la cui profondità e posizione va ottimizzata
- Analisi più completa attraverso rete di flusso : ci offre molte informazioni
 - Sottopressioni (uplift) → dimensionamento strutturale e geometria
 - Gradienti → geometria e fondazione
 - Portate → Efficienza del sistema



- Filtrazione in fondazione
- Rete di flusso determinata con programmi di calcolo agli elementi finiti o alle differenze finite
- Elementi significativi della stratigrafia vanno inclusi (es. profondità della fondazione, cambi stratigrafici, lenti con permeabilità differenziata, anisotropia) anche se semplificazioni necessarie

- Filtrazione in fondazione
 - procedimenti analitici o semplificati utili per
 - controllo o dimensionamento (es.
 - per flusso confinato: Pavlovsky, 1935 Method of Fragments)

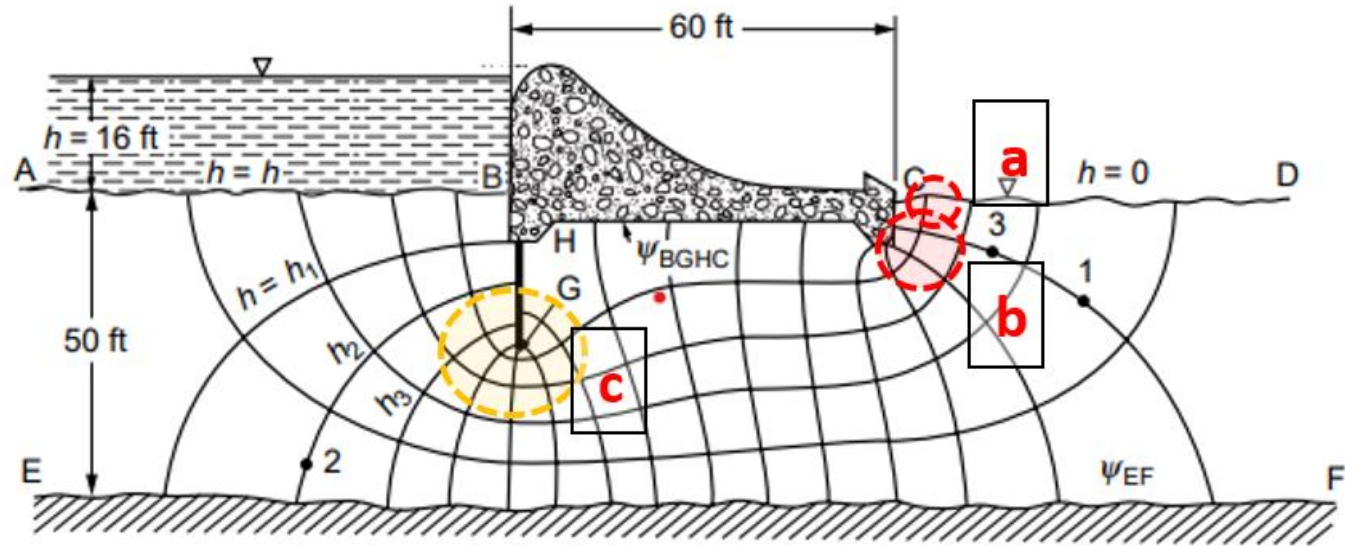
Fragment type	Illustration	Form factor, Φ (h is head loss through fragment)	Fragment type	Illustration	Form factor, Φ (h is head loss through fragment)
I		$\Phi = \frac{L}{a}$	V		$L \leq 2s$: $\Phi = 2 \ln \left(1 + \frac{L}{2a} \right)$ $L \geq 2s$: $\Phi = 2 \ln \left(1 + \frac{s}{a} \right) + \frac{L-2s}{T}$
II		$\Phi = \frac{1}{2} \left(\frac{kh}{Q} \right)$, Fig. 17.11	VI		$L \geq s' + s''$: $\Phi = \ln \left[\left(1 + \frac{s'}{a} \right) + \left(1 + \frac{s''}{a} \right) \right] + \frac{L - (s' + s'')}{T}$ $L \leq s' + s''$: $\Phi = \ln \left[\left(1 + \frac{b'}{a} \right) + \left(1 + \frac{b''}{a} \right) \right]$ where $b' = \frac{L + (s' - s'')}{2}$ $b'' = \frac{L - (s' - s'')}{2}$
III		$\Phi = \frac{1}{2} \left(\frac{kh}{Q} \right)$, Fig. 17.11	VII		$\Phi = \frac{2L}{h_1 + h_2}$ $Q = k \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$
IV		$b \leq s$: $\Phi = \ln \left(1 + \frac{b}{a} \right)$ $b \geq s$: $\Phi = \ln \left(1 + \frac{s}{a} \right) + \frac{b-s}{T}$	VIII		$Q = k \frac{h_1 - h}{\cot \alpha} \ln \frac{h_2}{h_3 - h}$
			IX		$Q = k \frac{a_1}{\cot \beta} \left(1 + \ln \frac{a_2 + h_2}{a_2} \right)$



$$Q = k \frac{h}{\sum_{i=1}^m \Phi_i}$$

(M. Harr, 1962, Groundwater and Seepage)

Zone critiche per Gradienti



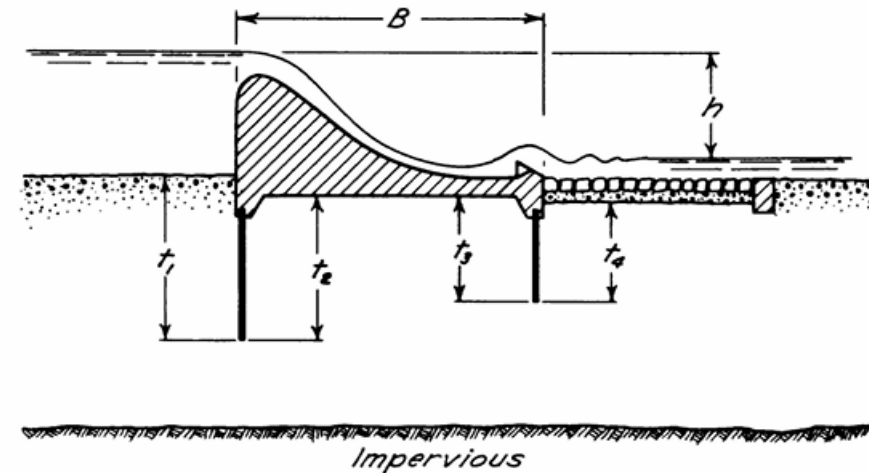
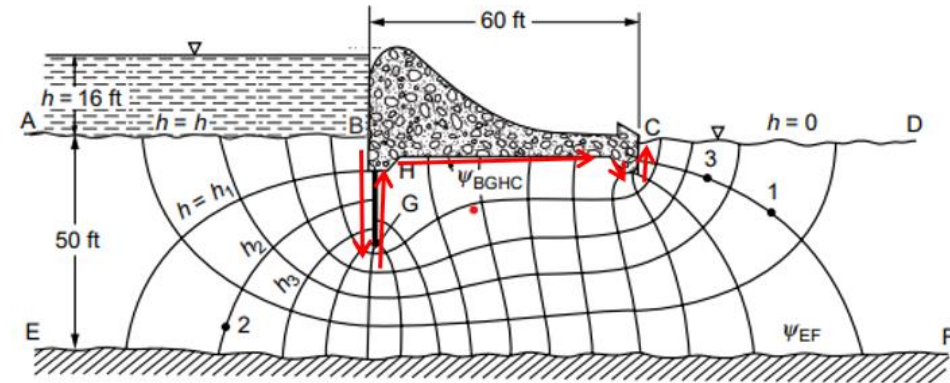
- a) Sifonamento retrogressivo → eccessivi gradienti uscita
- b) Sollevamento (heaving) = sifonamento profondo → eccessivi gradienti medi uscita
- c) Erosione / suffusione → Alti gradienti in zone confinate in terreni sensibili al fenomeno

- Fattore di sicurezza rispetto al gradiente critico va modulato con materiale fondazione
- Valori consigliati
 - Ghiaia 4-5
 - Sabbia medio grossolana 5-6
 - Sabbia fine 6-7
 - Ulteriore attenzione va assegnata a terreni con distribuzione granulometrica discontinua, che possano risultare intrinsecamente non stabili → gradienti anche modesti possono portare a erosione/suffusione con conseguenza di assestamenti nel lungo termine – in questo caso il fenomeno può avvenire in profondità nella fondazione
- Fenomeni di erosione profonda/suffusione delicati: valutazioni di sicurezza meglio basate su campagna sperimentale specifica

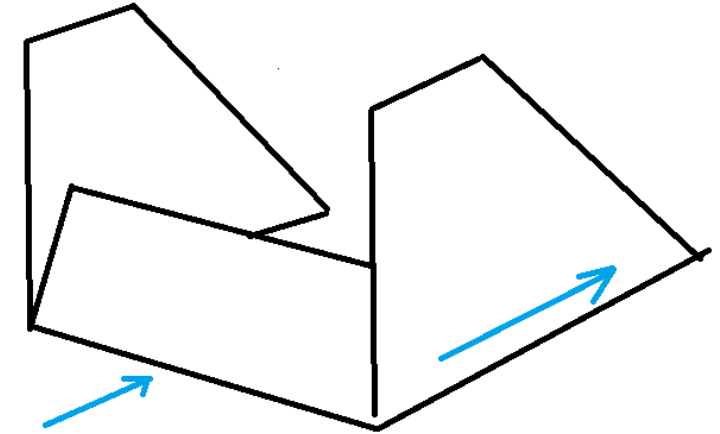
- Ulteriore controllo su sifonamento: distacco (roofing) lungo interfaccia
 - Può essere usato come controllo speditivo o
 - per dimensionamento iniziale
- Creep Ratio (percorso percolazione)
- $C_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + B/3) / h$

Valori minimi di C_w , secondo Lane

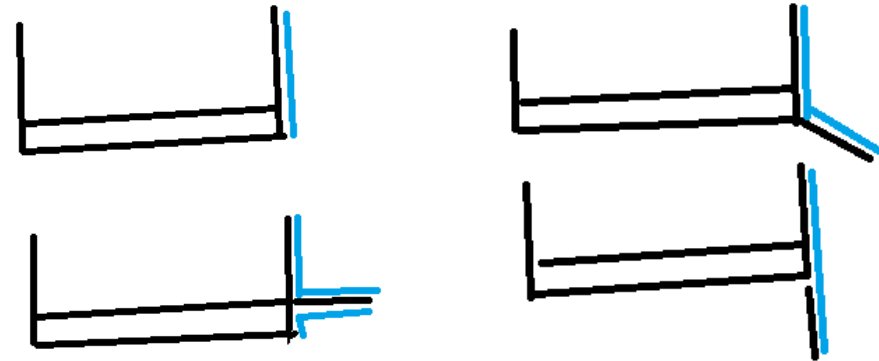
Modified Creep Values C_w for $k_h/k_v = 3$	
Very fine sand or silt	8.5
Fine sand	7.0
Medium sand	6.0
Coarse sand	5.0
Fine gravel	4.0
Medium gravel	3.5
Coarse gravel including cobbles	3.0
Boulders with some cobbles and gravel	2.5
After E.W. Lane (1935)	



- Filtrazione non solo confinata nel piano
- Superficie Piezometrica è tridimensionale e tende a aggirare opera
- (anche se meno onerosa che in dighe per geometria invasore)



- Concetti di percorso critico di percolazione possono essere applicati anche in questo caso
- Il percorso può essere allungato con
 - Setti interni all'argine
 - Estensione a monte dei muri di imbocco



- Assestamenti
 - Compatibilità strutturale
 - in relazione a funzionalità paratoie
- Assestamenti Statici: compressione/consolidazione per opere nuove e in relazione a cambio regime di pressioni efficaci per le operazioni invaso/svaso/flusso in presenza di sedimentazione
- Assestamenti Statici: erosione/suffusione profonda corrisponde a variazione di volume
- Assestamenti sismici:
 - Stress Ratio massimo per $\sigma_0/\sigma'_0 \sim 2$
 - Sisma può portare a deformazioni non solo nei casi estremi di liquefazione o mobilità ciclica <8in questo caso con associata rottura), ma anche semplicemente nella dissipazione di un modesto eccesso di pressioni interstiziali generato dal sisma (consolidazione)

- Una considerazione finale
- La filtrazione **anche quando non è critica** stabilisce una **azione permanente** per la fondazione pari al peso di volume dell'acqua per il gradiente
- Verso la sezione di uscita a valle della vasca di dissipazione
 - il flusso subverticale riduce le pressioni efficaci e conseguentemente riduce la resistenza di un fondo incoerente che diventa più sensibile all'erosione specie con piene importanti
 - Ragione per cui si pone spesso una protezione (es pietrame con transizione e con filtro rovescio) appena a valle della vasca di dissipazione
- In profondità, specie dove i gradienti sono più alti
 - Una riduzione di pressione efficace dovuta ad esempio a una scossa sismica in un terreno sabbioso riduce la resistenza del terreno
 - Le forze di filtrazione potrebbero essere sufficienti a mobilitare i fini e generare condizioni per la erosione/suffusione

Argini nel tratto a monte della sezione di chiusura

- Argini possono essere incassati nel terreno o rilevati arginali
- Sottoposti alle stesse azioni della traversa con in aggiunta flusso (qui radente)
- Tutte le scarpate arginali nella fascia di rigurgito specie quelle sotto al piano medio circostante sono potenzialmente sensibili alla condizione di svaso rapido
- Sottofiltrazione specie per rilevati arginali (studio monumentale negli anni '50 WES per il Fiume Mississippi, USA)

Grazie dell'Attenzione